

Regionalna karakterizacija karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana u funkciji njihovog održivog korišćenja i menadžmenta; Regional characterization of karst groundwater of the Central Balkan parts in the function of their sustainable use

Veljko J. Marinović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Regionalna karakterizacija karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana u funkciji njihovog održivog korišćenja i menadžmenta; Regional characterization of karst groundwater of the Central Balkan parts in the function of their sustainable use | Veljko J. Marinović | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007437>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO–GEOLOŠKI FAKULTET

Veljko J. Marinović

REGIONALNA KARAKTERIZACIJA KARSTNIH
PODZEMNIH VODA DELA CENTRALNOG
BALKANA U FUNKCIJI NJIHOVOG ODRŽIVOG
KORIŠĆENJA I MENADŽMENTA

Doktorska disertacija

Beograd, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Veljko J. Marinović

REGIONAL CHARACTERIZATION OF KARST
GROUNDWATER OF THE CENTRAL BALKAN
PARTS IN THE FUNCTION OF THEIR
SUSTAINABLE USE AND MANAGEMENT

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Mentor:

Dr Zoran Stevanović, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

uža naučna oblast: Hidrogeologija

Članovi komisije:

Dr Igor Jemcov, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

uža naučna oblast: Hidrogeologija

Dr Saša Milanović, docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

uža naučna oblast: Hidrogeologija

Dr Vesna Ristić Vakanjac, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

uža naučna oblast: Hidrogeologija

Dr Milan Radulović, vanredni profesor, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet

uža naučna oblast: Hidrogeologija

Datum odbrane: _____

*„Bože, ne dopusti da srce naše ostane prazno, nego daj —
pošto od Tvoje volje sve zavisi — da uvek želimo i da se
nadamo, i da to što želimo bude dobro i stvarno i da naša nada
ne bude isprazna. Daj da predmet naših želja bude viši i lepši od
našeg života i da se dobroj nadi nikad ne izneverimo zbog
kratkih i varljivih ostvarenja koja zaklanjaju vidik i lažno
obećavaju odmor. Daj nam prav put, sa prolaznim posrtanjima, a
sa mirom i slavom na kraju. I daj nam mudrosti i hrabrosti, kad
nam daješ iskušenja. I ma kuda išli i lutali, ne daj da na kraju
ostanemo izvan Tvoje sveobimne harmonije, jer to svake
sekunde, na svakom mestu, svakim delićem bića želimo.“*

Ivo Andrić,
„Znakovi pored puta“

ZAHVALNOST

Doktorska disertacija „Regionalna karakterizacija karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana u funkciji njihovog održivog korišćenja i menadžmenta“ urađena je pod mentorstvom dr Zorana Stevanovića, red. prof. u penziji. Za pruženu priliku da učestvujem u nacionalnim i međunarodnim projektima koji se tiču menadžmenta podzemnih vodnih resursa, za usmeravanje mog stručnog i naučnog fokusa na specifične oblasti hidrogeologije, kao i za motivaciju, podršku i savete pri definisanju teme i tokom izrade same doktorske disertacije posebnu zahvalnost dugujem mentoru doktorske disertacije, dr Zoranu Stevanoviću, redovnom profesoru u penziji Rudarsko – geološkog fakulteta.

Veliku zahvalnost upućujem svojim dragim kolegama iz Centra za hidrogeologiju karsta – dr Saši Milanoviću, docentu, dr Ljiljani Vasić, docentu, dr Branislavu Petroviću, naučnom saradniku i Petru Vojnoviću, mast. inž. geol. na ustupljenim podacima o režimu vrela Mlave, na pomoći pri terenskim istraživanjima, kao i za sve reči ohrabrenja i optimizma tokom rada na doktorskoj disertaciji.

Zahvalnost upućujem dr Igoru Jemcovu, redovnom profesoru, za ustupanje podataka o režimu kvaliteta i kvantiteta vrela Perućac, kao i za veliku pomoć pri evaluaciji ulaznih elemenata karstnih sistema i kvantitativnoj karakterizaciji karstnih podzemnih voda. Veliku pomoć dobio sam i od dr Marine Ćuk Đurović, naučnog saradnika, u vezi sa logističkom regresionom analizom, na čemu joj se izrazito zahvaljujem.

Veliku pomoć pri prikupljanju podataka dobio sam od zaposlenih i menadžmenta JKP „Lim“ iz Prijepolja za vrelo Seljašnice i JKP „Naissus“ iz Niša za vrelo Mokra, na čemu im se zahvaljujem. Hvala i kolegi Golubu Ćulafiću, MSc geogr. na pomoći, savetima i podacima u vezi sa klimatskim karakteristikama Durmitora i Cetinja, odnosno izdašnosti vrela Oko Bijele i Rijeka Crnojevića. Posebnu zahvalnost upućujem kolegini Nataliji Samardžić, dipl. inž. geol. i dr Feridu Skopljaku, vanrednom profesoru RGGF Univerziteta u Tuzli na spremnosti da mi pomognu i odgovore na sve nedoumice i pitanja u vezi sa karstnim sistemom vrela Bosne.

Zahvalnost upućujem i kolegama dr Nenadu Mariću, docentu, dr Vesni Ristić Vakanjac, redovnoj profesorki, dr Jani Štrbački, vanrednoj profesorki, Đorđiju Božoviću, dipl. inž. geol., Branku Ivankoviću, dipl. inž. geol., mr Petru Begoviću, dipl. inž. geol., dr Blažu Kogovšek i Vedranu Silajdžiću, direktoru Zavoda za vodoprivredu, Sarajevo na konstruktivnim savetima, pomoći i podršci koju sam dobio.

Najveću zahvalnost dugujem Bogu, svojoj porodici i prijateljima na strpljenju i razumevanju za vreme i energiju utrošenu tokom rada na doktorskoj disertaciji. Hvala za optimizam i podršku koju sam dobijao, a iz koje sam crpeo snagu da prevaziđem sve poteškoće na ovom putu.

Veljko Marinović

REGIONALNA KARAKTERIZACIJA KARSTNIH PODZEMNIH VODA DELA CENTRALNOG BALKANA U FUNKCIJI NJIHOVOG ODRŽIVOG KORIŠĆENJA I MENADŽMENTA

Sažetak

Karstne podzemne vode koristi oko 700 miliona ljudi na svetu, čime je njihov značaj za svetsko stanovništvo nemerljiv. U sklopu doktorske disertacije vršena su istraživanja i analize karstnih sistema dela centralnog Balkana (Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine), kako bi se evaluirao ovaj dragoceni resurs. Analize su vršene na primerima karstnih sistema vrela Perućac, Seljašnica, Mokra i Mlava (Srbija), Oko Bijele i Rijeka Crnojevića (Crna Gora) i vrelo Bosne (Bosna i Hercegovina), kao i na regionalnom nivou. Karakterizacija kvantiteta izvršena je primenom statističkih metoda, analizom recesionog perioda, baznog oticaja i vremenskih serija. Evaluacija kvaliteta vršena je na osnovu hemijskih analiza. Ocena pritiska na kvantitet izvršena je na osnovu odnosa bilansa i trenutne eksploatacije podzemnih voda, dok je ocena pritiska na kvalitet izvršena na osnovu karata ranjivosti, hazarda i rizika.

Rezultati karakterizacije i ocene pritiska su pokazali da su podzemne karstne vode dela centralnog Balkana odličnog prirodnog kvaliteta i da ovi tereni mogu akumulirati značajne količine vode. Odabrani karstni sistemi pokazali su da se mogu smatrati reprezentima regionalnih hidrogeoloških karakteristika. Primenjene metode karakterizacije predstavljaju vodič u uslovima postojanja dovoljnog obima podataka, odnosno za što precizniju determinaciju statusa podzemnih voda, prema Okvirnoj direktivi o vodama.

Stohastički i logistički regresioni modeli kreirani su u cilju predviđanja ekstremnih vrednosti kvaliteta i kvantiteta, tj. verovatnoće pojave kvantitativnih pritiska. Kako bi se ovi modeli maksimalno iskoristili, neophodno je postojanje guste monitoring mreže visoke frekvencije osmatranja. Na taj način će biti omogućeno pouzdano projektovanje i implementacija mera regulacije karstnih izdani u cilju održive eksploatacije.

Ključne reči: karstni sistem, podzemna voda, pritisci na kvantitet i kvalitet, menadžment podzemnih vodnih resursa

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hidrogeologija

UDK: 556.1/.3:551.435.85(043.3)

REGIONAL CHARACTERIZATION OF KARST GROUNDWATER OF THE CENTRAL BALKAN
PARTS IN THE FUNCTION OF THEIR SUSTAINABLE USE AND MANAGEMENT

Abstract

Karst groundwaters are used by about 700 million people in the world, which makes their importance for the world's population immeasurable. Within the doctoral dissertation, research and analysis of the karst systems of central Balkan parts (Serbia, Montenegro and the Sava River Basin of Bosnia and Herzegovina) were carried out, in order to evaluate this precious resource. Analyzes were performed on the examples of karst systems of Perućac, Seljašnica, Mokra and Mlava springs (Serbia), Oko Bijele and Rijeka Crnojevića (Montenegro) and Vrelo Bosne spring (Bosnia and Herzegovina), as well as at the regional level. The quantitative characterization was performed using statistical methods, recession, baseflow and time series analysis. Qualitative characterization was performed based on chemical analyses. The quantitative pressures were carried out based on the ratio between balance and current groundwater exploitation, while the assessment of qualitative pressures was carried out based on vulnerability, hazard and risk maps.

The results of the characterization and pressures assessment showed that the karst groundwater of the central Balkans is of excellent natural quality and that these terrains can accumulate significant volume of water. The selected karst systems showed that they can be considered representative of regional hydrogeological characteristics. The applied characterization methods can be a guide when high-resolution monitoring data exist, so the precise determination of the groundwater status, according to the Water Framework Directive, can be achieved.

Stochastic and logistic regression models were created in order to predict extreme values of groundwater quality and quantity, i.e. probabilities of occurrence of quantitative pressures. In order to make maximum use of these models, it is necessary to have a dense monitoring network with a high frequency of observation. In this way, it will be possible to reliably design and implement measures to regulate karst aquifers in accordance with the sustainable groundwater exploitation.

Key words: karst system, groundwater, quantitative and qualitative pressures, groundwater resources management

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Hydrogeology

UDC number: 556.1/.3:551.435.85(043.3)

SADRŽAJ

UVOD

1	CILJ I SVRHA IZRADE DOKTORSKE DISERTACIJE	4
2	KARST – TEORIJSKE POSTAVKE I TIPOVI	7
2.1	Područje istraživanja i njegov značaj.....	12
2.2	Nomenklatura i terminologija u hidrogeologiji karsta – analiza trenutnog stanja.....	15
2.3	Definicija karstnih hidrogeoloških sistema	21
3	MENADŽMENT VODNIH RESURSA I PLANOVI UPRAVLJANJA REČNIM SLIVOVIMA.....	25
3.1	Teorijski prikaz koncepta menadžmenta i održivog korišćenja vodnih resursa.....	25
3.2	Pravna regulativa u domenu menadžmenta vodnih resursa – Okvirna direktiva o vodama i prateći Vodiči.....	28
3.3	Evropska iskustva u primeni ODV	32
3.4	Neophodne podloge za menadžment vodnih resursa – mogućnosti i ograničenja	36
4	KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	39
4.1	Karakterizacija kvantitativne komponente režima karstnih podzemnih voda.....	40
4.1.1	Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema	40
4.1.2	Osnovna statistika vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda.....	44
4.1.3	Krive trajanja isticanja karstnih podzemnih voda	45
4.1.4	Recesiona analiza isticanja karstnih podzemnih voda.....	46
4.1.5	Analiza direktnog i baznog oticaja karstnih podzemnih voda	49
4.1.6	Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema	52
4.2	Karakterizacija kvaliteta karstnih podzemnih voda	59
4.3	Razvoj metodologije ocene pritisaka na karstne podzemne vode	61
4.3.1	Definicija pritisaka na podzemne vode	61
4.3.2	Formiranje metodologije ocene pritisaka na kvantitet karstnih podzemnih voda 63	
4.3.3	Formiranje metodologije ocene pritisaka na kvalitet karstnih podzemnih voda.	70
4.4	Teorijske postavke modeliranja karstnih podzemnih voda	78
4.4.1	Deterministički modeli – mogućnosti i ograničenja primene	79
4.4.2	Stohastički modeli – mogućnosti i ograničenja primene.....	81
4.4.3	Teorijske osnove logističke regresione analize	86
5	OSNOVNE KARAKTERISTIKE ŠIREG ISTRAŽNOG TERENA I ODABRANIH PILOT PODRUČJA 89	
5.1	Osnovne fizičko-geografske karakteristike dela centralnog Balkana	89
5.2	Rasprostranjenje karsta na prostoru dela centralnog Balkana	90
6	KONCEPTUALIZACIJA I KARAKTERIZACIJA ODABRANIH KARSTNIH SISTEMA	94
6.1	Karstni hidrogeološki sistem vrela Perućac.....	94
6.1.1	Fizičko-geografske karakteristike	94

6.1.2	Klimatske karakteristike	95
6.1.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	97
6.1.4	Geomorfološke karakteristike	97
6.1.5	Geološke karakteristike.....	98
6.1.6	Hidrogeološke karakteristike.....	100
6.1.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Perućac.....	101
6.1.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac	116
6.2	Karstni hidrogeološki sistem vrela Seljašnica.....	118
6.2.1	Fizičko-geografske karakteristike	118
6.2.2	Klimatske karakteristike.....	119
6.2.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	121
6.2.4	Geomorfološke karakteristike	121
6.2.5	Geološke karakteristike.....	122
6.2.6	Hidrogeološke karakteristike.....	123
6.2.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Seljašnica.....	124
6.2.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice ...	140
6.3	Karstni hidrogeološki sistem vrela Mokra.....	142
6.3.1	Fizičko-geografske karakteristike	142
6.3.2	Klimatske karakteristike.....	143
6.3.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	145
6.3.4	Geomorfološke karakteristike	146
6.3.5	Geološke karakteristike.....	147
6.3.6	Hidrogeološke karakteristike.....	147
6.3.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Mokra.....	149
6.3.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokra	166
6.4	Karstni hidrogeološki sistem vrela Mlave.....	168
6.4.1	Fizičko-geografske karakteristike	168
6.4.2	Klimatske karakteristike.....	169
6.4.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	172
6.4.4	Geomorfološke karakteristike	173
6.4.5	Geološke karakteristike.....	173
6.4.6	Hidrogeološke karakteristike.....	174
6.4.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Mlave.....	176
6.4.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Mlave	192
6.5	Karstni hidrogeološki sistem vrela Oko Bijele	193
6.5.1	Fizičko-geografske karakteristike	194
6.5.2	Klimatske karakteristike.....	195

6.5.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	197
6.5.4	Geomorfološke karakteristike	198
6.5.5	Geološke karakteristike.....	199
6.5.6	Hidrogeološke karakteristike.....	200
6.5.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Oko Bijele	202
6.5.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Oko Bijele...	219
6.6	Karstni hidrogeološki sistem vrela Rijeke Crnojevića.....	221
6.6.1	Fizičko-geografske karakteristike	221
6.6.2	Klimatske karakteristike.....	222
6.6.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	224
6.6.4	Geomorfološke karakteristike	225
6.6.5	Geološke karakteristike.....	227
6.6.6	Hidrogeološke karakteristike.....	228
6.6.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića	230
6.6.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića.....	249
6.7	Karstni hidrogeološki sistem vrela Bosne	251
6.7.1	Fizičko-geografske karakteristike	251
6.7.2	Klimatske karakteristike.....	252
6.7.3	Hidrološke i hidrografske karakteristike	254
6.7.4	Geomorfološke karakteristike	255
6.7.5	Geološke karakteristike.....	256
6.7.6	Hidrogeološke karakteristike.....	257
6.7.7	Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Bosne	259
6.7.8	Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne.....	274
7	PRIMENA METODOLOGIJE OCENE PRITISAKA NA KARSTNE PODZEMNE VODE	277
7.1	Ocena kvantitativnih pritisaka na karstne podzemne vode odabranih karstnih sistema 277	
7.2	Ocena kvalitativnih pritisaka na karstne podzemne vode odabranih karstnih sistema 283	
8	FORMIRANJE I PRIMENA STOHAŠTIČKOG I REGRESIONOG MODELA KARSTNIH PODZEMNIH VODA U FUNKCIJI VERFIKACIJE METODOLOGIJE OCENE PRITISAKA.....	294
8.1	Aplikacija stohastičkog modeliranja na odabranim područjima	294
8.1.1	Stohastički model kvantiteta podzemnih voda na primeru vrela Bosne	294
8.1.2	Stohastički model kvantiteta podzemnih voda na primeru vrela Rijeke Crnojevića i transfer rezultata na neizučene terene.....	297
8.1.3	Stohastički model kvaliteta podzemnih voda na primeru vrela Mokra.....	300
8.2	Aplikacija logističke regresione analize na odabranim područjima.....	304
8.2.1	Odabir i rezultati primene metode logističke regresione analize.....	304

9	RAZVOJ UPRAVLJAČKOG MODELA ZA ODRŽIVO KORIŠĆENJE KARSTNIH PODZEMNIH VODA.....	315
9.1	Ekonomski i vodoprivredni aspekt održivog korišćenja karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana	315
9.2	Bilans i potencijal karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana.....	321
9.3	Projekcija razvoja monitoring mreže karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana.....	324
9.3.1	Definicija monitoringa karstnih podzemnih voda – vrste i tipovi	324
9.3.2	Prostorni i vremenski aspekt monitoringa karstnih podzemnih voda.....	325
9.3.3	Način merenja i uzorkovanja karstnih podzemnih voda.....	329
9.3.4	Aktuelna monitoring mreža karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana 332	
9.3.5	Predlog monitoring mreže karstnih podzemnih voda u Srbiji, Crnoj Gori i Savskom slivu Bosne i Hercegovine	334
9.4	Ekosistemi i zaštićena područja zavisna od karstnih podzemnih voda – definicija, mogućnosti, potrebe i ograničenja	338
9.5	Predlog programa mera za održivo korišćenje karstnih podzemnih voda.....	342
10	OCENA PRIMENJIVOSTI I OGRANIČENJA KORIŠĆENIH METODA.....	345
11	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	349
12	LITERATURA.....	355
13	PRILOZI.....	I

UVOD

Voda, kao osnovni konstituent živih organizama predstavlja najvažniju supstancu koja omogućava čitav život na planeti Zemlji. Tu činjenicu potvrđuje i procentualno učešće vode u ljudskom organizmu, koje je približno isto kao i procenat sveukupne vode na površini Zemlje – oko 70%. Stoga, obezbeđivanje dovoljnih količina vode za vodosnabdevanje i navodnjavanje obradivih površina, industriju i zavisne ekosisteme, predstavlja jedan od najznačajnijih zadataka koji se postavljaju pred savremeno društvo. Taj zadatak postaje kompleksniji ukoliko se uzmu u obzir faktori koji otežavaju korišćenje podzemnih vodnih resursa – neravnomerna prostorna i vremenska distribucija podzemnih voda, njihova „skrivenost“ ispod površine zemlje, značajna izloženost zagađenju sa površine terena (tj. značajna prirodna ranjivost), podložnost uticaju klimatskih promena i dr.

Pomenutih 70% zemljine površine pod ukupnim svetskim vodnim resursima iznosi oko $138.6 \times 10^7 \text{ km}^3$ ekvivalentne zapremine¹. Međutim, ova zapremina vode uključuje vodu u tečnom i čvrstom agregatnom stanju, te se ne može *a priori* smatrati kao iskoristivi potencijal. Prema unutrašnjoj raspodeli svetskih vodnih resursa prema tipu voda, od navedene zapremine ukupnih vodnih resursa, 97% čine okeani i mora (tzv. slane vode), dok ostatak od 3% čine „slatke“ vode. U tih 3% sadržane su vode u čvrstom stanju, odnosno one zarobljene u lednicima (68.7%), podzemne vode (30.1%) i celokupne površinske vode (reke, jezera, bare, močvare itd.) koje čine svega 1.2% slatkih voda (Gleick, 1996). Ukoliko se ovi procenti izraze kao zapremina vode, može se preračunati da ukupne svetske rezerve podzemnih voda iznose $12.52 \times 10^6 \text{ km}^3$ (ili 0.9% sveukupnih vodnih resursa na planeti), dok ukupne svetske rezerve površinskih voda iznose $0.49 \times 10^6 \text{ km}^3$ (ili 0.036% sveukupnih vodnih resursa na planeti). Samo ovaj podatak govori o značaju podzemnih voda i pažnji koja im se mora posvetiti.

Prema najnovijim podacima Ujedinjenih nacija, skoro 50% svetske populacije zavisi od podzemnih voda, bilo da ih koriste direktno za piće, bilo da ih koriste za potrebe industrije ili poljoprivrede (UN WWDR, 2022). Ukupna količina podzemnih voda koja je eksploatisana u 2017. godini za potrebe svetskog stanovništva iznosila je $959 \text{ km}^3/\text{god}$, što je oko 25% ukupno iskorišćenih voda u toj godini (uključujući i površinske). Od te zapremine vode, $664 \text{ km}^3/\text{god}$ (ili 69%) je iskorišćeno za potrebe poljoprivrednog sektora, $211 \text{ km}^3/\text{god}$ (ili 22%) za domaćinstvo (vodosnabdevanje stanovništva, pre svega), dok $84 \text{ km}^3/\text{god}$ (ili 9%) je iskorišćeno za industriju (Miletto et al. 2022).

Značajan udeo podzemnih vodnih resursa u vodosnabdevanju stanovništva prisutan je i u zemljama centralnog Balkana. Procenjuje se da u celokupnom vodosnabdevanju pijaćom vodom stanovništva Srbije, podzemne vode učestvuju sa oko 75% (Stevanović & Dokmanović, 2015), udeo podzemnih voda u vodosnabdevanju stanovništva Crne Gore iznosi oko 90% (Stevanović, 2010a; Radulović M. et al. 2016), dok podzemne vode u Bosni i Hercegovini čine 89% ukupnog vodosnabdevanja (Hadžić & Imamović, 2020). Eksploataбилnost podzemnih voda i na globalnom i na lokalnom nivou, zavisi od količine i dostupnosti raspoloživih rezervi podzemnih voda. Pored intergranularnih izdani, na svetskom nivou najveći značaj i rasprostranjenje imaju podzemne vode akumulirane u karstnim terenima. Procenjuje se da karstni tereni pokrivaju oko $19.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ (ili oko 15.2% svetskog kopna, bez lednika (Goldscheider et al. 2020)), a da oko 678 miliona ljudi (ili 9.2% svetske populacije) koristi karstne podzemne vode za piće (Stevanović, 2019). Ukupne eksploatisane količine karstnih podzemnih voda na svetskom nivou, Stevanović (2019) procenjuje na $127 \text{ km}^3/\text{god}$, što čini oko 13% ukupno eksploatisanih podzemnih voda u svetu tokom jedne kalendarske godine, te

¹ <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth>, posećeno 9.5.2022. godine

na taj način karstne vode doprinos dinamičkim rezervama podzemnih voda u svetu (engl. *dynamic flux*) sa 26%, što je dva puta više od njihovog učešća u stenskim kompleksima i akviferima (15.2%).

Karst kao geološki medijum ima veliki značaj na prostoru zemalja dela centralnog Balkana, odnosno Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine, koje su i odabrane kao šire područje istraživanja doktorske disertacije. Otvoreni karstni tereni imaju bitno rasprostranjenje na prostoru Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine, zauzimajući 17,9% (Srbija), 80,1% (Crna Gora) i 60,5% (Bosna i Hercegovina) teritorije (Chen et al. 2017) i pokrivajući oblast Dinarskog karsta, odnosno karsta Karpato – balkanida na istoku Srbije. Dinarski karst prepoznat je u svetu kao klasični primer karsta (engl. *classical karst area*), ali i „poligon“ na kome je Jovan Cvijić izučio i utemeljio nauku o karstu. Sa druge strane, srpski deo karsta Karpato – balkanida predstavlja deo velikog pojasa koji se proteže od Slovačke, Rumunije preko Srbije do Bugarske. Imajući u vidu značajno rasprostranjenje karstnih terena na području Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine, kao i obično dobru skaršćenost ovih sedimenata, može se zaključiti da karstni tereni sadrže velike količine podzemnih voda. Stoga, učešće podzemnih voda iz karsta u ukupnom vodosnabdevanju stanovništva navedenih zemalja je veliko, a činjenica da se veliki broj gradova Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine snabdeva vodom sa snažnih karstnih vrela potvrđuje njihov značaj u zemljama regiona, čime se ističe neophodnost adekvatnog upravljanja ovim vodama na bazi planova upravljanja, koji će posebno uzimati u obzir specifičnosti karstnih terena.

Upravljanje podzemnim vodama predstavlja proces svakodnevnog odlučivanja i kontrole eksploatacije i kvaliteta podzemnih voda, kao i prepoznavanje uticaja eksploatacije na zavisne ekosisteme, površinske vode i životnu sredinu (Simmons et al. 2022). Kompleksan proces menadžmenta podzemnih voda uključuje multidisciplinarni pristup pri odlučivanju o količinama vode koje se smeju koristiti. Simmons et al. (2022) navode da je ključni segment uspešnog upravljanja podzemnim vodnim resursima predviđanje eventualnih negativnih efekata eksploatacije na životnu sredinu i preventivno delovanje na njih. Pomenute definicije uključuju i ciljeve održivog razvoja vodnih resursa, što je posebno važno budući da su Ujedinjene Nacije (UN) proglasile 21. vek – vekom vode, odnosno da je ova svetska institucija prepoznala vodu kao strateški resurs broj 1 u budućnosti. Iz tih razloga, ova organizacija je postavila ključne ciljeve održivog razvoja planete (engl. *Sustainable Development Goals – SDG*) kojih ima ukupno 17, među kojima je za vodne resurse najznačajniji SDG br 6. *Clean Water and Sanitation*. Za uspešno upravljanje podzemnim vodama neophodno je prvo upoznati resurs, kako bi se mogle sagledati kvantitativne i kvalitativne mogućnosti karstnih podzemnih voda sa aspekta eksploatacije. Karakterizacija podzemnih voda, tj. definisanje njihovih osnovnih i specifičnih osobina sa aspekta kvantiteta i kvaliteta, podrazumeva neophodni i inicijalni korak pri uspostavljanju koncepta njihovog menadžmenta. Takođe, definisanje kvantitativnih i kvalitativnih pritisaka na karstne podzemne vode opredeljuje mere koje treba preduzimati kako bi njihov status održao ili poboljšao.

Prethodno navedene činjenice formirale su osnovnu ideju i koncept istraživanja za potrebe doktorske disertacije. Na osnovu predloga i konsultacija sa mentorom, dr Zoranom Stevanovićem, red. prof., opredelio sam se za hidrogeološka istraživanja karstnih terena dela centralnog Balkana, kako bi se izvršila njihova karakterizacija, uspostavila i primenila metodologija ocene pritisaka i dao predlog koncepta upravljanja, uz primenu i ekstrapolaciju dobijenih rezultata na neizučena područja, koristeći regresione jednačine. Tema doktorske disertacije „*Regionalna karakterizacija karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana u funkciji njihovog održivog korišćenja i menadžmenta*“ formirana je kao rezultat Projekta doktorske disertacije i njegove odbrane pred komisijom, koju je formirala Katedra za

hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, odnosno u skladu sa pozitivnim mišljenjem navedene komisije, Nastavno-naučnog veća Katedre za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta i Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

1 CILJ I SVRHA IZRADE DOKTORSKE DISERTACIJE

Cilj izrade doktorske disertacije je regionalna karakterizacija podzemnih voda karstnih terena dela centralnog Balkana, ocena kvalitativnih i kvantitativnih pritisaka na podzemne vode u karstu pojedinih vodnih tela i predlog upravljanja podzemnim vodnim resursima ovog područja, kao i ekstrapolacija rezultata kvantitativnih pritisaka koji se mogu očekivati na manje izučanim terenima.

Opšti cilj doktorske disertacije podrazumeva karakterizaciju karstnih podzemnih voda i definisanje koncepta, razvoj i primena metodologije ocene pritisaka na kvantitet i kvalitet karstnih vodnih resursa kao podloge za izradu planova upravljanja rečnim slivovima, posebno u uslovima nedovoljnog poznavanja njihovog režima i načina funkcionisanja. Drugim rečima, opšti cilj bi podrazumevao testiranje predložene metodologije na izučanim područjima i njenu aplikaciju na nekim odabranim, karakterističnim i neizučanim karstnim terenima šireg područja, kako bi se pored ocene regionalnih karakteristika karstnih podzemnih voda i distribuciji kvalitativnih i kvantitativnih pritisaka na podzemne vode karstnih terena Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine mogao izvući zaključak i o mogućnosti poboljšanja metodologije ocene pritiska kada postoji dovoljan obim podataka režima karstnih izdani koje su predmet analize.

Osim opšteg, **posebni ciljevi** doktorske disertacije obuhvataju:

- Karakterizaciju reprezentativnih karstnih sistema, tj. kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika karstnih podzemnih voda odabranih područja na osnovu površine slivnog područja, veličine isticanja podzemnih voda, kao i određivanja padavina kao ulaznog parametra, pomoću vremenskih serija prikupljenih sa pripadajućih klimatskih stanica;
- Razvoj, primena i testiranje metodologije ocene pritisaka na kvalitet i kvantitet karstnih podzemnih voda na odabranim područjima;
- Analizu i definisanje parametara bilansne jednačine koji najviše utiču na formiranje kvantitativnog pritiska na karstne podzemne vode i ekstrapolacija rezultata pritisaka svakog odabranog sistema na manje izučena područja u okolini;
- Razvoj stohastičkih modela za ocenu stanja karstnih vodnih resursa i prognozu njihovog ponašanja i održivih proticaja na simulirane uslove (eksploatacija, klimatske promene i sl.), uključujući i aktuelne i potencijalne pritiske;
- Predlog koncepta upravljanja karstnim podzemnim vodnim resursima šireg područja istraživanja.

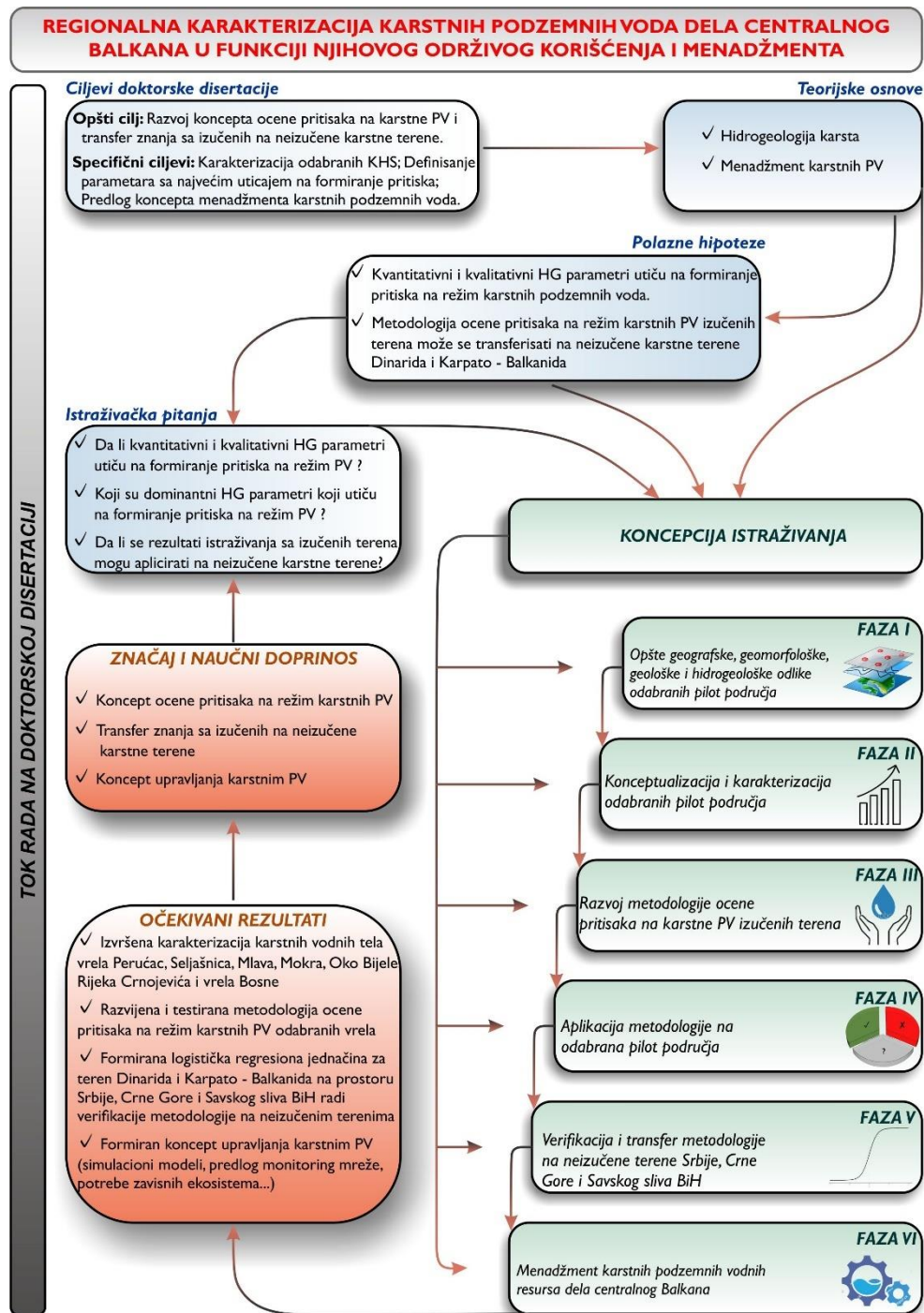
Navedeni opšti i posebni ciljevi izrade doktorske disertacije treba da doprinesu sveukupnoj evaluaciji režima, karakteristika, pritisaka i prognoze ponašanja karstnih podzemnih voda, što treba da predstavlja neizostavnu komponentu planova upravljanja rečnim slivovima. Takođe, u cilju provere funkcionalnosti metodologije, ista je primenjena na karakterističnom, odabranom delu terena na području centralnog Balkana (Skadarski basen), a moguće je na bazi stečenih iskustava proširiti ove analize i na druge terene koji sadrže značajan procenat karbonatnih stena (Srbija, Crna Gora i Savski sliv Bosne i Hercegovine).

Metodologija istraživanja i analize podzemnih vodnih resursa u cilju definisanja podloga za kreiranje planova upravljanja rečnim slivovima mora biti prilagođena regionalnom nivou posmatranja. S obzirom na čest slučaj nedostatka preciznih ulaznih podataka koji pokrivaju regionalne prostore, karakterizacija karstnih podzemnih voda i ocena pritisaka na njihov režim konceptualizovana je i testirana na odabranim karstnim područjima Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine koja dreniraju vrela Perućac, Seljašnica, Mlava i Mokra u Srbiji, Oko Bijele i Rijeka Crnojevića u Crnoj Gori i vrelo Bosne u Savskom slivu Bosne i Hercegovine. Ova

područja i njihovi karstni izvori raspolagali su sa dovoljnim obimom potrebnih podataka koji su svedeni na isti referentni nivo (sa jednim izuzetkom, 6 godina dnevnih podataka izdašnosti i povremenih analiza kvaliteta vode). Ovo je učinjeno radi prikaza kako se, kada se podacima raspoložbe može popraviti ocena stanja podzemnih vodnih resursa i njihove potencijalnosti, ali i ocene aktuelnih pritisaka na njihov kvantitet i kvalitet. Koncept ove metodologije na bazira na preporučujućoj primeni u izradi Planova upravljanja vodnim resursima na slivovima, koja se mora prilagođavati regionalnom nivou, već na formiranju podloga za buduća tehnička rešenja korišćenja i zaštite podzemnih voda odabranih karstnih izdani. Rezultati dobijeni analizama odabranih sedam vrelna mogli bi se ekstrapolirati na druga karstna područja ovih prostora, koja oskudevaju u pouzdanim ulaznim podacima za slične analize.

Ovakav pristup podrazumevao je fazni koncept istraživanja, tako da su faze obuhvatile definisanje osnovnih fizičko – geografskih osobina dela centralnog Balkana i odabranih područja (Faza I), konceptualizaciju i karakterizaciju vodnih tela karstnih podzemnih voda na kojima će se testirati metodologija (Faza II), razvoj i primenu koncepta definisanja kvalitativnih i kvantitativnih pritisaka karstnih podzemnih voda (Faze III i IV) i verifikaciju primenjene metodologije (Faza V), kao i predlog menadžmenta podzemnih vodnih resursa karstnih terena (Faza VI). Poslednja faza je takođe podrazumevala predlog monitoringa podzemnih voda i programa mera koji će biti prilagođeni regionalnom nivou posmatranja.

Konceptualni model toka rada i istraživanja u okviru doktorske disertacije dat je na slici 1.1.



Sl. 1.1. Konceptualni model toka istraživanja u okviru doktorske disertacije

2 KARST – TEORIJSKE POSTAVKE I TIPOVI

Termin *karst* je nastao germanizacijom slovenske reči *kras* ili *kar*, odnosno *carso* (italijanski) koje imaju zajedničko značenje – *stena*. Taj termin se odnosio na prostor između današnje Slovenije i Italije u blizini Trsta, koji predstavlja praktično *locus typicus* karsta kao geološke formacije (Cvijić, 1893; Kresic, 2013; LaMoreaux & Stevanović, 2015). Baš od tog područja ka jugu, duž istočne obale Jadranskog mora ka unutrašnjosti nalazi se prostor Dinarida, na kome su locirani svi makro- i mikrooblici karstnih terena i koji je bio poligon za izučavanje nauke o karstu mnogim generacijama naučnika, počevši od oca i utemeljivača karstologije Jovana Cvijića.

Povezanost karsta i ljudske civilizacije datira praktično od samog početka evolucije čoveka. Prva staništa čoveka bila su smeštena u karstnim oblicima – pećinama i potkapinama, gde su do današnjih dana sačuvani tragovi razvoja i evolucije neandertalaca i *homo sapiens*-a (LaMoreaux & Stevanović, 2015). Mnogi gradovi su podizani upravo u blizini snažnih karstnih vrela, koja su kaptirana u cilju obezbeđivanja pijaće vode stanovništvu. Takvi primeri datiraju još iz drevnog Egipta, Grčke, Rima, Kine i arapskog sveta (LaMoreaux, 1991; LaMoreaux & LaMoreaux, 2007; Ford & Williams, 2007; Stevanović, 2010b; Kresic, 2013; LaMoreaux & Stevanović, 2015). Sa druge strane, osim interesovanja čoveka za podzemne vodne resurse, uslovi pojavljivanja i cirkulacija podzemnih voda i sva misterija koja se oko njih javljala, bila je predmet proučavanja mnogih grčkih i rimskih filozofa još od drevnih vremena (LaMoreaux & LaMoreaux, 2007; Kresic, 2013). Tako, interesovanje za karst ni danas ne jenjava. Naprotiv, usled sve većih potreba za vodom savremenog čoveka, proučavanje i interesovanje stručnjaka za karstne terene dobijaju značajniju ulogu, imajući u vidu da karst može akumulirati velike količine voda izuzetnog kvaliteta.

Na osnovu duge istorije korišćenja karstnih podzemnih voda na svim strana sveta, može se zaključiti da se karstni tereni prostiru u svim delovima planete. Goldscheider et al. (2020) procenjuju da oko 15.2% svih sedimentnih stena na svetu čine upravo karstne (karbonatne i evaporitske) stene, u otvorenim ili poluzatvorenim strukturama. Ovaj tip stene nastajao je u geološkoj istoriji počevši od kambrijuma, pa sve do današnjih dana. Drugim rečima, proces taloženja i sedimentacije aktuelan je i u savremenim uslovima. Poreklo karbonatnih ili evaporitskih stena, vezano je uglavnom za plitke, tropske depozicione morske sredine (neritski areal), uravnoteženog saliniteta i dobre osvetljenosti, u kojima se vrši taloženje kalcijum karbonata ili evaporita (anhidrit, gips, soli), da bi se tokom dužeg perioda sedimentacije formirale naslage rastvorljivih stena. Milovanović (2015) navodi da krečnjaci mogu nastati i u dubljim marinskim uslovima, zatim u jezerskim uslovima, ali i na površini terena u vidu travertina, odnosno bigra.

Za procese rastvaranja i deformacija karbonatnih i evaporitskih sedimentnih kompleksa neophodni agens je voda. Voda može uticati dvojako na rastvorljive stene – putem mehaničke ili hemijske erozije, s tim da ova dva procesa nisu međusobno isključiva, već praktično deluju združeno. Voda u okviru mehaničke erozije koristi prostore malih prslina i pukotina, koje se tokom geološkog perioda proširuju pomoću osipanja i trenja erodovanog materijala o matičnu stenu, stvarajući velike karstne kanale i kaverne, tj. sekundarnu poroznost sedimenata. Sa druge strane, hemijska erozija karbonatnih stena (korozija) podrazumeva rastvaranje karbonata uz pomoć vode i rastvorenih gasova (CO₂) sa kojima čine agresivnu ugljenu kiselinu, čime se takođe omogućava stvaranje i dalje širenje karstnih pukotina i kanala. Rastvorljivost karstnih sedimenata varira u zavisnosti od kompozitnog sastava minerala u samoj steni, pa tako Freeze & Cherry (1979) i Stevanović (2015a) navode da halit predstavlja najrastvorljiviju, dok je mermer najmanje rastvorljiva stena iz grupe stena podložnih karstifikaciji. Između ove dve

karstne stene redom se od veće ka manjoj rastvorljivosti nalaze gips, anhidrit, krečnjaci i dolomiti.

Karbonatni sedimenti (krečnjaci i dolomiti) su izrazito dominantni na prostoru karsta Dinarida i Karpato – balkanida, dakle u zemljama centralnog Balkana. Stoga, na ovom mestu treba napomenuti da se korišćenje termina *karst* u čitavoj doktorskoj disertaciji odnosi isključivo na krečnjačke i dolomitske sedimentne stene, imajući u vidu njihovo rasprostranjenje na istražnom području, gde odsustvuju drugi karbonatni sedimenti (evaporiti, gips i anhidriti).

Hemijski sastav krečnjaka određen je mineralima koji se nalaze u njegovom mineraloškom sastavu. Krečnjak je sastavljen od minerala kalcita (CaCO_3). U procesu nastanka krečnjaka u marinskim uslovima veliku ulogu ima ugljen dioksid u procesu formiranja ugljene kiseline, izdvajanju oksida ugljenika CO_2 i formiranju kalcijum karbonata uz dodatak jona kalcijuma. Glavni faktori formiranja kalcijum karbonata iz morske vode su (Krešić, 1988; Ristić, 2007):

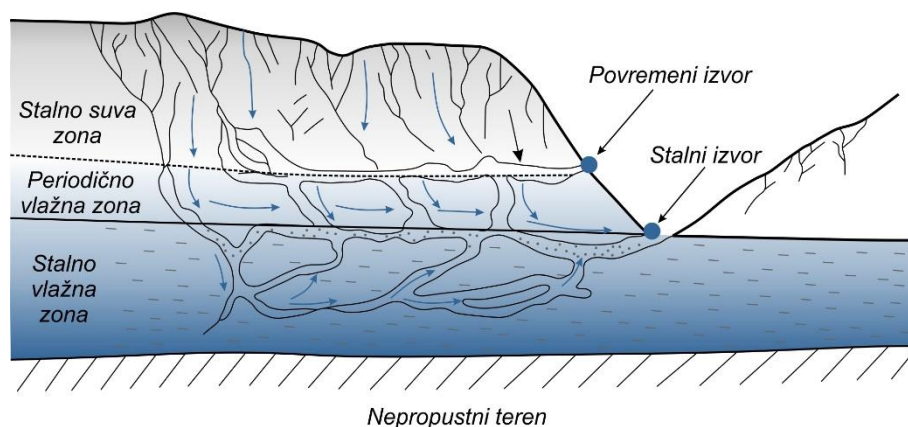
- Hemijski faktori: izdvajanje CaCO_3 iz rastvorenog bikarbonata $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$;
- Isparavanje, kada dolazi do povećanja saliniteta, a samim tim do gubitka CO_2 ;
- Izdvajanje ugljendioksida iz morske vode normalnim životnim procesima biljaka;
- Dejstvo bakterija.

Nakon formiranja karbonatnih sedimenata u morskim sredinama, regresijom mora i okeana, nataložene karstne sedimentne stene ostaju na površini terena, bivaju izložene orogenim i epirogenim pokretima, i deformacijama čime otpočinje proces karstifikacije, koji Milanović P. (1979) definiše kao kompleks geoloških procesa koji razaraju rastvorljive stene, formirajući na površini specifičnu morfologiju, a u podzemlju specifičan tip kavernozone poroznosti, odnosno specifične hidrogeološke uslove (nehomogenost i anizotropnost).

Postoji nekoliko teorija o evoluciji i dinamici karstnog procesa, među kojima se ističe kao široko prihvaćena teorija koju je podržavao i Cvijić (1918), da karstni proces počinje izdizanjem karbonatnog kopna iz mora, čime ono postaje podložno uticaju površinskih voda. Karbonatni teren koje je izdignut veoma malo je ispresecan pukotinama, tako da se u kontaktu sa vodom praktično ponaša kao nerastvorljiva stenska masa, te primarni proces koji deluje je zapravo fluvijalni, pri kome se voda zadržava u pripovršinskim delovima terena. To je, prema Cvijićevom (1918) mišljenju – *stalno vlažna zona* (Sl. 2.1). Tokom dominantnog delovanja fluvijalnog procesa, na površini terena se ne zapažaju, ili se formiraju samo mikro-karstni morfološki oblici (škrape, muzge, kamenice). Hemijska erozija, iako spora, tokom vremena sve više deluje na karbonatne stene, proširujući prsline i pukotine, čime se sve veća količina vode infiltrira u podzemlje. Time stalno vlažna zona postaje *periodično vlažna* (Sl. 2.1), dok se stalno vlažna spušta na nivo koji je hipsometrijski niži. Ovim počinje druga faza evolucije kada karstni proces uzima primat od fluvijalnog. Nakon toga, dolazi do poniranja sve veće količine vode, zatim do stvaranja većih ponora, suvih i slepih dolina, a stalno vlažna i periodična zona se spuštaju na još veće dubine. Iznad njih, u pripovršinskim delovima terena javlja se *stalno suva zona* (Sl. 2.1) koja označava apsolutnu dominaciju karstnog geomorfološkog procesa (Pavlović et al. 2003). Na kraju, stalno vlažna i periodična zona bi se tokom vremena sve više spuštala, praktično do nekarbonatne podloge koja bi predstavljala bazu karstifikacije. Ovim bi se teorijski stalno suva zona samo povećavala. Na taj način je definisana hijerarhija karstnih pukotina i kanala, tj. činjenica da njihov položaj i dimenzije nisu slučajnog karaktera, već su u funkciji evolucije karstne izdani.

Proces karstifikacije stenskih masa počinje dejstvom vode (atmosferskog ili porekla od površinskih voda) i ugljene kiseline na karbonate. Ovim procesom se sedimentne stene rastvaraju do osnovnih minerala koje voda odnosi predisponiranim putevima (prsline, pukotine ili karstni kanali). Hemijska erozija uslovljava kasniju mehaničku eroziju koja nastaje

proširivanjem karstnih kanala i prelaskom tečenja vode (zajedno sa kalcitom) iz laminarnog u turbulentni režim. Nakon toga, proces mehaničke erozije još više povećava poroznost unutrašnjih delova krečnjaka, čime se samo intenzivira proces karstifikacije i spuštanja njegove baze na hipsometrijski niže nivoe i usaglašavanja sa erozionim bazisom (Stevanović, 1991).



Sl. 2.1. Tri hidrografske zone u karstu (Cvijić, 1918, iz: Stevanović, 1997)

Početak i tok karstnog procesa, tj. početak i intenzitet hemijskog i mehaničkog dejstva vode i ugljene kiseline na karbonate zavisi od tektonskih pokreta i klimatskih promena (regionalni faktori) i promene litološkog sastava (lokalni faktor) (Pavlović et al. 2003). U okviru tektonskih pokreta bitnu ulogu imaju pukotine koje omogućavaju cirkulaciju vode, odnosno rastvaranje karbonata. Posebno su značajne tenzione pukotine koje nastaju dejstvom smičućih sila. Na taj način se stvaraju međuslojne (*dijastrome*) i pukotine koje presecaju slojeve (*dijaklaze*) koje se međusobno obično prožimaju gradeći mrežu karstnih pukotina (Milanović P. 1979). Pored ovih, svoju ulogu imaju i ekstenzione (*relaksacione*) pukotine koje se stvaraju nakon dejstva kompresionog stresa, kada stenska masa pokušava da se "vrati" u prvobitni položaj. Time se ističe elastično svojstvo karstnih stena, koje su obično krte, pa samim tim dolazi do intenzivnijeg stvaranja pukotina relaksacije.

Sa druge strane, temperatura predstavlja značajan faktor koji utiče na proces karstifikacije. Ovaj proces je intenzivniji u hladnim klimatima sa obilnijim snežnim padavinama, nego što je slučaj sa toplim. Milanović P. (1979) navodi eksperimente Castany-a (1968) koji je dokazao da 1l vode temperature 0 °C rastvara 4 do 5 puta više krečnjaka nego voda temperature 30°C, tj. 6 puta više nego voda temperature 40°C. Kada je reč o temperaturi, neophodno je pomenuti i klimatske promene koje svakako utiču na prirodu i životnu sredinu, a samim tim i na proces karstifikacije terena.

Kada je reč o vertikalnoj karstifikaciji, treba reći da je ona najintenzivnija u pripovršinskim delovima terena i da eksponencijalno opada sa dubinom. Takođe, jasno diferencirana granica između karstifikovanih i nekarstifikovanih stena praktično odsustvuje, već je to jedna prelazna zona ispod koje je mala verovatnoća pojave karstifikovanih stena. Takva zona se naziva *baza karstifikacije* ili *erozioni bazis*. U vezi sa procesom karstifikacije nalazi se i poroznost karstnih stena. Ona je *primarna*, kada je nastala istovremeno sa taloženjem sedimentnih stena u kojima će se odvijati karstni proces, odnosno *sekundarna* koja nastaje uticajem različitih faktora (pre svega erozija i tektonske deformacije), a nakon definisanja stenske mase. Stevanović (2015a) navodi i postojanje *tercijarne* poroznosti u pojedinim karstnim sistemima, koja je obično predstavljena kavernama velikih dimenzija. Sekundarna poroznost najčešće je dominantno razvijena u odnosu na primarnu, matričnu poroznost, imajući u vidu snažne tektonske pokrete kojima su stene bile izložene.

Karst se može razvrstati prema tipovima i podtipovima na osnovu određenih specifičnosti koje su zajedničke za određenu vrstu karstifikovanih stena, tj. prema faktorima karstifikacije, tipu litologije, morfološkim oblicima, genezi i klimatskim uslovima u kojima su formirane karstne stene (Stevanović, 2015b). Ipak, budući da parametri na osnovu kojih je izvršena diferencijacija tipova karsta nije egzaktno utvrđena, postoje podeljena mišljenja i sa ovog aspekta proučavanja karsta. Podela karstnih terena vršena je od strane različitih autora pre svega, u zavisnosti od područja njihovog istraživanja i naučnog problema koji su rešavali. Tako, jednu od prvih podela karsta daje Cvijić (1893), izdvajajući:

- *Holokarst*;
- *Merokarst*;
- *Prelazni tip* u zavisnosti od razvića i pokrivenosti (Sl. 2.2).

Holokarst predstavlja potpuno razvijeni karst sa odsustvom ili veoma malo vegetacije, na čijem je prostoru prisutno razviće svih površinskih i podzemnih karstnih oblika. Tipičan primer potpunog karsta je Dinarski karst na području Hrvatske, Crne Gore (Sl. 2.2) i Hercegovine. Drugi tip karsta prema Cvijiću (1893) je *merokarst* koji predstavlja nepotpuni, mešani tip karsta, sa vegetacijom (Sl. 2.2). Uobičajeno je da je karstni teren koji pripada ovom tipu prekriven određenim slojem obradivog zemljišta, kao i da sadrži nekarstne geomorfološke oblike, odnosno da je stepen karstifikacije niži nego kod holokarsta. *Prelazni tip* predstavlja tip karsta koji ima karakteristike i holokarsta i merokarsta. Obično je razvijen u krečnjačkim stenama koje su izolovane vodonepropusnim sedimentima, u kojima je podzemna morfologija dobro razvijena, dok površinska odsustvuje (nema karstnih polja) (Milanović P. 1979). Stevanović (2015b) navodi klasifikaciju Sweeting (1972), koja zapravo dopunjuje Cvijićevu podelu:

- *Holokarst*, odnosno potpuno razvijeni karst;
- *Fluviokarst*;
- *Glacijalno-nivalni*;
- *Tropski*;
- *(Polu)aridni* tip karsta.



Sl. 2.2. Škrabe kao primer holokarstnih terena Crne Gore (Goljemadi, u neposrednoj blizini Kaluđerovog oka i Malog Blata, Crna Gora) (levo); Sarmatski krečnjaci Šumadijske zone u blizini Guberevca kao primer merokarstnih terena (desno)

Gvozdeckiy (1981) navodi osnovnu podelu karstnih terena, na osnovu litoloških karakteristika terena, tj. u zavisnosti od dominantnog mineraloškog sastava karstnih stena:

- *Krečnjački* karst;
- *Dolomitski* karst;

- *Mermerni karst;*
- *Kredni i laporoviti karst;*
- *Gipsni i anhidritski karst;*
- *Slani (halitni) karst.*

Prema genetskom tipu, odnosno prema mehanizmu nastanka karstnih terena, Klimchouk et al. (2000) navode sledeću podelu:

- *Hipergeni karst*, koji nastaje gravitacionim dejstvom (infiltracijom) atmosfere vode (odozgo naniže);
- *Hipogeni karst*, koji nastaje dejstvom juvenilnih voda i gasova pod pritiskom (odozdo naviše).

Egzo- i *endogeni karst* bi po svojim karakteristikama bili slični hipergenom, odnosno hipogenom karstu. *Kriptokarst*, *pokriveni* (engl. *buried*), *paleokarst* i *fosilni karst* odnose se na karstne stene koje su pokrivene drugim, najčešće mlađim geološkim formacijama ili zemljištem određene debljine. Suprotno ovim terminima, *otkriveni* ili *goli karst* (engl. *bare karst*) predstavlja karstne stene koje su otvorene na površini terena i time direktno izložene uticaju atmosfernih i površinskih voda. Kako Stevanović (2015b) navodi, ovi termini obično se odnose i na krupne blokove sa vertikalnom karstifikacijom, ali uz odsustvo epikarsta. Herak et al. (1981) izdvajaju *barijerni karst*, koji se odnosi na izolovane karstne stene, ograničene nepropusnim geološkim formacijama, dok Ford & Williams (2007) navode i postojanje *pseudokarsta* u vidu karstnih stena čije morfološke forme liče na karst, ali su formirane uticajem drugih procesa.

Prema regionalnoj prostornoj distribuciji, tektonskim faktorima koji su izazvali karstifikaciju stena, kao i klimatskim uslovima, Stevanović (2015b) definiše sledeće tipove karstnih terena:

- *Geosinklinalni karbonatni karst;*
- *Platformni karbonatni karst;*
- *Tropski karst;*
- *Hipogeni i evaporitski karst; i*
- *Glacijalni karst.*

Geosinklinalni tip karsta je razvijen u predelima intenzivne tektonike (orogenih pokreta), kojom su izrazito ubrane i izrasedane stenske mase koje su prethodno nastale u prostranim depozicionim sredinama (geosinklinale), a zatim izdignute i izložene tektonici i karstifikaciji. Ovaj tip najčešće prati prisustvo jako rastvorljivih krečnjaka, gde se može očekivati maksimalni razvoj karstnog procesa. *Platformni tip* se odlikuje (sub)horizontalnim slojevima krečnjaka, te je karstifikacija otežana. Saglasno padu slojeva, reljef je zaravnjen, čime je definisano da je tektonska aktivnost u ovom tipu karsta slaba (Milanović, P. 1979). *Tropski karst* karakterističan je po izolovanim karstnim blokovima, koje su razdvojene dolinama. Ovaj specifični tip karsta javlja se na Jukatani, Jamajci i Karijskim ostrvima, Kini, Vijetnamu, Filipinima i dr. *Hipogeni i evaporitski karst* je karakterističan za (semi)aridna područja (Klimchouk et al. 2000; Stevanović, 2015b), dok je glacijalni karst formiran pod uticajem glacijalnih agenasa.

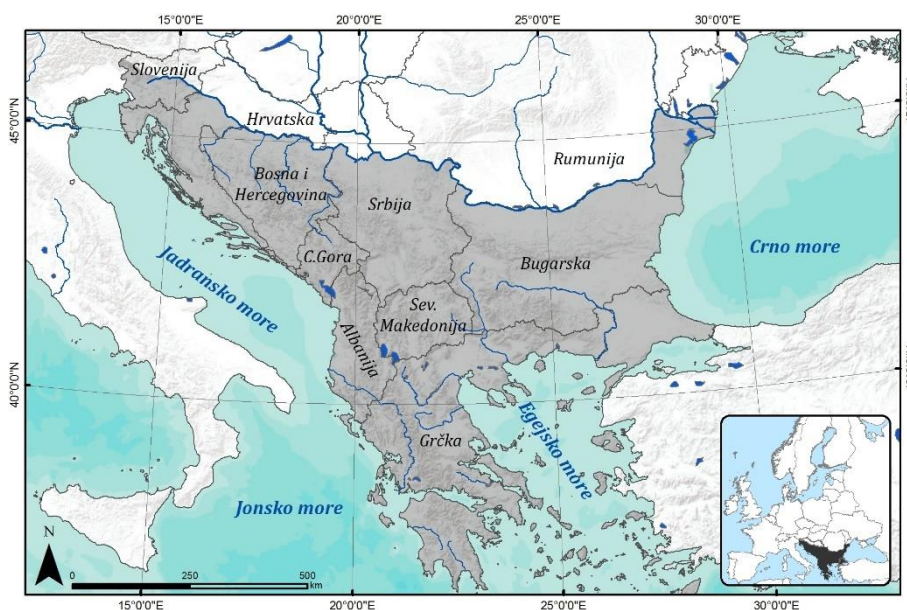
Milanović P. (1979) navodi i diferencijaciju karstnih terena prema dubini na *duboki* i *plitki karst*, odnosno prema odnosu karsta i nekarsta (vodonepropusne sredine) na *zagaćeni* i *otvoreni karst*. Isti autor razlikuje u primorskim oblastima *primorski* i *kontinentalni karst* sa svojim podtipovima, dok kineski autori razlikuju tri genetska tipa tropskog karsta: *korozioni*, *koroziono-erozioni* i *koroziono-strukturni tip karsta*.

Uzimajući u obzir sve navedene klasifikacije i tipove karstnih terena, može se steći utisak o kompleksnosti karsta kao geološke sredine i praktično odsustva mogućnosti o jednoj uniformnoj podeli karsta koja bi bila aplikativna na svim karstnim terenima u svetu.

2.1 Područje istraživanja i njegov značaj

Balkansko poluostrvo predstavlja geografsku regiju Evrope, koja obuhvata njen južni i jugoistočni deo. Prirodne granice Balkanskog poluostrva (Sl. 2.3) predstavljene su Jadranskim morem na zapadu, Jonskim i Mediteranskim morem na jugu, Egejskim morem na istoku, dok granica na severu predstavlja i dalje predmet diskusije brojnih istraživača. Cvijić (1924) smatra da severnu granicu Balkanskog poluostrva čine Dunav i Sava, dok idući na zapad granica se proteže Ljubljanskim basenom do reke Soče. Pomenuti autor ističe ovakvu granicu kao prirodnu, budući da Ljubljanski basen odvaja Alpske planine od planina Dinarskog sistema koje u celosti pripadaju Balkanskom poluostrvu. Sa druge strane, i sam Cvijić (1924) naglašava da ovakva severna granica poluostrva preseca određene etničke grupe na dva dela, koje su u prirodnom, kulturnom i nacionalnom pogledu potpuno homogene. Takva je situacija npr. u Panonskom basenu. Stoga, određeni autori za severnu granicu Balkanskog poluostrva smatraju državne granice zemalja čije teritorije pripadaju Balkanskom poluostrvu. Kako se sa sl. 2.3 može videti, države koje se cele ili jednim delom svoje teritorije nalaze na prostoru Balkanskog poluostrva su, idući od zapada prema istoku: Slovenija, Hrvatska, Bosna i Hercegovina, Crna Gora, Srbija, Albanija, Severna Makedonija, Grčka, Bugarska, Rumunija i Turska (evropski deo).

Geografska regija **Centralni Balkan** podrazumeva države koje se prostiru na središnjem delu poluostrva u celosti ili delom svoje teritorije. Delovi Srbije, Bosne i Hercegovine i Albanije, odnosno čitave teritorije Crne Gore i Severne Makedonije obuhvataju prostor Centralnog Balkana. Kao područje istraživanja za potrebe izrade doktorske disertacije, odabrane su teritorije Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine, koje pripadaju ovoj geografskoj regiji. Ovde bi trebalo napomenuti da su istraživanja izvršena na prostoru dela Centralnog Balkana u okviru **karstnih terena** odnosno da nisu razmatrani drugi tipovi izdani na ovom području.



Sl. 2.3. Prostor Balkanskog poluostrva (siva boja), oivičena prirodnim granicama, prema Cvijiću (1918). Karta kreirana na osnovu podataka EUROSTAT, 2016 i Esri, DeLorme, USGS, NPS

Važno je istaći da politička regionalizacija Balkanskog poluostrva ne prepoznaje termin „Centralni Balkan“, već uvodi novi pojam – **Zapadni Balkan**. Naime, regija Zapadnog Balkana je uspostavljena pre oko 10 godina, sa ciljem isticanja onih država Balkanskog poluostrva koje nisu članice EU, već su u pregovorima o članstvu, a delom i distanciranja dve postojeće članice Slovenije i Hrvatske koje iz političkih razloga nerado prihvataju da su deo ove geografske celine (od „zapadnog“ nema zapadnije). Tako, područje Zapadnog Balkana obuhvata prostor Srbije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Albanije i Severne Makedonije, dok Hrvatska od 1. jula 2013. godine, tj. pristupanja Uniji, više nije deo Zapadnog Balkana. Drugim rečima, termin Zapadni Balkan ima političku, a ne geografsku konotaciju, tako da regija Zapadnog Balkana podrazumeva zemlje bivše Jugoslavije (uz Albaniju) koje nisu u EU, a u procesu su ispunjenja uslova i kriterijuma za pristup Uniji u budućnosti.

Karstni tereni na prostoru Centralnog Balkana koji su analizirani u okviru doktorske disertacije obuhvataju Dinarski sistem i prostor Karpato-balkanida (Sl. 2.4). Dinaridi na prostoru dela Centralnog Balkana koji je razmatran u doktorskoj disertaciji obuhvataju prostor Crne Gore, Savskog sliva Bosne i Hercegovine, kao i zapadne i jugozapadne Srbije. U okviru pomenutih terena, izdvojeni su sledeći karstni sistemi koji su detaljno analizirani u sklopu istraživanja:

1. Unutrašnji Dinaridi zapadne Srbije:

- *Karstni hidrogeološki sistem vrela Seljašnice*
- *Karstni hidrogeološki sistem vrela Perućac*

2. Dinaridi Crne Gore:

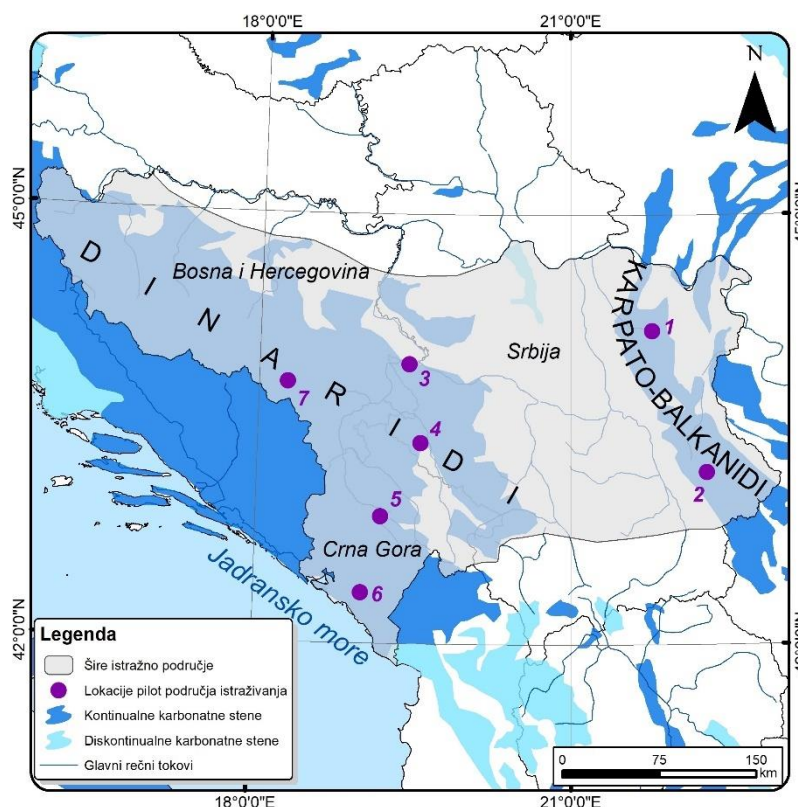
- *Karstni hidrogeološki sistem vrela Oko Bijele*
- *Karstni hidrogeološki sistem vrela Rijeka Crnojevića*

3. Dinaridi Savskog sliva Bosne i Hercegovine

- *Karstni hidrogeološki sistem vrela Bosne*

Dinarski sistem predstavlja jedno od najinteresantnijih područja u svetskim razmerama za istraživanje karsta, budući da se na ovom prostoru mogu prepoznati i uočiti svi površinski i podzemni karstni fenomeni. Stoga, karstologija je izučavana u Dinarskom sistemu još od 19. veka sa različitih aspekata (Mijatović, 1983; Komatina, 1992), te su počevši od Cvijića, mnogi domaći i inostrani istraživači karsta ispitivali ovaj karstni prostor, među kojima se ističu radovi Milanovića P., Bonaccija, Mijatovića, Heraka, Stevanovića, Radulovića V., Radulovića M., Skopljaka, Sliškovića i dr.

Pojas Dinarida proteže se pravcem severozapad – jugoistok, paralelno sa Jadranskim morem, počevši od severa Italije, preko Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Srbije i Severne Makedonije, da bi se završio u Albaniji (Stevanović et al. 2016). Dinaridi predstavljaju područje klasičnog razvića karsta, prepoznato u celom svetu kao locus typicus geomorfoloških i hidrogeoloških fenomena (Ford, 2005; Stevanović et al. 2016), budući da je upravo područje Carso, kao deo Dinarida dalo imena tipičnih karstnih formi. Na prostoru Dinarida registrovano je preko 12 000 pećina (Herak, 1972); tu se nalazi i najveće karstno polje na svetu – Livanjsko polje (JZ Bosne i Hercegovine), ukupne površine 380 km² (Milanović, P. 2000; Stevanović et al. 2022a), dok se na prostoru Dinarida javlja gustina vrtača i do 150/km² (Stevanović et al. 2016), što je takođe svetski fenomen. Takođe, na značaj Dinarida u svetskim razmerama ukazuje i činjenica da su lokalni nazivi za pojedine karstne oblike i pojave (npr. ponor, polje, uvala, doline i dr.) ušli u svetsku terminologiju (Stevanović & Mijatović, 2005; Stevanović et al. 2016), te ih karstolozi u celom svetu podjednako koriste kao i lokalni stručnjaci.



Sl. 2.4. Područje istraživanja (svetlo siva boja) i područja koja su istraživana u sklopu disertacije; Legenda: 1 – Karstni sistem Mlave; 2 – Karstni sistem Mokra; 3 – Karstni sistem Perućac; 4 – Karstni sistem Seljašnica; 5 – Karstni sistem Oko Bijejele; 6 – Karstni sistem Rijeke Crnojevića; 7 – Karstni sistem vrela Bosne. (Podloga: EUROSTAT; 2016; WOKAM database (Chen et al. 2017))

Još od Cvijićevih istraživanja, interes za naučna i praktična istraživanja karstnih terena i podzemnih voda koje se akumuliraju u njima ni danas ne jenjava. Samo u periodu nakon Drugog svetskog rata vršena su veoma intenzivna i opsežna istraživanja Dinarida bilo za potrebe nauke, bilo iz praktičnih razloga, tj. u cilju izgradnje brojnih površinskih akumulacija i hidroelektrana na prostoru Dinarida u bivšoj Jugoslaviji. Razlog za to je činjenica da Dinarski karst predstavlja područje koje je najbogatije vodom u čitavoj Evropi (Stevanović et al. 2016). Stoga, vodni resursi Dinarida predstavljaju osnov socio-ekonomskog razvoja stanovništva ovog regiona, imajući u vidu da se vode koriste za vodosnabdevanje, navodnjavanje, turizam i energetiku, čime vodni resursi predstavljaju najznačajniju sirovinu na prostoru Dinarskog karsta. Većina velikih gradova na prostoru Dinarida snabdeva se vodom akumuliranom u karstnim terenima, kao i čitava crnogorska obala koja se snabdeva sa regionalnog izvorišta Bolje Sestre.

Dinaridi kao prostor specifičnog geodiverziteta predstavljaju i osnovu za biotop biljnog i životinjskog sveta u sklopu površinskih i podzemnih ekosistema zavisnih od vodnih resursa. Posebno je razvijen podzemni živi svet koji obitava u pećinama Dinarida i koji pripada vrsti troglobita. Među njima najmarkantnija je čovečja ribica (*Proteus anguinus*), koja je endemska vrsta Dinarskog karsta, dok se još javljaju i rodovi silikatnih algi, mekušaca, briofita, ostrakoda i dr. (Stevens et al. 2021; Stevanović et al. 2022a).

Karpato-balkanidi na prostoru dela Centralnog Balkana koji je razmatran u doktorskoj disertaciji obuhvataju prostor istočne Srbije (Sl. 2.4), a sledeći karstni sistemi su detaljno analizirani u sklopu istraživanja:

1. Karpato-balkanidi istočne Srbije:

- Karstni hidrogeološki sistem vrela Mokra

➤ *Karstni hidrogeološki sistem vrela Mlave*

Karpato-balkanidi predstavljaju deo Alpida (jednu od orogenih grana) koji se nalazi na prostoru centralne i jugoistočne Evrope, gde se proteže od Bečkog basena preko Slovačke, južne Češke (Moravska), Poljske, preko dela Ukrajine i Moldavije, Rumunije, Srbije i Bugarske u dužini od preko 2 000 km. Ovaj orogeni sistem sačinjen je od krupnih tektonskih jedinica – Zapadni Karpati, Istočni Karpati (ili Transilvanijski Alpi) i Balkanidi (Grubić, 1994). Najveće rasprostranjenje karstnih terena nalazi se u centralnim delovima ovog velikog planinskog luka, tj. u području Zapadnih i Južnih Karpata (Stevanović & Filipović, 1994). Prostor Karpato-balkanida pokriva istočni deo Srbije, gde ima pravac pružanja sever – jug, tj. severozapad – jugoistok (Sl. 2.4). Ovaj sistem je u Srbiji ograničen rekom Dunav na severu, dolinom Velike Morave na zapadu, tj. Srpsko – makedonskom masom, dok istočnu i južnu granicu ovog sistema u Srbiji čini državna granica sa Bugarskom. Karstni tereni zauzimaju preko 3 000 km² (ili oko 30%) teritorije Karpato-balkanida istočne Srbije, među kojima se ističe Kučajsko-beljanički masiv koji sâm zauzima preko 750 km² (Stevanović & Filipović, 1994).

Istraživanja karstnih terena Karpato-balkanida istočne Srbije datiraju s kraja 19. veka. Pionir geomorfoloških i geoloških istraživanja i ovog prostora je Jovan Cvijić, koji je vršio prva ispitivanja karsta na ovom području. Kasnija istraživanja su intenzivirana nakon Drugog svetskog rata, ali su mahom bila praktičnog karaktera, tj. istraživanja su najvećim delom vršena u cilju rešavanja konkretnih inženjerskih problema, kao što su vodosnabdevanje stanovništva pijaćom vodom, odvodnjavanje rudnika, eksploatacija (termo)mineralnih voda, problemi zaštite vode i dr., što se može naći u radovima Milojevića, Filipovića, Čubrilovića, Stevanovića, Dragišića, Milanovića S. i dr. Takođe, naučna, fundamentalna istraživanja prevashodno su bila za potrebe doktorskih disertacija, što je rezultiralo značajnim podacima o funkcionisanju i rasprostranjenju karstnih hidrogeoloških sistema Karpato-balkanida istočne Srbije, rezervama podzemnih voda i mogućnostima njihove eksploatacije (Stevanović, 1987; 1991; Dragišić, 1988; 1992; Ristić, 2007; Jemcov, 2008; Milanović S. 2010; Vasić, 2017; Petrović B. 2020).

Karstni tereni Karpato-balkanida istočne Srbije nemaju tako markantne karstne pojave i oblike kao što je to slučaj na prostoru Dinarida. Ipak, značajne i velike pećine mogu se naći na ovom prostoru (Resavska, Lazareva, Cerjanska, Rajkova pećina i dr.), dok ovaj sistem oskudeva u karstnim poljima koja su obično malih dimenzija (Stevanović, 1995), budući da se poljima mogu uslovno smatrati samo Odorovačko i Divljakovačko polje. Karstni geomorfološki fenomeni kao što su vodopadi, prerasti okoline Majdanpeka, kanjoni i klisure među kojima se ističu Lazarev kanjon i Đerdapska klisura ističu prirodni značaj ovog dela Srbije sa aspekta zaštite životne sredine. Takođe, Karpato-balkanidi predstavljaju i prostor na kome se nalazi za sada jedini geopark u Srbiji (Đerdap), koji je nedavno uspostavljen i nalazi se na UNESCO listi globalnih geoparkova (Maran Stevanović, 2018; 2022).

Značaj karstnih podzemnih voda Karpato-balkanida istočne Srbije ogleda se u velikoj potencijalnosti voda sa aspekta korišćenja za različite potrebe, pre svih za vodosnabdevanje stanovništva. Svi veći gradovi istočne Srbije (Bor, Zaječar, Niš, Pirot, Knjaževac) koriste karstne podzemne vode kao osnovni (neki gradovi i kao jedini) izvor vodosnabdevanja, što dodatno ukazuje na činjenicu da je ovaj resurs neophodno čuvati i racionalno koristiti.

2.2 Nomenklatura i terminologija u hidrogeologiji karsta – analiza trenutnog stanja

Razvoj bilo koje naučne discipline, neminovno prati uspostavljanje novih termina i pojmova kojima se opisuju novootkrivene, ali i već postojeće pojave. Sa druge strane, progresom novih naučnih saznanja, često se dešava da se već poznati pojmovi zamenjuju novim, adekvatnijim

imenima, što nekada u naučnoj javnosti može dovesti do konfuzije prilikom upotrebe istih. Korišćenje više termina za jednu pojavu može dovesti na kraju do semantičke divergencije, tj. različitog poimanja istog termina, u zavisnosti od pristupa autora.

Takav slučaj prisutan je i u hidrogeologiji karsta, gde se osnovna jedinica bilo koje analize ili istraživanja može nazivati različitim terminima, a da se istovremeno odnosi na istu pojavu. Međutim, može se desiti i suprotno – da autori, najčešće nesvesno, koriste termine koji zapravo ne odgovaraju izvornom pojmu koji se koristi za osnovnu jedinicu njihove analize.

Englesko govorno područje semantički razlikuje osnovne jedinice hidrogeoloških istraživanja prema vodopropusnosti. Tako, vodopropusna zasićena sredina, sposobna da prima, transportuje i akumulira vodu u vidu rezervoara podzemnih voda tako da odaje ekonomski značajnu količinu vode za određene potrebe, naziva se **akvifer** (engl. *Aquifer*²), nastao od latinskih reči *Aqua* – što znači *voda* i *Fere* – što znači *nositi*. Nasuprot ovog pojma je termin **akvifudž** (engl. *Aquifuge*³), koji predstavlja geološku formaciju bez međusobno povezanih pora, te ne može ni da apsorbuje ni transportuje vodu. Između ova dva dijametralno suprotna termina, engleska literatura prepoznaje i pojmove **akvitard** (engl. *Aquitard*) i **akviklud** (engl. *Aquiclude*⁴) koji se odnose na geološke formacije slabe poroznosti i niske vodopropusnosti, koji omogućavaju samo migraciju vode iz jedne izdani u drugu, s tim da je razlika između akvitarda i akvikluda u tome što je akviklud (nastao od engleskog glagola *to exclude* – isključiti, odstraniti) manje vodopropustan.

Kao što se iz prevoda ovih termina vidi, srpska terminologija ne prepoznaje ovakvu distinkciju pojmova koji se odnose na vodo(ne)propusne stenske mase. Sa druge strane, srpski termin za geološke formacije koje su sposobne da prime, akumuliraju, transportuju i odaju vodu jeste **izdan**, što bi direktno podrazumevalo sposobnost stena da **izdaju vodu**. Ovaj termin je najpribližniji latinskoj osnovi termina **akvifer**, a prvi put ga iz narodnog srpskog jezika u naučnu literaturu kao osnovnu jedinicu hidrogeoloških istraživanja uvodi Radovanović (1897), deskriptivno ga predstavljajući kao sredinu u kojoj „*se otpočne nad površinom njihovom (glinovitih slojeva, prim. aut.) skupljati podzemna voda, i otpočne se stvarati tako zvana izdan, čija površina postupno sve više raste od neprobojnog sloja u visinu, što više atmosferske vode kroz gornje probojne slojeve pridolazi*“⁵. Slične definicije daju i kasniji autori (npr. Stepanović, 1962; Dragišić, 1997; Dragišić & Živanović, 2014 i dr.) koji termin **izdan** predstavljaju kao „*geološku, odnosno vodonosnu sredinu potpuno ili delimično zasićenu slobodnim podzemnim vodama, sposobnu da akumulira i odaje slobodne podzemne vode koje hrane izvore, slobodno ističu u reke, jezera i mora, i zahvataju se različitim vodozahvatnim objektima (bunari, vodozahvatni potkopi i dr.)*“⁶. Kuriozitet koji ovde treba posebno istaći jeste da je srpska hidrogeološka nomenklatura jedna od retkih u svetu koja ima svoj termin za geološku formaciju koja sadrži vodu. Pored srpskog, još francusko govorno područje ima sopstvene termine za vodonosnu sredinu delimično ili potpuno zasićenu vodom – *aquifère*, tj. *nappe*.

Termin **izdan** zadržao je svoju široku primenu i danas, tako da i dalje predstavlja osnov hidrogeološke analize i bazu daljeg razvoja hidrogeološke nomenklature. Grafički prikaz termina **izdan** na primeru karstne izdani predstavljen je na sl. 2.5.

Osim termina **karstna izdan**, u stručnoj literaturi može se sresti i termin **kraški (ili karstni) kolektor**, koji prvi put pominje Stepanović (1962) definišući ga kao „*bilo kakve stenske mase*

² Poehls, D. J. & Smith, G. J. 2009: *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*, p. 15

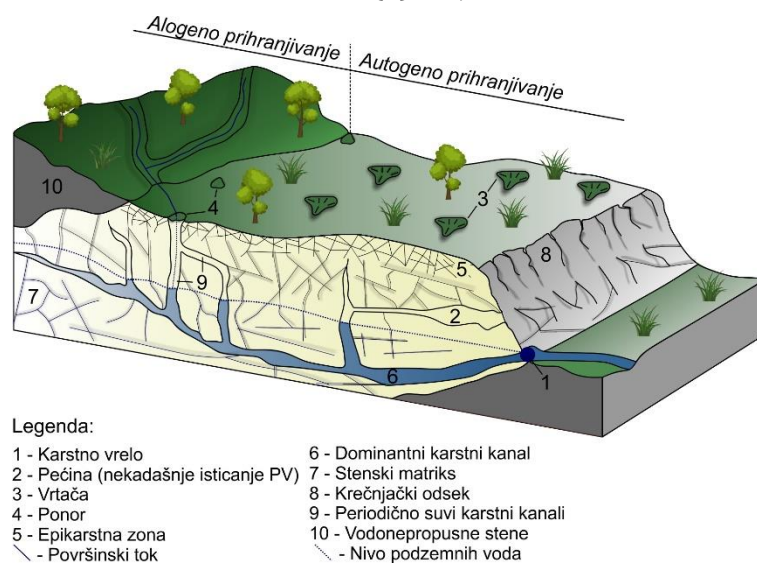
³ Poehls, D. J. & Smith, G. J. 2009: *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*, p. 14

⁴ Poehls, D. J. & Smith, G. J. 2009: *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*, p. 14 & 17

⁵ Radovanović, S., „Podzemne vode – izdani, izvori, bunari, terme i mineralne vode“, str. 17

⁶ Dragišić, V. & Živanović, V.: „Opšta hidrogeologija“, str. 248-249

koje su toliko grublje porozne od neposredno susednih stenskih masa, da slobodne podzemne vode kroz njih mogu mnogo lakše da se kreću – ako je hidraulički pritisak u jednim i drugima približno podjednak.“ Isti autor razlikuje **kolektore – sprovodnike** kao delove kolektora koji samo transportuju vodu i **kolektore – rezervoare** kao delove kolektora u kojima se voda akumulira u određenoj zapremini, ili postoje mogućnosti za akumulaciju voda. Imajući u vidu navedenu definiciju karstnog kolektora, može se zaključiti da se on sastoji samo od transportnih i akumulirajućih karstnih kanala (br. 9 i 6 na sl. 2.5), odnosno da predstavlja agregat superkapiranih šupljina (pora), dok se matriks stene ne razmatra. Obično, kolektori – sprovodnici i kolektori – rezervoari se identifikuju sa stenom u kojoj se nalaze (npr. izdani u peskovima i sl.), a takva praksa kod karbonatnih stena može dovesti do krupnih grešaka u prostornoj proceni poroznosti stenske mase, pre svega zbog tzv. efekta razmere stenske mase koja utiče na strukturu poroznosti (Stepanović, 1962; Mijatović, 1990). Kvantifikacija termina **kolektor** podrazumeva dva bitna hidrogeološka parametra – **transmisivnost (T)**, koji se odnosi na kolektore – sprovodnike i **akumulativnosti (S)**, koji se odnosi na kolektore – rezervoare.



Sl. 2.5. Grafički prikaz karstne izdani (Goldscheider & Drew 2007, modifikovano)

Mijatović (1990) u srpsku stručnu terminologiju uvodi termin **kraški (ili karstni) vodonosnik**, navodeći da ovaj termin direktno i najpribližnije opisuje engleski pojam *aquifer*. Isti autor navodi definiciju karstnog vodonosnika kao „vodonosne karbonatne stenske mase u kojoj se nalazi agregat kraških kolektora sprovodnika i rezervoara“. Istovremeno, Mijatović (1990) navodi definiciju i kraške (ili karstne) izdani koja „podrazumeva svaku hidrogeološki značajnu koncentraciju slobodnih podzemnih voda, bez obzira na poreklo tih voda, koja se nalazi u karbonatnoj stenskoj masi sa pukotinsko-kavernoznim tipom poroznosti. To je dakle akumulacija slobodnih podzemnih voda, koja ispunjava određeni zasićeni prostor karbonatne stenske mase, čiji su pojedini delovi bolje ili slabije međusobno povezani kraškim kolektorima (pukotinama, crevima, kanalima i kavernama), pri istim ili približno istim hidrodinamičkim uslovima (pritisak i gradijent).“⁷ S tim u vezi, Mijatović (1990) hijerarhijski razlikuje karstni vodonosnik od karstne izdani, gde je vodonosnik širi pojam koji u sebi sadrži izdan u delovima koji imaju funkciju kolektora – rezervoara. Drugim rečima, Mijatović (1990) smatra da termin *vodonosnik* integriše dve, genetski povezane zone – kolektor-sprovodnik, odnosno nadizdansku zonu i kolektor-rezervoar kao izdansku zonu, tj. izdan.

⁷ Mijatović, B. (1990): *Kras – hidrogeologija kraških vodonosnika*, str. 142

Progres kompjuterskih nauka krajem XX veka i njihova aplikacija u svim naučnim oblastima, u hidrogeologiji karsta je omogućio matematičko simuliranje prirodnih procesa transformacije padavina u isticanje podzemnih voda. Takav pristup doveo je do posmatranja karbonatne stenske mase u kojoj se akumuliraju karstne podzemne vode kao *sistema*. Termin *karstni hidrogeološki sistem (KHS)*, osim karstnih kanala (u funkciji kolektora-sprovodnika i rezervoara) podrazumeva i određene fizičke, prirodne procese, kao što su prihranjivanje karstnih podzemnih voda, odnosno transformacija infiltriranih padavina ili voda ponornica u podzemne vode. Ovaj termin u srpsku stručnu terminologiju u oblasti hidrogeologije karsta uvode Krešić (1987, 1991) i Jemcov (2008), a u evropskoj nomenklaturi prvi put ga pominje Mangin (1975). Karstni hidrogeološki sistem bi, dakle po definiciji uključivao geološku sredinu u kojoj se akumuliraju podzemne vode (kolektore-rezervoare i karstnu izdan), zatim matriks stene i manje karstne kanale i pukotine (kolektore-sprovodnike), odnosno ceo medijum u kome se dešavaju fizički procesi transformacije efektivnih infiltracija u isticanje podzemnih voda. To se pre svega odnosi na procese koji uslovljavaju hidrauličko funkcionisanje KHS.

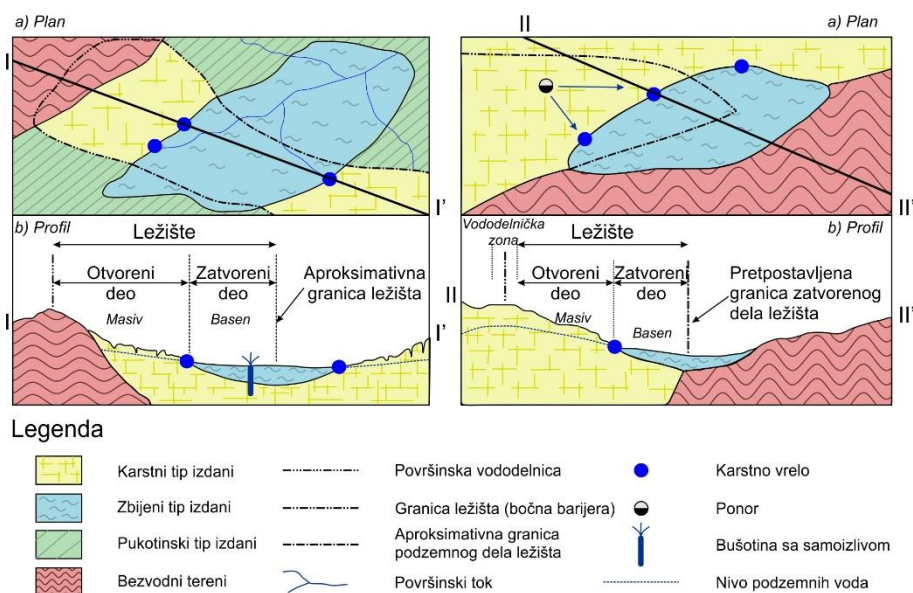
Prethodno navedeni termini koji su korišćeni u stručnoj literaturi u okviru hidrogeologije karsta, pretežno su sa naučne strane definisali sredinu u kojoj se formiraju karstne podzemne vode. Drugim rečima, pomenuti pojmovi predstavljaju termine kojima se ukazuje na funkciju i genezu vodonosnih sredina u okviru karbonatnih stenskih masa. Polazeći od osnovne terminologije u opštoj hidrogeologiji, pa i time u hidrogeologiji karsta, kasniji naučnici su davali sinonime terminima „izdan“, „vodonosnik“ i „kolektor“, najčešće želeći da istaknu vodoprivrednu i ekonomsku vrednost podzemnih vodnih resursa u karstu.

Stevanović (1987, 1991) u svojim istraživanjima koristi termin **ležište karstnih izdanskih voda**, čime ovaj pojam uvodi u naučnu nomenklaturu. Stevanović (1987, 1991) uspostavlja pomenuti pojam, imajući u vidu pre svega praktičan karakter svojih istraživanja, koja su za cilj imala evaluaciju karstnih podzemnih voda sa aspekta mogućnosti korišćenja za potrebe vodosnabdevanja stanovništva. Termin *ležište* preuzet je iz ekonomske geologije koja ocenjuje potencijalnost ležišta mineralnih sirovina sa aspekta njihove eksploatacije, te je analogija sa podzemnim vodama logična i jasna. Stevanović (1987, 1991) navodi probleme delineacije ležišta karstnih izdanskih voda u smislu definisanja graničnih uslova i razmere posmatranja, što je grafički prikazano skicama i profilima karakterističnih ležišta na sl. 2.6. S obzirom na praktičan značaj uspostavljanja ovog termina, Stevanović (1987, 1991) ističe klasifikaciju ležišta prema rasprostranjenju, karakteru isticanja, istraženosti i privrednom značaju, dok elemente jednog ležišta predstavljaju eksploataciona polja, kao niže hijerarhijske jedinice i izvorišta, kao najniže kategorije vodoprivredne evaluacije podzemnih voda.

Početak XXI veka, zemlje Centralnog Balkana prihvataju evropsku zakonsku regulativu u velikom broju oblasti, a time i u oblasti vodnih resursa. Na taj način, zemlje koje nisu članice Evropske unije (Srbija, Crna Gora, Bosna i Hercegovina, Severna Makedonija), prilagodile su svoje zakone o vodama evropskim propisima iz oblasti vodnog prava, čime je i terminologija pretrpela određene dopune. Evropska zakonska regulativa prepoznaje značaj podzemnih voda i njihove zaštite, primenjujući direktive i vodiče, kojima se bliže određuju mere koje treba preduzeti da bi se zaštitile podzemne vode.

Najvažniji dokument na kome se temelji evropski pristup vodnim resursima jeste *Okvirna direktiva o vodama EU*, usvojena od strane Evropske Komisije 2000. godine (WFD, 2000). Ova direktiva sa pratećim vodičima uvodi pojmove statusa i pritisaka na kvalitet i kvantitet podzemnih voda, a kao osnovna jedinica utvrđivanja pritisaka figuriše termin **vodno telo podzemnih voda**. Na taj način, pojam vodno telo podzemnih voda ističe praktični aspekt podzemnih vodnih resursa, dok naučna zasnovanost pojma jeste čest predmet diskusije

naučnika. Prema Vodiču ODV (CIS, 2003, Guidance doc. no. 2) o identifikaciji vodnih tela⁸, podzemno vodno telo podrazumeva određenu zapreminu podzemne vode koja se nalazi u jednoj ili više izdani, te se, dakle, pojam vodnog tela podzemnih voda ne može izjednačiti sa pojmom izdan, budući da je hijerarhijski iznad njega. U Vodiču se takođe navodi da ne postoji eksplicitna "shema" po kojoj se izdvajaju vodna tela, imajući u vidu da njihova delineacija zavisi od brojnih faktora koji se umnogome razlikuju od slučaja do slučaja. Kada je u pitanju izdan u karstu, proces izdvajanja vodnih tela se još više usložnjava, budući da su pravci kretanja podzemne vode karstnim kanalima praktično nepredvidivi, pogotovo ako je reč o poluzatvorenim hidrogeološkim strukturama.



Sl. 2.6. Prikaz karakterističnih ležišta karstnih izdanskih voda (Stevanović, 1987; 1991)

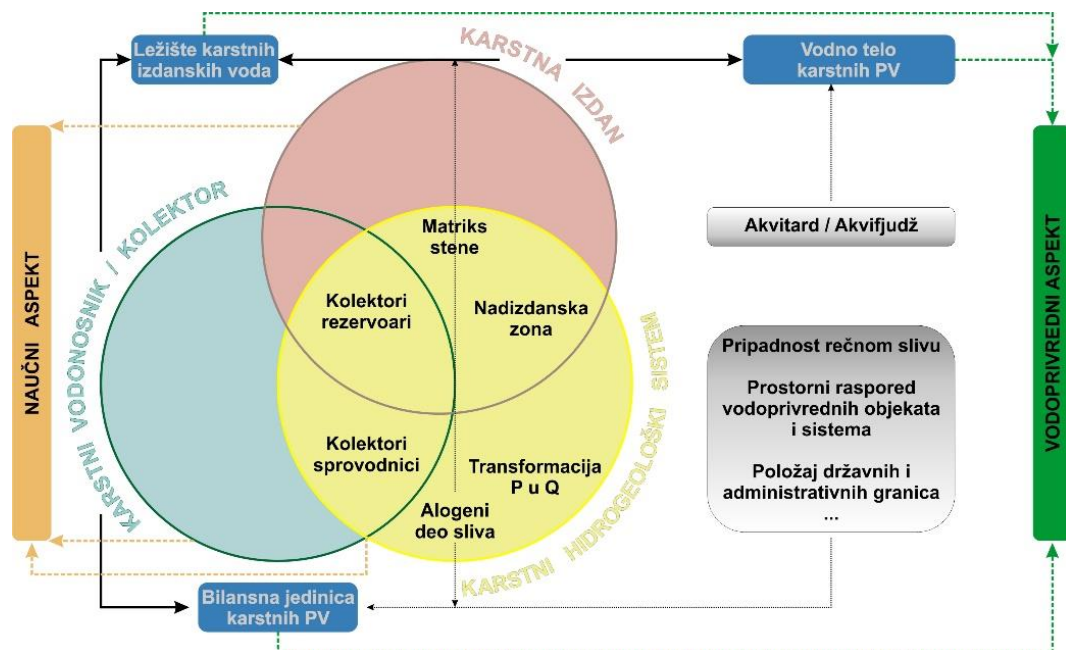
Sa druge strane, ukoliko se posmatra komponenta kvantiteta, Vodič preporučuje da bi trebalo izdvojiti svako vodno telo iz koga se može zahvatiti prosečno 10 m³ vode dnevno, ili se koristi za vodosnabdevanje više od 50 osoba. Ako bi se ta preporuka doslovno primenjivala u praksi, broj izdvojenih vodnih tela u nekim državama bi prevazilazio i više hiljada (Stevanović, 2011), što je praktično nemoguće osmatrati kroz obavezujući monitoring, te je stoga neophodno prilagoditi kriterijume za izdvajanje vodnih tela konkretnim uslovima.

Termin koji je takođe prisutan u naučnoj i stručnoj praksi odnosi se na **bilansnu jedinicu** podzemnih voda. Ovaj termin ima pre svega vodoprivredni karakter, odnosno direktno ukazuje na potencijalnost rezervi podzemnih voda i mogućnosti njihove eksploatacije. Dakle, pojam **bilansna jedinica** najčešće se sreće u vodoprivrednoj praksi, kada je potrebno izraditi bilans površinskih i/ili podzemnih vodnih resursa određene teritorije. **Bilansna jedinica** se u hidrogeološkoj praksi sreće prvi put tokom implementacije grupe strateških projekata u periodu 2007 – 2011, među kojima je bio i projekat „Ocena rezervi regionalnih izvorišta podzemnih voda za vodosnabdevanje – regulacija izdani i povećanje kapaciteta“. Glavni cilj ovog projekta bio je kvantitativna i kvalitativna ocena resursa i stanja eksploatacije izvorišta vodosnabdevanja, što je trebalo da omogući sveukupno poznavanje statusa podzemnih vodnih resursa na teritoriji Srbije. Delineacija bilansnih jedinica u okviru navedenog projekta vršena je u skladu sa postojećom klasifikacijom geostrukturnih jedinica Srbije, sistematizacijama vršenim u sklopu Vodoprivredne osnove Srbije i klasifikacijama izvedenim u prethodnim projektima koji su razmatrali bilans vodnih resursa Republike Srbije (Stevanović et al. 2010). S

⁸ Guidance document no. 2, Identification of Water Bodies

tim u vezi, bilansne jedinice podzemnih voda dodeljivane su rečnim slivovima, što je umnogome otežavalo njihovu delineaciju, pogotovo u karstnim terenima. Takođe, na delineaciju bilansnih jedinica uticali su i faktori kao što su reljef terena i razvijenost hidrografske mreže, geološke i hidrogeološke karakteristike terena koje su od uticaja za formiranje podzemnih voda, raspored velikih korisnika i zagađivača duž vodotoka, društveno politička podela teritorije i položaji međudržavnih i republičko-pokrajinskih granica i dr. (Prohaska et al. 2007; Stevanović et al. 2010). Imajući navedeno u vidu, termin *bilansna jedinica* u karstu odnosi se isključivo na kvantifikaciju ulaznih i izlaznih parametara i ocenu akumulativnosti jednog karstnog hidrogeološkog sistema, bez analize prirodnih, fizičkih procesa koji se dešavaju u sistemu.

Kao što se iz prethodnog teksta može videti, u hidrogeologiji karsta prisutan je širok spektar termina, koji se mogu koristiti za definisanje i analizu osnovnih istraživačkih aktivnosti. Na osnovu svega iznetog, može se zaključiti da svrha i cilj primenjenih istraživanja praktično diktiraju odabir termina koji će se koristiti. Drugim rečima, evidentno je da se u fundamentalnim, naučnim istraživanjima češće koriste termini kao što su *izdan*, *vodonosnik*, *kolektor*, *karstni hidrogeološki sistem*, dok je upotreba pojmova *ležište (karstnih) izdanskih voda*, *vodno telo (karstnih) podzemnih voda*, *odnosno bilansna jedinica (karstnih) podzemnih voda* češća u vodoprivrednoj praksi, koja ima za cilj valorizaciju vodnih resursa i ocenu mogućnosti za njihovu eksploataciju. Kompleksnost i povezanosti najčešće korišćenih termina u hidrogeologiji karsta prikazana je na sl. 2.7. Sa sl. 2.7 može se uočiti kompleksnost i hijerarhija hidrogeološke terminologije vezane za karstne podzemne vode. Naime, Venovi dijagrami, koji u matematici služe sa operacije sa skupovima i logička zaključivanja, iskorišćeni su za klasifikaciju i hijerarhijski raspored terminâ koji se najčešće koriste u *naučnim istraživanjima* u okviru hidrogeologije karsta. Tako, pomenuti dijagram pokazuje *karstnu izdan* kao jedinicu koja u sebe uključuje nadizdansku zonu i geosredinu potpuno ili delimično zasićenu vodom – dakle, u sebi sadrži podzemnu vodu akumuliranu u okviru kolektora-rezervoara i matrične poroznosti karbonatne stenske mase. Na taj način može se interpretirati sinonimija termina vodonosnik i izdan.



Sl. 2.7. Relacioni dijagram najčešće korišćenih termina u hidrogeologiji karsta sa naučnog i vodoprivrednog aspekta

Sa druge strane, ako se objedine kolektori-rezervoari i kolektori-sprovodnici, odnosno karstni kanali ispunjeni vodom i kanali koji transportuju vodu (engl. *Conduit flow*), formira se *karstni*

vodonosnik ili kolektor, kao hijerarhijska jedinica iznad karstne izdani, koja je uključena u vodonosnik. Na kraju, kao najviša hijerarhijska jedinica figuriše **karstni hidrogeološki sistem** koji, osim transportnih i karstnih kanala ispunjenih vodom, uključuje i nadizdansku zonu (periodično vlažnu i epikarstnu zonu), alogene delove sliva (ako postoje) na površini terena koji svakako imaju učešća u prihranjivanju karstnih podzemnih voda, odnosno celokupnu geološku sredinu u kojoj se dešavaju fizički procesi transformacije infiltriranih padavina u akumuliranu vodu i isticanje na karstnim vrelima.

Termini koji se češće koriste u *vodoprivrednoj praksi*, tj. pri evaluaciji podzemnih vodnih resursa i izradi bilansa podzemnih voda u karstu, na sl. 2.7 predstavljeni su u plavim pravougaonicima, budući da je među njima izraženija semantička, pre nego naučna diferencijacija. Naime, termin **ležište karstnih izdanskih voda** uključuje karstnu izdan i karstni vodonosnik/kolektor, odnosno alogene delove sliva koji kontribuiraju bilansnim rezervama u karstu. Iste parametre uključuje i termin **bilansna jedinica karstnih podzemnih voda**, uz dodatne faktore kao što su postojeći vodoprivredni objekti (izvorišta, kaptaze) koji se već koriste za eksploataciju podzemnih voda, zatim uslovljenost delineacije bilansne jedinice pripadajućim rečnim slivom i položajem državne i administrativne granice i dr. Na kraju, termin **vodno telo karstnih podzemnih voda** se često izjednačava sa pojmom karstna izdan, što po definiciji nije potpuno tačno, budući da vodno telo karstnih podzemnih voda može sadržati više izdani istog ili čak i različitog tipa, koji su razdvojeni uslovno vodonepropusnim delovima terena (*akvitard*, odnosno *akvifudž*).

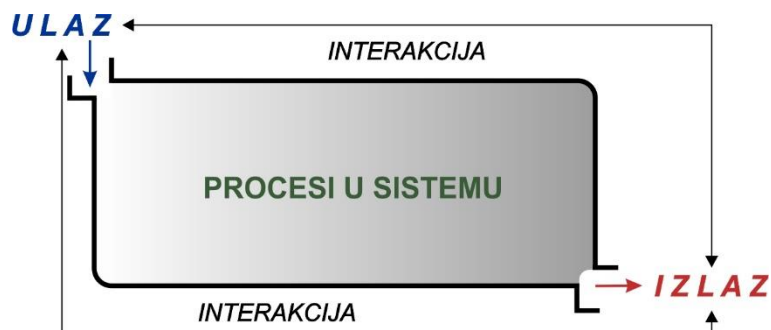
S obzirom na to da karakterizacija karstnih podzemnih voda uključuje definisanje kvantitativne i kvalitativne komponente režima karstnih podzemnih voda, odnosno analizu kvaliteta podzemnih voda i hidrauličke mehanizme tečenja podzemnih voda, za dalju analizu koristiće se termin **karstni hidrogeološki sistem**. Ovaj termin, dakle obuhvata prihranjivanje, cirkulaciju i dreniranje karstnih podzemnih voda u opštem smislu, tj. zone autogenog (punktuelnog i difuznog) i alogenog prihranjivanja (ako postoji), zone vertikalne i horizontalne cirkulacije podzemnih voda (epikarstna i nadizdanska zona, matriks stene i karstne pukotine i kanali), kao i zone dreniranja podzemnih voda na površini terena u vidu vrela, ili u susedne izdani. Karstni sistem na taj način predstavlja zaokruženu hidrogeološku strukturu u kojoj se vrše fizički procesi transformacije kvantiteta i kvaliteta efektivno infiltriranih voda sa površine terena u podzemne vode, koje je takav sistem sposoban da ponovo vrati na površinu terena.

2.3 Definicija karstnih hidrogeoloških sistema

Funkcionisanje određenog karstnog hidrogeološkog sistema (KHS) predstavlja kompleksno delovanje ulaznih i izlaznih faktora sistema pod uticajem određenih procesa u samom sistemu. Pre definisanja karstnog hidrogeološkog sistema, važno je bliže odrediti sâm pojam „sistem“ kao jedinicu funkcionisanja zaokružene celine. Stevanović (1990) navodi da naučni sistem predstavlja celovit skup sređenih znanja svih nivoa, od činjenica, preko hipoteza do zakona i teorija, gde su svi elementi sistema međusobno povezani. Osnovne funkcije sistema su (Stevanović, 1990):

- Mogućnosti sistematizacije svih znanja kojima se raspolaže;
- Mogućnost izvođenja i dokazivanja stavova;
- objašnjavanje i predviđanje fenomena sistema.

Drugim rečima, sistem po definiciji⁹ podrazumeva skup elemenata koji su u međusobnoj interakciji i koji zajedničkim delovanjem teže postizanju istog cilja, odnosno imaju zajedničku svrhu. Takođe, svaki element, da bi bio deo nekog sistema, mora biti povezan makar sa jednim drugim elementom u istom sistemu. Svaki sistem je definisan ulaznim i izlaznim podacima, kao i procesima u samom sistemu (Sl. 2.8), dok jedan zaokružen i nezavisan sistem može biti i podsistem nekog većeg sistema.



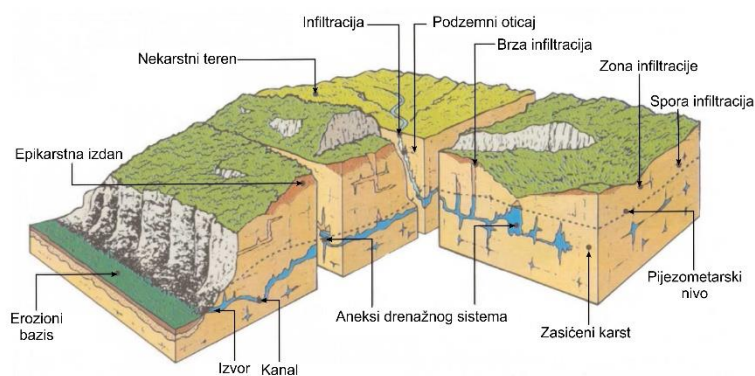
Sl. 2.8. Shematski prikaz funkcionisanja sistema

Prethodno pomenuta definicija sistema može se primeniti i na sisteme koji opisuju pojave, koje funkcionišu prema određenim zakonima prirode. U tom slučaju, funkcionisanje takvog sistema se umnogome razlikuje od sistema predstavljenog na sl. 2.8, najviše zbog većeg broja ulaznih i izlaznih komponenti kao i komplikovanih procesa u samom sistemu. Mangin (1975) i Krešić (1991) definišu KHS kao celinu sa karstnom izdani kao osnovnim članom, koja može biti sastavljena, ili pod uticajem, jedne ili više izdani i površinskih tokova. KHS je tipičan primer kompleksnog sistema evolutivnog karaktera na koji utiču brojni faktori. Tako, različiti autori definišu KHS kao integrisani sistem transfera mase u rastvorljivim stenama, sa strukturom propusnosti kroz kanale koji su formirani rastvaranjem stena i organizovani tako da omogućavaju cirkulaciju (kretanje) fluida (Klimchuk & Ford, 2000). Sa druge strane, Jemcov (2008) karakteriše KHS kao karstnu formaciju sa razvijenom disolucionom poroznošću, koja na osnovu graničnih uslova, prima ulazne komponente (fluid) i vrši njihov transport i transformaciju u izlazne komponente.

Sve pomenute teorijske postavke funkcionisanja KHS su praćene i grafičkim prikazom, još od Cvijića (1918) koji daje prikaz evolucije i formiranja karstne izdani. Cvijić (1918) razmatra vertikalno razviće karstne izdani kroz evoluciju i fazu hidrološkog ciklusa, tako da se može govoriti o pionirskom konceptualnom modelu funkcionisanja KHS (videti sl. 2.1).

Sa razvojem nauke o karstu i progresom saznanja o njemu, različiti konceptualni modeli su kreirani, zavisno od konkretnih problema i tipova karsta sa kojima su se susretali njihovi autori. Tako, među prvim konceptualnim modelima u drugoj polovini 20. veka, Mangin (1975, 1984, 1994) daje svoj predlog modela karstnog hidrogeološkog sistema, ističući dreniranje i akumulativnost podzemnih voda (rezerve) kao važne funkcije KHS (Sl. 2.9). Ovaj model takođe je saglasan sa Cvijićevim shvatanjem evolucije karstnog hidrogeološkog sistema, predstavljajući je sa tri zone u vertikalnom smislu – viša zona ili epikarst koja je veoma propusna, omogućavajući brzu infiltraciju na račun padavina; srednja zona – locirana u podini epikarsta, sa postojanjem mreže kanala i pukotina koje dobijaju vodu na račun brze infiltracije iz povlate ili spore infiltracije kroz matričnu poroznost krečnjaka; i duboka zona – saturisana ili zasićena zona koja transportuje vodu iz viših ili dubljih delova izdani ka glavnim drenirajućim tačkama.

⁹ „System“. Cambridge dictionary, 2020. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/system> (14/07/20)



Sl. 2.9. Konceptualni model karstnog hidrogeološkog sistema (Mangin, 1975)

Mangin (1975) prvi put pominje epikarst kao pripovršinsku zonu u okviru jednog KHS. Nakon njega, još neki autori u svojim konceptualnim modelima ističu značaj epikarstne sredine (Gunn, 1985; Drogue, 1992; Döreflinger & Zwahlen, 1995; Király et al. 1995; Trček, 2003; Williams, 2004; Petrović B. 2020) kao zone koja se razlikuje od dubljih delova karstne izdani po poroznosti, brzini infiltracije površinskih voda i mehanizmu akumuliranja podzemnih voda, što posebnu ulogu ima pri oceni prirodne ranjivosti karstnih podzemnih voda. Svi pomenuti modeli podrazumevaju 4 glavne komponente KHS: infiltraciju, zemljišni pokrivač i epikarstnu zonu, nezasićenu zonu i zasićenu zonu (Jemcov, 2008).

Glavne razlike između sličnih konceptualnih modela ogledaju se u funkcionisanju akumulacije karstnih podzemnih voda, odnosno hidrauličkih kontinualnosti zasićene zone. Naime, Jemcov (2008) navodi da određeni autori (Mudry 1990; Drogue, 1992; Király, 2002) podrazumevaju freatsku zonu kao hidraulički kontinualnu, male vodopropusnosti u kojoj se rezerve prazne preko sistema krupnih kanala. Međutim, Mangin (1975), Marsaud (1996) i Bakalowicz (2005) podrazumevaju istu ovu zonu kao diskontinualnu, osim kada su kanali sifonskog tipa, odnosno kada zaležu ispod kote isticanja podzemne vode. Takođe, Jemcov (2008) navodi i razlike u formiranju baznog oticaja, koji se može formirati na račun rezervi u zasićenoj (Mangin 1975; Drogue 1992), i/ili iz rezervi formiranih u epikarstnoj zoni (Williams 1983; Klimchouk 2000; Perrin 2003).

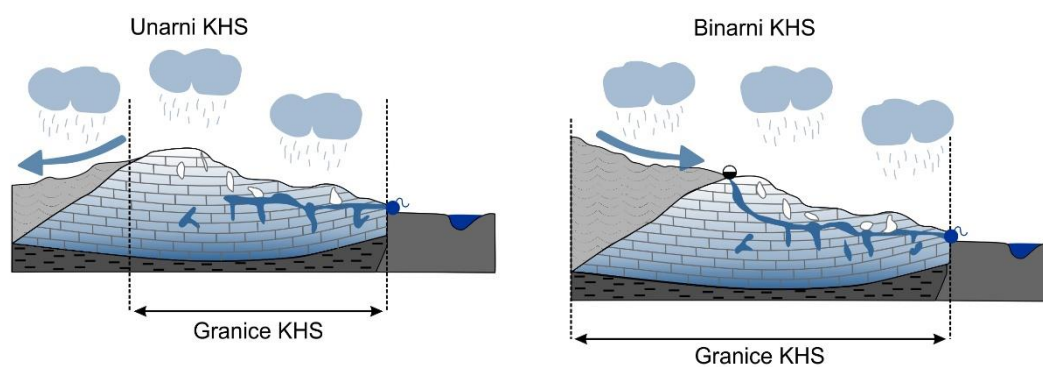
Kako navedeni konceptualni modeli pokazuju, karstni hidrogeološki sistemi se odlikuju, tzv. **fenomenom dvojnosti** (Király et al. 1995; Jemcov, 2008) koja se ogleda u *dvostrukom načinu infiltracije* (spora infiltracija kroz slabopropusne karstne stene ili brza infiltracija kroz ponore i veće kanale i pukotine), zatim *dvostrukom procesu cirkulacije* (brza cirkulacija kroz veće kanale i pukotine ili spora infiltracija kroz matričnu poroznost) i *dvostruki vid dreniranja* (sporo dreniranje preko manjih pukotinskih sistema, odnosno brzo dreniranje preko većih karstnih kanala i snažnih karstnih vrela). Ovom fenomenu bi se moglo dodati da KHS sadrži i *fenomen dvostruke poroznosti*, odnosno postojanje matrične poroznosti i postojanje krupnih karstnih kanala. Neki autori čak pominju i *fenomen tercijarne poroznosti* kada je karstni hidrogeološki sistem toliko evoluirao da sadrži i kaverne znatnih dimenzija (Stevanović, 2015a).

Zavisno od načina prihranjivanja, cirkulacije i isticanja karstnih podzemnih voda, KHS se mogu podeliti prema tipovima hidrogeološke strukture, odnosno prema graničnim uslovima (Stevanović, 1991; Krešić, 1991; Jemcov, 2008, Krešić, 2009):

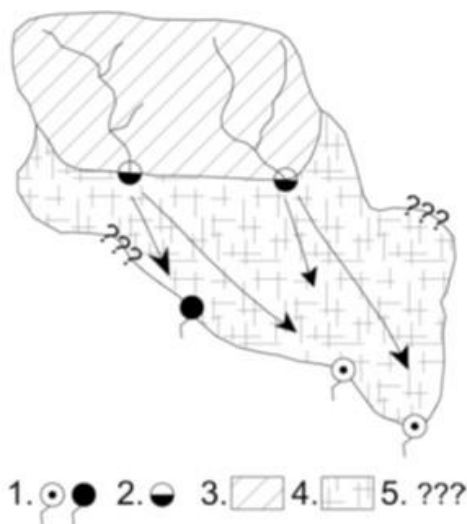
- Otvoreni, kada su poznate tj. otkrivene zone prihranjivanja, cirkulacije i isticanja;
- Poluotvoreni, kada je zona prihranjivanja potpuno poznata tj. otkrivena, a zona isticanja delimično poznata tj. otkrivena;

- Poluzatvoreni, kada je zona prihranjivanja delimično poznata tj. otkrivena, a zona isticanja nepoznata;
- Zatvoreni, kada su nepoznate zone hranjenja, cirkulacije i isticanja, tj. kada se KHS nalazi u podini nekarbonatnih tvorevina.

U zavisnosti od graničnih uslova, karstni hidrogeološki sistem može biti *unarni* ili *binarni* (Bakalowicz, 2005; Jemcov, 2008, Stevanović, 2015a). Unarni sistem podrazumeva KHS kod koga je zona prihranjivanja u okviru karbonatnih stena koje su sastavni deo sistema, odnosno sliva vrela. Takvo prihranjivanje naziva se *autogeno prihranjivanje*. Sa druge strane, binarni sistem podrazumeva prihranjivanje koje se vrši oticajem površinskih voda ili padavina sa nekarbonatnih stena i njihovim poniranjem na kontaktu sa karbonatnim stenama. Takvo prihranjivanje naziva se *alogeno* i podrazumeva nekarbonatne stene koje su pridružena komponenta slivnom području jednog karstnog sistema. Na sl. 2.10 prikazani su tipski primeri unarnog i binarnog karstnog hidrogeološkog sistema, dok je na sl. 2.11 prikazan tipski primer alogenog prihranjivanja karstne izdani.



Sl. 2.10. Shematski prikaz tipskih primera unarnog i binarnog karstnog hidrogeološkog sistema (Bakalowicz, 2005 iz Marsaud, 1996)



Sl. 2.11. Primer KHS u planu sa alogenim prihranjivanjem; Legenda: 1. vrela; 2. ponor; 3. nekarstni tereni; 4. karstni tereni; 5. pretpostavljena lateralna hidrogeološka vododelnica (Stevanović, 2015c)

3 MENADŽMENT VODNIH RESURSA I PLANOVI UPRAVLJANJA REČNIM SLIVOVIMA

3.1 Teorijski prikaz koncepta menadžmenta i održivog korišćenja vodnih resursa

Karstne podzemne vode predmet su interesovanja čoveka još od paleolita, pre svega zbog njihove veće izdašnosti u odnosu na druge izvore, a i karsta koji je svojim fenomenima, pre svega pećinama, omogućavao sigurna skloništa. Evolucija čoveka može se uporedo pratiti sa razvojem procesa eksploatacije vodnih resursa, uključujući i podzemne vode. Stoga, budući da je čovek vekovima eksploatisao karstne podzemne vode, može se zaključiti da koncept menadžmenta (upravljanja) vodama iz karsta postoji najmanje koliko i ideja o korišćenju podzemnih voda za različite potrebe, pre svega vodosnabdevanje stanovništva.

Principi upravljanja podzemnim vodama koje se koriste u javnom snabdevanju bili su primenjivani čak i u srednjem veku, kada se mogu pronaći prvi pokušaji regulisanja količine vode koja se sme koristiti. Krešić (2010) navodi primer iz srednjevekovnog Dubrovnika, gde je, nakon izgradnje centralizovanog sistema za vodosnabdevanje, donet zakon sa ciljem regulisanja količina vode koja se sme koristiti u kome se navodi : „*Odseći će se desna ruka svakome ko otvori ili začepi kanal zbog čega bi se voda razlivala ili bi joj se tok poremetio*“. Tokom vekova, ovaj drevni princip očuvanja vodnih resursa zamenjen je modernijim i civilizovanijim pristupom, ali sa istom porukom: zabranjeno je eksploatisati više vode nego što je dozvoljeno zakonskom regulativom (vodnom dozvolom) ili prirodnim uslovima.

Generalno posmatrano, upravljanje podzemnim vodnim resursima može se definisati kao *proces koji treba da obezbedi dovoljne količine vode odgovarajućeg kvaliteta, koje bi podmirile potrebe u svakom trenutku, uz ograničenje da su te potrebe racionalne i da nema rasipanja vode* (Krešić, 2013). Naravno, ovakva definicija podrazumeva korišćenje podzemnih vodnih resursa isključivo u svrhe vodosnabdevanja stanovništva pijaćom vodom, odnosno voda se posmatra kao potrošačka kategorija (engl. *consumptive water*). U tom smislu, Krešić (2013) navodi nekoliko uslova koji se moraju ispuniti ako se voda koristi:

- Obezbeđivanje jasno definisane količine vode koju je potrebno sprovesti do svih korisnika uz pomoć određenih inženjerskih zahvata;
- Uspostavljanje zona sanitarne zaštite kako je regulisano zakonskim aktima i pravilnicima;
- Obnavljanje vodnih resursa koji se eksploatišu.

Isti autor navodi i tri preduslova koja se moraju ispuniti da bi se napravio ostvariv plan upravljanja resursima:

- Poznavanje hidrogeoloških i hidroloških karakteristika sliva i uslova prihranjivanja i dreniranja izdani;
- Praćenje (monitoring) kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika izdani i samog vrela;
- Prediktivno modeliranje kvalitativnih i kvantitativnih parametara podzemnih voda u prirodnim i veštačkim uslovima (posebno kada se izvode inženjerski zahvati).

Upravljanje vodnim resursom bi trebalo da bude implementirano bez obzira na to da li se isti koristi ili ne. Očuvanje podzemnih vodnih resursa koji se ne eksploatišu treba da bude fokusirano na preventivnu zaštitu podzemnih voda. Ovaj ekološki aspekt je naročito važan, pre svega imajući u vidu tendenciju opadanja nivoa podzemnih voda odnosno izdašnosti karstnih vrela koju pokazuje većina studija i istraživanja uticaja klimatskih promena na podzemne vode (Stevanović et al. 2012).

Gledano kroz istoriju, sve do druge polovine dvadesetog veka, pri eksploataciji podzemnih voda najvažnije je bilo obezbediti dovoljnu količinu resursa za vodosnabdevanje ili industrijske potrebe u tom trenutku, ne uzimajući u obzir zavisne ekosisteme, nizvodne korisnike i predikciju opadanja nivoa ili količinu vodnih resursa u budućem periodu ukoliko se crpi više vode nego što se infiltrira. Takav stav je posebno izražen u dvadesetom veku kada je akcenat pre svega bio na obezbeđivanju količina vode koje su potrebne za piće i industriju, koja se u ovom periodu intenzivno razvijala.

Brojni su primeri u svetu gde su, usled neadekvatnog korišćenja i prekomerne eksploatacije, tj. opadanja nivoa podzemnih voda, bunari i karstna vrela potpuno presušili. Jedan od takvih primera navodi Krešić (2010) kada je grupa vrela Komanči (Fort Stokton, Teksas, SAD) usled prekomerne eksploatacije potpuno presušila. Ova grupa od 6 vrela koja su drenirala Komanči krečnjake ukupnom izdašnošću od 66 ft³/s (tj. oko 1,87 m³/s) služila je drevnim Indijancima hiljadama godina za vodosnabdevanje. Od 1875. godine ova grupa vrela je korišćena za navodnjavanje površine od 6.200 akra (oko 25 km²). Intenzivna eksploatacija podzemnih voda uzrokovala je opadanje nivoa podzemnih voda u izdani, što je direktno uticalo na izdašnost vrela koja je počela da opada u maju 1947. godine. Uvidevši posledicu prekomerne eksploatacije, odnosno da ona vodi u precrpljivanje rezervi podzemnih voda, nadležne ustanove su 1954. tražile ograničenje količina voda koje se mogu koristiti za navodnjavanje, tako da se ne narušava dodatno prirodno isticanje Komanči izvora. Zahtev je odbijen, tako da su Komanči izvori potpuno presušili u martu 1961. godine.

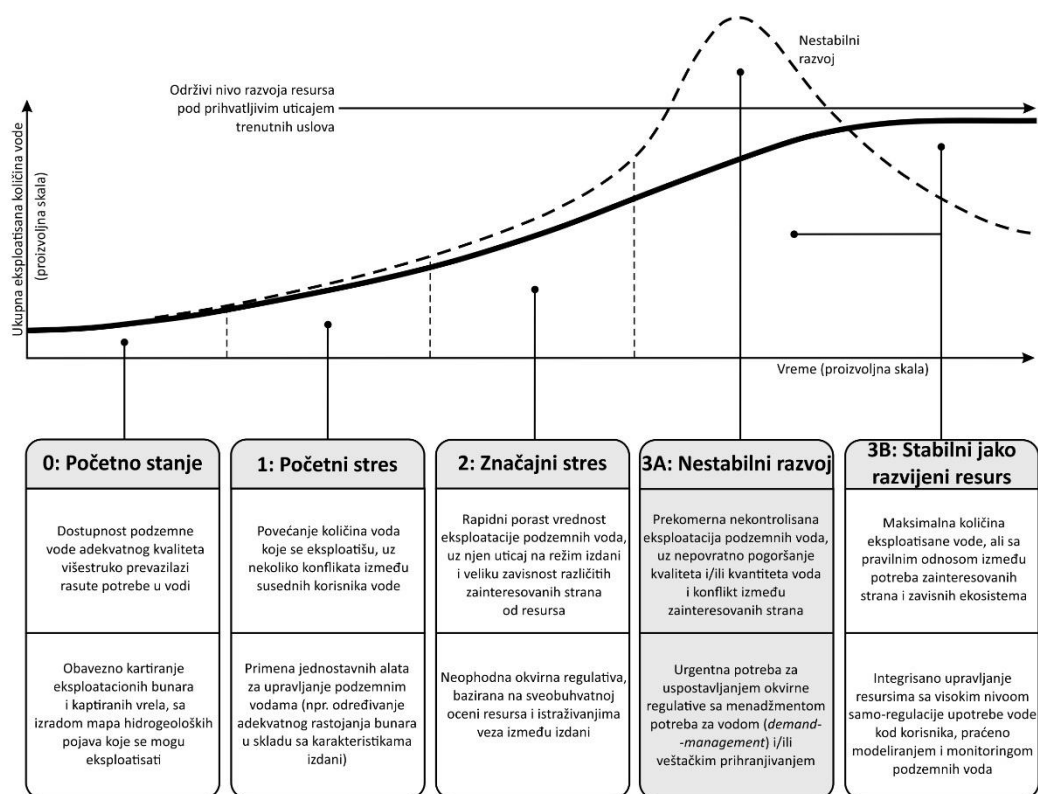
Sličan primer navodi i Stevanović (2010b; 2019), u kome je usled prekomerne eksploatacije potpuno presušilo vrelo Ras el Ain u Siriji, u pograničnom pojasu sa Turskom. Naime, grupa od 13 izvora činila je zonu dreniranja Ras el Ain. Površina sliva je procenjena na 8.000 km², a izdan je formirana u eocenskim krečnjacima, miocenskim evaporitima i krečnjacima i bazaltnim stenama. Prema navodima Burdon & Safadi (1963), izdašnost grupe vrela Ras el Ain oscilirala je od 34,5 do 107,8 m³/s, što je ovo vrelo svrstavalo u red najsnažnijih na svetu. Međutim, ovo vrelo je presušilo zbog nadeksploatacije podzemnih voda bunarima, kojih je na hiljade izbušeno u zaleđu vrela, tj. u slivnom području, uglavnom na teritoriji Turske za navodnjavanje polja pamuka. Nažalost, sve to uslovalo je potpuno iscrpljenje podzemnih vodnih resursa i sva je prilika da nikakve remedijacione mere neće pomoći da se ovaj resurs u potpunosti obnovi. Posebnu težinu u svemu ovome ima činjenica da je ova grupa vrela snabdevala vodom reku Kabur koja je direktna pritoka Eufrata. Presušivanjem vrela Ras el Ain, reka Eufrat ostala je bez velikog dela vode koja je značajno doprinosila baznom oticaju. Na ovom primeru može se uvideti zanemarivanje ekološkog protoka zarad obezbeđivanja dovoljnih količina vode za vodosnabdevanje i navodnjavanje.

Pri definisanju koncepta upravljanja podzemnih voda trebalo bi razmotriti i osetljivost hidrogeološkog sistema na pogoršanje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika, odnosno treba uključiti zavisne ekosisteme i nizvodne korisnike (Krešić, 2013). Slika 3.1 prikazuje evoluciju jednog hidrogeološkog sistema koji se eksploatiše za potrebe vodosnabdevanja, kao i stanja sistema u svakom trenutku uticaja eksploatacije vode (tzv. *hidraulički stres*).

Racionalno upravljanje podzemnim vodama koje se koriste u vodosnabdevanju, industriji ili za navodnjavanje je ključalno za očuvanje resursa i njegovo buduće korišćenje. Međutim, prilikom definisanja potrebnih količina voda, moraju se uzeti u obzir i zavisni ekosistemi i nizvodni korisnici.

Uporedo s ovim, tekla je globalna industrijalizacija, što je dodatno uticalo na životnu sredinu, te se stoga sredinom dvadesetog veka javljaju prvi kritički osvrti na uticaj razvoja industrije na životnu sredinu objavljivanjem nekoliko analiza (npr. Leopold, 1949 i Carson, 1962). Ovi

radovi, iako nenaučnog karaktera, bili su pionirski poduhvati u osveščivanju naučne zajednice da industrijalizacija osim pozitivnih osobina, ima i negativnih uticaja, posebno na stanje životne sredine. U početku, uticaji na životnu sredinu bili su fokusirani na pojedinačne slučajeve, odnosno razmatrani su uticaji konkretnih industrijskih postrojenja na lokalnu životnu sredinu. Tek kasnijih godina dvadesetog veka, dolazi do formiranja koncepta održivog razvoja i zaštite celokupnog ekosistema na globalnom nivou. Tako nešto je bilo omogućeno donošenjem dokumenta **Naša zajednička budućnost** (engl. *Our Common Future*) koji je 1987. godine donela Svetska komisija za razvoj životne sredine (engl. *World Commission on Environmental Development*) poznatija kao **Brundtland komisija**. Autori ovog dokumenta se fokusiraju na ključne probleme koji utiču na stanje životne sredine u godinama koje dolaze, istovremeno uvodeći novi termin **održivi razvoj** (engl. *sustainable development*) koji predstavlja ključno rešenje problema očuvanja životne sredine. Termin **održivi razvoj** u ovom izveštaju se definiše kao **razvoj koji zadovoljava sve potrebe sadašnjosti ne uskraćujući mogućnost budućim generacijama da takođe zadovolje svoje potrebe**. Ovim dokumentom je prvi put postavljeno ograničenje (u određenom obimu) razvijenim zemljama i industrijama da dalje zagađuju životnu sredinu zarad sopstvenog prosperiteta i istaknut je uticaj pojedinca na zaštitu životne sredine (Brinkmann & Garren, 2011).

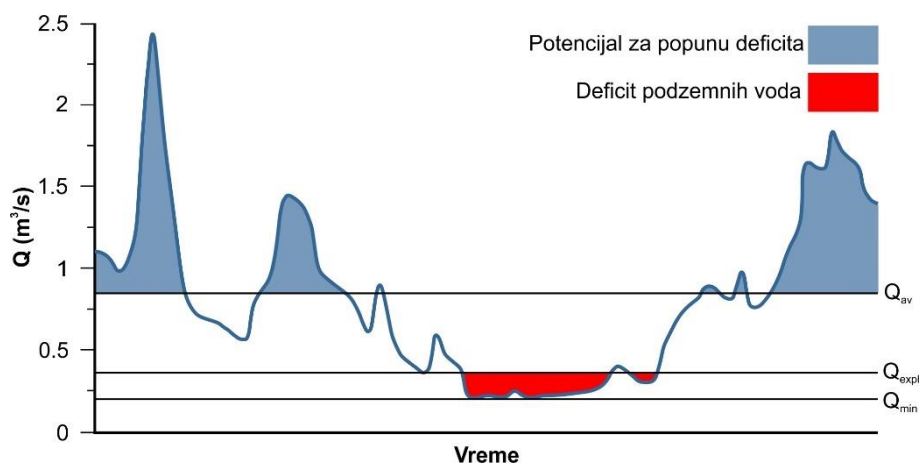


Sl. 3.1. Faze razvoja podzemnih vodnih resursa i odgovarajući zahtevi pri njihovom upravljanju (Tuinhof et al. 2002–2005, preuzeto iz Krešić, 2013)

Ukoliko se definicija održivog razvoja posmatra sa aspekta podzemnih vodnih resursa, ona bi značila da je dozvoljeno koristiti onu količinu podzemnih voda koja će obezbediti i budućim generacijama da je konzumiraju. Budući da je ova definicija vrlo relativna, uveden je novi pojam koji bliže određuje količinu vode koju je dozvoljeno koristiti. Radi se o **bezbednom proticaju** (engl. *safe yield*) koji podrazumeva određivanje količine podzemne voda koja se može iscrpeti iz izdani bez značajnog uticaja na životnu sredinu (Meinzer, 1920). Takođe, neki autori smatraju da se bezbedni proticaj obezbeđuje ukoliko je količina eksploatisane vode jednaka prosečnoj godišnjoj vrednosti vodozamene, odnosno prihranjivanja izdani, bilo prirodnim bilo

veštačkim putem. Međutim, ovakvu definiciju bezbednog proticaja mnogi naučnici i stručnjaci smatraju kontroverznom i netačnom, imajući u vidu da se veštačkim crpenjem podzemne vode iz izdani, narušava njen prirodni režim, odnosno ostali parametri bilansa. Drugim rečima, ukoliko se poremeti prirodni režim isticanja podzemnih voda veštačkom eksploatacijom, doći će do negativnih uticaja i na ostale članove bilansne jednačine, što bi značilo da je koncept bezbednog proticaja praktično mit, tj. da on zapravo ne postoji (Bredehoeft, 2002; Devlin & Sophocleous, 2005; Alley, 2007; Krešić, 2013). Bredehoeft (2002) smatra da je crpenje podzemnih voda nezavisno od prihranjivanja izdani, već od dinamičkog odziva izdani na održivi razvoj.

Stoga, koncept bezbednog proticaja i dalje nije definisan do kraja, imajući u vidu neslaganje različitih autora po ovom pitanju. Neki autori smatraju da će povećanje količina voda koje se veštački eksploatišu povećati i vrednosti prihranjivanja izdani, odnosno da će se privući dodatne količine vode iz susednih izdani, što može izazvati pozitivne efekte, ali i problem pogotovo u karstnim hidrogeološkim sistemima. Takođe, navlačenje voda iz susednih izdani ili površinskih vodnih tela može prouzrokovati narušavanja njihovih prirodnih ravnoteža. Sa druge strane, eksploatacija karstnih podzemnih voda uniformnom količinom tokom jedne hidrološke godine može u jednom trenutku biti veća od količine prihranjivanja izdani u tom hidrološkom ciklusu. Takav slučaj obično se javlja u letnjim mesecima, kada vode ima najmanje, a potrebe su najveće. Tada može doći i do crpenja statičkih rezervi, ukoliko se nivo podzemnih voda obori ispod minimalnog godišnjeg nivoa. Ovakav koncept je jedino moguć kada sa sigurnošću možemo ustanoviti da će ova „pozajmica“ karstnih podzemnih voda biti kompenzovana prolećnim i jesenjim maksimumima, koji će obnoviti i statičke i dinamičke rezerve (Sl. 3.2). Ovaj proces se naziva *nadeksploatacija* i jedan je od primera regulacije karstne izdani, kada je neophodno obezbediti dovoljne količine podzemnih voda za piće, ali i zavisne ekosisteme.



Sl. 3.2. Tipični hidrogram jednog karstnog vrela, sa prikazanim potencijalom za popunu deficita podzemnih voda, prouzrokovanog nadeksploatacijom podzemnih voda; Legenda: Q_{av} – Prosečna godišnja izdašnost karstnog vrela; Q_{expl} – Eksploataciona količina podzemnih voda; Q_{min} – Minimalna godišnja izdašnost karstnog vrela (Stevanović & Radulović, 1997; Stevanović, 2015d)

3.2 Pravna regulativa u domenu menadžmenta vodnih resursa – Okvirna direktiva o vodama i prateći Vodiči

Simultano sa industrijskim i naučnim napretkom tokom dvadesetog veka, ali i globalnim porastom broja stanovnika u svetu, potrebe za pijaćom vodom su se takođe povećavale. Generalno, oko dva puta više vode je potrebno stanovništvu danas nego pre 40 godina. U skladu

sa ekspanzijom svetske populacije, primarni cilj i dalje je bio obezbeđivanje dovoljnih količina vode za piće, bez obzira na zaštitu životne sredine i obnavljanje podzemnih vodnih resursa. Takav pristup doveo je do deterioracije kvantitativnih i kvalitativnih osobina podzemnih voda u nekim oblastima, a negde čak i do iscrpljivanja rezervi voda. Iz tih razloga, tokom sedamdesetih i osamdesetih godina donošeni su različiti pravni akti i propisi čiji je cilj bio zaštita voda koje se koriste za vodosnabdevanje, ali ona uglavnom nisu rezultirala očekivanim poboljšanjima (Stevanović, 2011).

Istorijat zakonske regulative u oblasti evropskog vodnog prava datira još od kraja sedamdesetih godina dvadesetog veka, kada Regulatorni okvir Evropske unije počinje sa radom usvojivši *Direktivu o zaštiti podzemnih voda od zagađenja uzrokovanog određenim opasnim materijama* 1979. godine, koja je 2013. god. ukinuta. Početkom 80-ih godina prošlog veka, tačnije 1982. godine Generalni direktorat za životnu sredinu, zaštitu potrošača i nuklearnu bezbednost Evropske unije izvršio je značajnu kvantitativnu procenu podzemnih vodnih resursa u državama članicama.

Nakon toga, početkom devedesetih godina prošlog veka, doneta je Deklaracija sa Ministarskog seminara o podzemnim vodama održanog u Hagu 1991. godine. Ova Deklaracija ističe potrebe za preventivnim delovanjem radi sprečavanja dugoročnog pogoršavanja kvaliteta i kvantiteta podzemnih i površinskih vodnih resursa. U godinama koje slede, predlagana je revizija ove Deklaracije (1992. i 1995. godine), da bi 25. novembra 1996. god. od strane Evropske unije bio usvojen predlog akcionog programa za integrisanu zaštitu i upravljanje podzemnim vodama.

Posledično, Evropski parlament je zatražio od relevantnih institucija da uspostave neophodni zakonski okvir koji će bliže odrediti evropsku zakonsku regulativu u oblasti voda. To je rezultiralo donošenjem **Okvirne direktive o vodama** Evropske unije, oktobra 2000. godine (*Water Framework Directive EU/WFD – 2000/60/EC*, u daljem tekstu ODV), kojom je predviđen zaokret u odnosu čoveka prema prirodnim vodnim resursima. Ovim dokumentom podzemne vode se po prvi put tretiraju kao integralni deo životne sredine, podjednako važan sa aspekta zaštite. Osnovni koncept ove direktive zasniva se na očuvanju, zaštiti i poboljšanju kvaliteta podzemnih voda koju treba obezbediti pre svega preventivnim delovanjem u cilju otklanjanja potencijalnih zagađivača. Već u samom uvodu ODV jasno se ističe odnos prema vodi, za koju se kaže da *“nije komercijalni proizvod kao drugi, već nasleđe koje mora biti šticeeno, branjeno i tretirano kao takvo”*¹⁰, čime se u prvi plan ističe socijalna kategorija vode.

Politika odnosa EU prema vodi, sadržana u ODV zasniva se na upravljanju vodnim resursima na nivou rečnih slivova, čime se ističe međunarodna koordinacija kako među zemljama članicama EU, tako i među zemljama koji su u procesu pregovaranja o članstvu. Kao cilj implementacije ODV figuriše dovođenje kvalitativnih karakteristika voda u *“dobro stanje”*, koje podrazumeva proces dovođenja prirodnih voda (među njima i podzemnih) u stanje optimalnih fizičko-hemijskih i ekoloških karakteristika (samo kod površinskih voda). Zahtevano *“dobro stanje”* je definisano preko dva parametra: *hemijskog* i *kvantitativnog*. Hemijski parametar označava praćenje maksimalnih dozvoljenih koncentracija određenih elemenata u vodi, koje nisu egzaktno određene već ostavljene svakoj državi potpisnici ODV da odredi na osnovu konkretnih geoloških, klimatskih, strukturnih i drugih faktora. Ovakav pristup je doprineo donošenju „Čerke“ Direktive o podzemnim vodama decembra 2006. godine¹¹.

Drugi parametar koji definiše *“dobro stanje”* podzemne vode jeste kvantitet koji se valorizuje preko stanja nivoa podzemne vode. Ni ovde ne postoji precizna kvantifikacija, odnosno kritična

¹⁰ *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council – establishing a framework for Community action in the field of water policy, p.1*

¹¹ *Groundwater protection in Europe, p. 11*

vrednost, ali je generalno neophodno "da se obezbedi nivo koji ne ugrožava raspoloživi resurs podzemne vode dugogodišnjim korišćenjem, i koji osigurava da neće doći do neuspeha u dostizanju ekoloških ciljeva u pridruženim površinskim vodama, niti ugrožavanja kopnenih ekosistema"¹². Time je definisano da, ukoliko je nemoguće popraviti kvalitet podzemnih voda u periodu od 15 godina¹³, onda je neophodno sačuvati status onakav kakav je zatečen u vreme donošenja ODV.

Imajući u vidu raznolikost (hidro)geoloških karakteristika prostora celokupne Evrope, Direktivom nije bilo moguće dati uniformni koncept, odnosno metodologiju kojom bi se identifikovao status vodnih tela podzemnih voda, a koji bi bio aplikativan za svaku državu članicu EU. Iz tih razloga, publikovan je set prateće dokumentacije zajedničkog naziva – Zajednička strategija implementacije za Okvirnu Direktivu o Vodama (engl. *Common Implementation Strategy – CIS*) koje su donesene u cilju definisanja jedinstvenih kriterijuma pri procesu karakterizacije i delinacije vodnih tela podzemnih voda u Evropi. Ovi dokumenti – Vodiči, iako imaju za cilj uspostavljanje generalnog metodološkog koncepta, moraju biti prilagođeni svakom konkretnom primeru na kome se primenjuju. Tako, postoji ukupno 37 CIS Vodiča koji bliže određuju primenu ODV, a sa aspekta podzemnih voda najznačajniji su:

- **CIS Vodič br. 2** – *Identifikacija vodnih tela;*
- **CIS Vodič br. 3** – *Analiza pritisaka i uticaja;*
- **CIS Vodič br. 7** – *Monitoring pod Okvirnom direktivom o vodama;*
- **CIS Vodič br. 15** – *Monitoring podzemnih voda;*
- **CIS Vodič br. 16** – *Podzemne vode u zaštićenim područjima pitkih voda;*
- **CIS Vodič br. 18** – *Status podzemnih voda i ocena trenda;*
- **CIS Vodič br. 26** – *Procena rizika i upotreba konceptualnih modela podzemnih voda;*
- **CIS Vodič br. 34** – *Metodologija bilansiranja vodnih tela.*

Među navedenim CIS vodičima koji se tiču podzemnih voda, najširu upotrebu imaju Vodiči br. 2, 3, 7, 15, 18 i 34. CIS Vodič br. 2 razmatra metodologiju delinacije (izdvajanja) vodnih tela podzemnih voda. Za pravilno određivanje vodnog tela u karstu neophodno je obaviti detaljna hidrogeološka istraživanja, koja će pokazati vertikalno i horizontalno rasprostranjenje zatvorenih delova karsta, kao i pravce cirkulacije vode, na osnovu čega se vodno telo može ograničiti. Vodič br. 2 o identifikaciji vodnih tela razmatra, takođe slučajeve izdvajanja vodnih tela u okviru izdanih slojeva koja je razdvojena vodonepropusnim slojem. Pored toga, izdvajanje vodnih tela na velikim dubinama može biti diskutabilno iz više razloga, koji se najčešće odnose na neodgovarajući prirodni kvalitet takvih voda ili neopravdanost eksploatacije zbog visoke cene.

CIS Vodič br. 3 odnosi se na analizu pritisaka i negativnih uticaja na vodne resurse u skladu sa ODV. Ovaj Vodič navodi glavne korake koje treba preduzeti pri oceni pritisaka i negativnih uticaja: identifikacija uzroka negativnih uticaja; identifikacija značajnih pritisaka; ocena negativnih uticaja na podzemne vode; evaluacija verovatnoće neuspeha u ispunjenju zadatih ciljeva. Da bi se uspešno ispunila sva četiri koraka, Vodič ističe tri osnovna elementa koja daju najznačajnije informacije o vodnom telu sa aspekta identifikacije pritisaka i ocene uticaja:

- Karakterizacija vodnih tela – klimatske, (hidro)geološke, pedološke i dr. karakteristike;
- Podaci monitoringa kvaliteta i kvantiteta podzemnih voda;
- Zadati ciljevi – neophodno je uspostaviti željeni status podzemnih voda, kako bi se trenutno stanje moglo uporediti sa njim u cilju evaluacije negativnog uticaja.

¹² Stevanović Z. 2011: *Menadžment podzemnih vodnih resursa*, p. 198

¹³ Okvirna direktiva o vodama EU je doneta 23. X 2000. godine, kada je precizirano da se do 2015. godine osigura "dobar status" podzemnih voda.

Monitoring podzemnih voda predmet je posebnog vodiča u okviru zakonske regulative Evropske unije iz domena vodnog prava. CIS Vodič br. 15 za monitoring podzemnih voda u sebi sadrži sledeće osnovne principe (Stevanović et al. 2020b):

- Programi monitoringa podzemnih voda treba da obezbede informacije koje će omogućiti ocenu da li su ciljevi Okvirne direktive o vodama dostignuti ili će biti dostignuti;
- Programi monitoringa podzemnih voda treba da obezbede sprovođenje procedure ocene rizika, a to podrazumeva "razumevanje konceptualnog modela" sistema (prihranjivanje – cirkulacija – isticanje podzemnih voda);
- Monitoring mreža podzemnih voda treba da bude reprezentativan za konkretno vodno telo podzemnih voda;
- Vodna tela podzemnih voda mogu biti grupisana za potrebe monitoringa;
- Program monitoring mreže podzemnih voda treba da uvaži trodimenzionalni karakter vodnih tela podzemnih voda i njihovu prostornu i vremensku varijabilnost;
- Izbor lokacija za monitoring punktove treba da bude usklađen sa ciljevima monitoringa i sa poznavanjem starosti i/ili vremena kretanja podzemnih voda;
- Monitoring podzemnih voda treba da čini integrativni monitoring sa ostalim monitoring mrežama, tj. da sa njima bude komplementaran (posebno sa monitoring mrežom površinskih voda).

Prema Stevanović et al. (2020), načelo integrativnosti monitoringa vodnih resursa proističe iz načela ODV da je "životna sredina kontinuum". Integrativnim monitoringom se prate stanja različitih ali međusobno povezanih elemenata životne sredine, pri čemu posebno čvrste relacije treba da ostvaruju monitoring podzemnih i površinskih voda.

Sa aspekta ocene kvalitativnog statusa podzemnih voda, odnosno pritiska na kvalitet podzemnih voda, najvažniji je CIS Vodič br. 18, koji daje smernice za određivanje kvalitativnog i kvantitativnog statusa podzemnih voda. Sledeći elementi imaju značajnu ulogu pri definisanju hemijskog (kvalitativnog) statusa podzemnih voda:

- *Kriterijum na osnovu koga se definiše kvalitativni status* – standard vode za piće, kritične vrednosti (engl. *threshold values*) ili neki drugi referentni standard;
- *Grupisanje raspoloživih podataka* – prema preporuci Vodiča, prikupljanje i grupisanje podataka za 2 prethodne godine, kako bi se mogla proračunati prosečna vrednosti parametra. Ukoliko je potrebno, koristiti podatke prethodnih 6 godina monitoringa;
- *Određivanje površine VT PV gde je utvrđena koncentracija konkretnog hemijskog parametra iznad usvojenog standarda* – potrebno je definisati i naznačiti svaki hemijski parametar koji je iznad odabranog referentnog standarda, grupisati podatke koji ukazuju na povišenu koncentraciju i odrediti prostor na vodnom telu PV na kome je rasprostranjena povišena koncentracije parametra (u planu i profilu);
- *Lokacija gde dolazi do odstupanja vrednosti hemijskog parametra od usvojenog standarda;*
- *Nivo sigurnosti ocene kvalitativnog statusa.*

CIS Vodič 34 sadrži preporuke u vezi sa metodologijom i značajem izrade bilansa vodnih resursa. Ovaj vodič ističe neophodnost proračuna bilansa vodnih resursa kako bi se na što bolji način napravila ravnoteža između potrebe za vodom i raspoloživih resursa, što je jedan od osnovnih preduslova za postizanje glavnih ekoloških ciljeva ODV – dobar kvantitativni status vodnih tela podzemnih voda.

Takođe, ovaj Vodič ističe i bilansiranje vodnih resursa kao alat koji pomaže identifikaciji vodnih tela (ili čak i slivova, u zavisnosti od razmere posmatranja) koji su pod kvantitativnim pritiskom i za koje treba predložiti mere za poboljšanje statusa, identifikaciji faktora koji utiču na loš kvantitativni status i identifikaciji nedostajućih podataka koji figurišu pri oceni kvantitativnih pritisaka. Kada je reč o programu mera, proračun vodnog bilansa može pomoći pri proceni efikasnosti i relevantnosti predloženih mera za postizanje dobrog statusa, kao i pri revaluaciji postojećih vodnih dozvola za eksploataciju vode.

3.3 Evropska iskustva u primeni ODV

Zaštita i racionalna eksploatacija vodnih resursa jedan je od osnovnih ciljeva Okvirne direktive o vodama. Ova Direktiva predlaže valorizaciju vodnih resursa i definisanja pritisaka na njih donošenjem planskih dokumenata u vidu **Planova upravljanja rečnim slivom** (engl. *River Basin Management Plan*, u daljem tekstu PURS).

PURS predstavlja instrument kojim se direktno analiziraju karakteristike podzemnih i površinskih voda i uspostavljaju osnove za menadžment vodnih resursa. Ovi dokumenti postavljaju ciljeve vezane za celokupne vodne resurse i sumiraju sve mere koje su neophodne da bi se ti ciljevi dostigli. PURS su zapravo osnovni dokumenti vodnog zakonodavstva koji određuju principe korišćenja i zaštite vodnih resursa i predstavljaju alternativu nekadašnjim vodoprivrednim planovima. Osnovna razlika je da su sada osnovne jedinice slivovi, a ne više države kao subjekti upravljanja vodnim resursima (Stevanović et al. 2015).

Budući da su vode (kao glavni predmet kojim se PURS bave) usko povezane sa zemljištem, bilo da je reč o površinskim ili podzemnim vodama, PURS moraju uključiti i komponentu korišćenja zemljišta, odnosno prostornog planiranja. *Zakon o vodama RS* (Sl. glasnik RS 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018) i *Strategija upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije do 2034. godine* ("Sl. glasnik RS, br. 3/2017) navode da PURS u Srbiji treba da obuhvate "vodotoke koji se smatraju značajnim za teritoriju sliva Dunava u Srbiji, odnosno sve vodotoke sa slivnom površinom većom od 500 km², kao i sve prekogranične vodotoke čija je slivna površina veća od 100 km², ili su predmet postojećih bilateralnih sporazuma sa susednim državama, tj. vodna tela površinskih i podzemnih voda na vodnom području, utvrđena *Pravilnikom o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda* (Sl. glasnik, 96/10), sa slivovima većim od 500 km²".

PURS mora sadržati i Programe mera za dostizanje dobrog statusa vodnih resursa. Svaki PURS treba biti donet na nivou velikih rečnih slivova, prvo na međunarodnom, a zatim na nacionalnom nivou, i da sadrži ocenu kvantitativnog i hemijskog statusa vodnih resursa, organizovanih u okviru vodnih tela (Sl. 3.3). Takav pristup primenjen je na prostoru Evropske unije, gde su prvo doneti PURS koji se nalaze na prostoru više država članica (npr. plan upravljanja rekom Elbom, Rajnom i sl.), da bi zatim bili doneti planovi upravljanja na nacionalnom nivou. PURS se donose na 6 godina, tako da je prvi plan, donet 2009. godine pokrivaio period do 2015. god, da bi drugi PURS obuhvatao period od 2015. do 2021. godine. Trenutno je u većini zemalja EU usvojen treći PURS za period 2022-2027. godina¹⁴.

Isti hijerarhijski pristup primenjen je i na području bivših jugoslovenskih republika, iako je u periodu donošenja prvog PURS, samo Slovenija bila članica EU. Prvo su izrađeni planovi upravljanja Dunavskim i Savskim slivom u delu koji obuhvata međugranični uticaj i koji su bili koordinisani međunarodnim komisijama (ISRBC, 2013; ICPDR, 2014), sastavljenim od zemalja kojima pripadaju delovi slivnog područja. Nakon toga, sve republike su pristupile izradi i

¹⁴ https://ec.europa.eu/environment/water/participation/map_mc/map.htm, posećeno 29.6.2022. god.

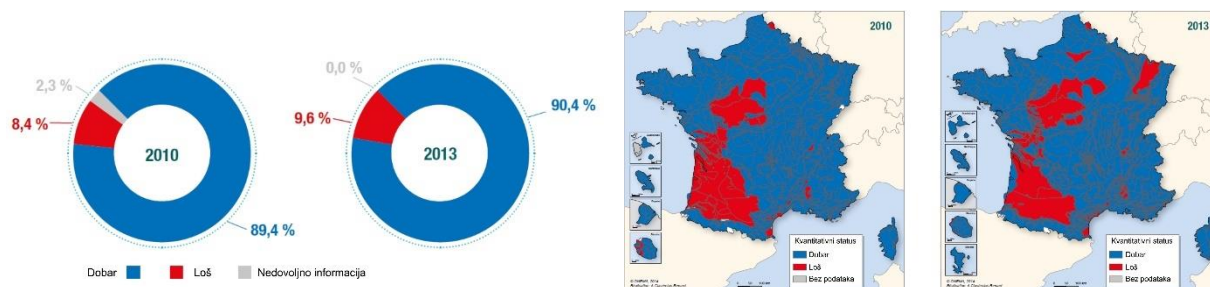
usvajanju nacionalnih planova, odnosno većih slivova (Jadranski, Crnomorski), tako da je u Sloveniji i Hrvatskoj trenutno javna rasprava o trećem PURS za period 2022 – 2027, Bosna i Hercegovina je u pripremi za izradu drugog PURS za period 2022-2027, Crna Gora je u procesu usvajanja prvog PURS, dok su Srbija i Severna Makedonija tek u procesu izrade prvih verzija ovih dokumenata.



Sl. 3.3. Hijerarhija donošenja planova upravljanja vodnim resursima prema ODV

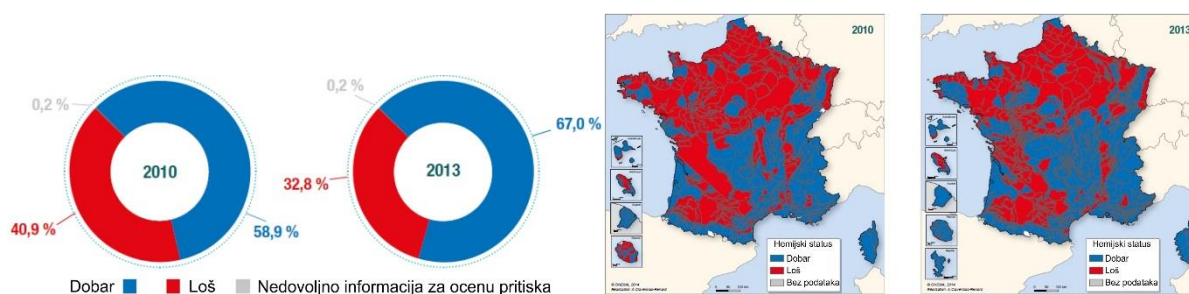
Okvirna direktiva o vodama u PURS uspostavlja koncept određivanja kvantitativnog i kvalitativnog statusa podzemnih voda, na osnovu koga se planiraju dalje aktivnosti za očuvanje i/ili popravljavanje trenutnog statusa. Definisani status vodnih tela usmerava pravac fundamentalnih hidrogeoloških istraživanja, najviše u pogledu uspostavljanja i organizovanja monitoring mreže podzemnih voda. To bi značilo da ukoliko je vodno telo identifikovano da je lošeg statusa, neophodno je preduzeti program mera koje će doprineti poboljšanju statusa, dok u suprotnom slučaju (ukoliko je vodno telo dobrog statusa), treba implementirati preventivne mere koje će održavati dobar status. Evaluacija statusa je iterativni proces i vrši se na 6 godina, kako bi se uvidela efektivnost mera predloženih u PURS.

Primeri definisanja kvantitativnog i kvalitativnog statusa podzemnih voda iz Francuske i Španije, pokazuju da je veliki procenat vodnih tela podzemnih voda dobrog statusa i još uvek neugrožen sa aspekta kvantiteta i kvaliteta. Ove dve države su odabrane s obzirom na to da karstni tereni pokrivaju značajan deo njihove teritorije – 49,6% u Francuskoj, a 29,2% u Španiji (Chen et al. 2017). Na sl. 3.4 može se videti procentualna zastupljenost vodnih tela podzemnih voda dobrog kvantitativnog statusa od 89,4% u 2010. godini, odnosno 90,4% u 2013. god na teritoriji Francuske (Petit & Michon, 2015; Maréchal & Rouillard, 2020). Koncept definisanja statusa podzemnih voda zasnivao se na tome da je dobar kvantitativni status podzemnih voda dostignut kada je zapremina eksploatacane vode manja od obnovljivog kapaciteta izdani, kao i kada je obezbeđeno normalno funkcionisanje zavisnih površinskih ekosistema (močvare, reke i dr.) (Maréchal & Rouillard, 2020).



Sl. 3.4. Kvantitativni status vodnih tela podzemnih voda u Francuskoj u 2010. i 2013. god – procentualna zastupljenost (levo) i prostorna distribucija (desno) (Petit & Michon, 2015; Maréchal & Rouillard, 2020)

Prema Petit & Michon (2015), evaluacija pritiska na kvalitet podzemnih voda u Francuskoj izvršena je na osnovu monitoringa hemijskih parametara podzemnih voda, tako da je u 2010. godini 58,9% vodnih tela podzemnih voda ocenjeno da su dobrog hemijskog statusa, dok je 40,9% bilo lošeg hemijskog statusa. Nakon implementiranja mera za poboljšanje hemijskog statusa podzemnih voda tokom trogodišnjeg perioda, u 2013. godini 67,0% vodnih tela je bilo dobrog, a 32,8% lošeg hemijskog statusa, dok je u obe godine procenat vodnih tela podzemnih voda za koje nije definisan hemijski status bio svega 0,2% (Sl. 3.5). Petit & Michon (2015) navode da je od ukupnog broja vodnih tela podzemnih voda tokom trogodišnjeg perioda, hemijski status 7,6% vodnih tela poboljšan, 89,3% je imalo stagnaciju hemijskog statusa, dok je 2,6% vodnih tela podzemnih voda bilo izloženo degradaciji hemijskog statusa. Vodna tela podzemnih voda kojima je degradiran hemijski status se nalaze u svim delovima zemlje, osim u visokim planinskim masivima Alpa, Pirineja i centralnim masivima, koji su upravo izgrađeni od karbonatnih sedimenata (Sl. 3.5).



Sl. 3.5. Procentualna zastupljenost vodnih tela podzemnih voda prema hemijskom statusu u 2010. i 2013. godini u Francuskoj (levo); Prostorna distribucija vodnih tela podzemnih voda u Francuskoj prema hemijskom statusu u 2010. i 2013. god. (desno) (Petit & Michon, 2015)

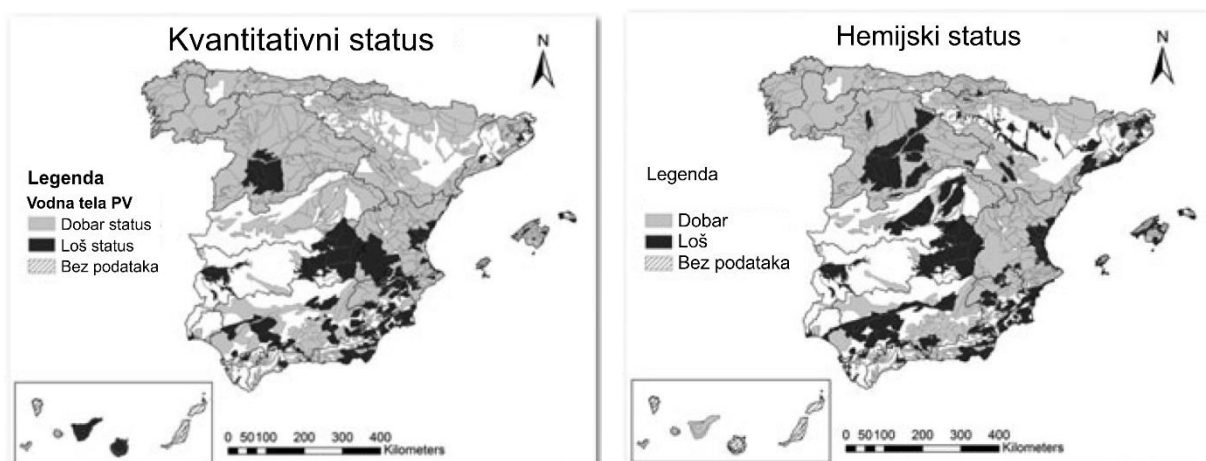
Podzemne vode su značajan resurs sa aspekta vodosnabdevanja stanovništva i u Španiji, budući da je prosečna godišnja eksploatacija podzemnih voda u Španiji oko 7 000 hm³/god, što čini da podzemne vode učestvuju sa oko 22% u ukupnim potrebama za vodom u Španiji (De Stefano et al. 2015). Takođe, procenjuje se da podzemne vode koristi oko 13 miliona stanovnika Španije, odnosno 28% ukupnog stanovništva (López-Geta et al. 2009).

Iste kriterijume za definisanje kvantitativnog statusa podzemnih voda primenila je i ova evropska zemlja, kod kojih 25% vodnih tela od ukupno 777 izdvojenih je lošeg kvantitativnog statusa (De Stefano et al. 2015), što je prikazano na sl. 3.6. De Stefano et al. (2015) navode podatak da 107 vodnih tela podzemnih voda, odnosno oko 14% od ukupnog broja izdvojenih vodnih tela podzemnih voda ima loš hemijski status (Sl. 3.6). Isti autori ističu da od 107 vodnih tela lošeg statusa, 32% ima problem sa salinizacijom (tj. intruzijom slane vode), 26% sadrži visoku koncentraciju nitrata, 22% sadrži zagađenje od nekog difuznog ili punktuelnog zagađivača, dok 20% vodnih tela sadrži povišenu koncentraciju arsena, tj. per- ili trihloretilena.

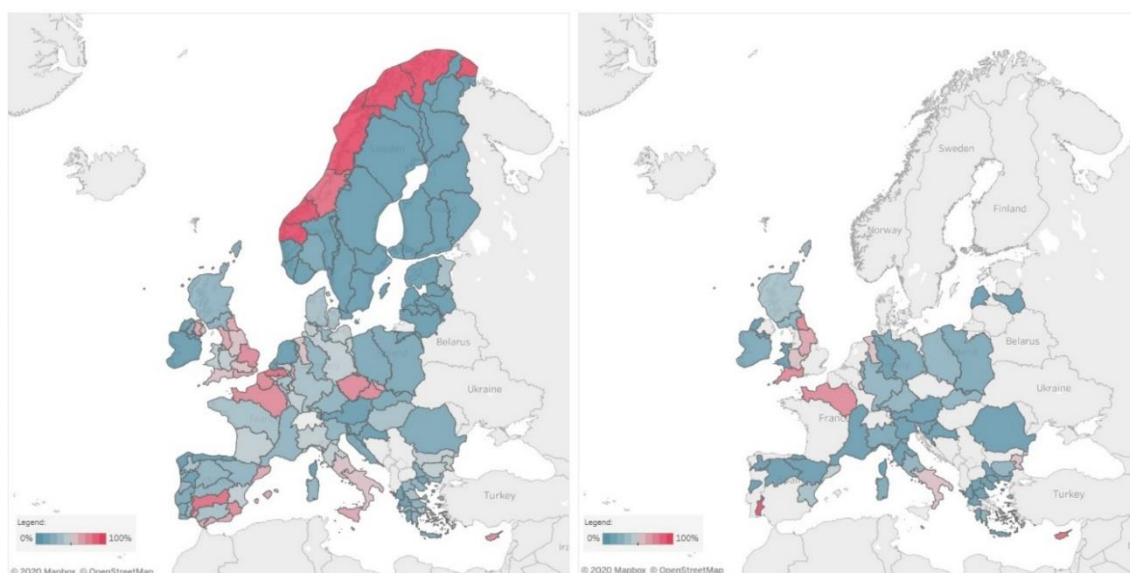
De Stefano et al. (2015) procenjuju da će zaključno sa 2027. godinom oko 80% svih izdvojenih vodnih tela podzemnih voda biti ocenjeno dobrim statusom podzemnih voda, 16% će biti pod pritiskom, dok će svega 4% imati manje restriktivne kriterijume koje treba dostići.

Što se tiče aktuelnog kvantitativnog statusa vodnih tela podzemnih voda na prostoru čitave Evrope, prema podacima Evropske agencije za životnu sredinu (engl. *European Environmental Agency* – EEA), 90% svih vodnih tela podzemnih voda su dobrog kvantitativnog statusa. Kada je reč o dominantnom tipu poroznosti, najveći procenat vodnih tela podzemnih voda dobrog kvantitativnog statusa u EU je u okviru karstnog (93%) i intergranularnog (94%) tipa izdani, dok složeni tip izdani obuhvata najveći broj vodnih tela podzemnih voda lošeg kvantitativnog

statusa (25%). Ova činjenica svoju potvrdu dobija kada se pogleda karta trenutnog kvantitativnog statusa podzemnih voda zemalja EU (Sl. 3.7).



Sl. 3.6. Kvantitativni (levo) i kvalitativni (desno) status vodnih tela podzemnih voda u Španiji (De Stefano et al. 2015)



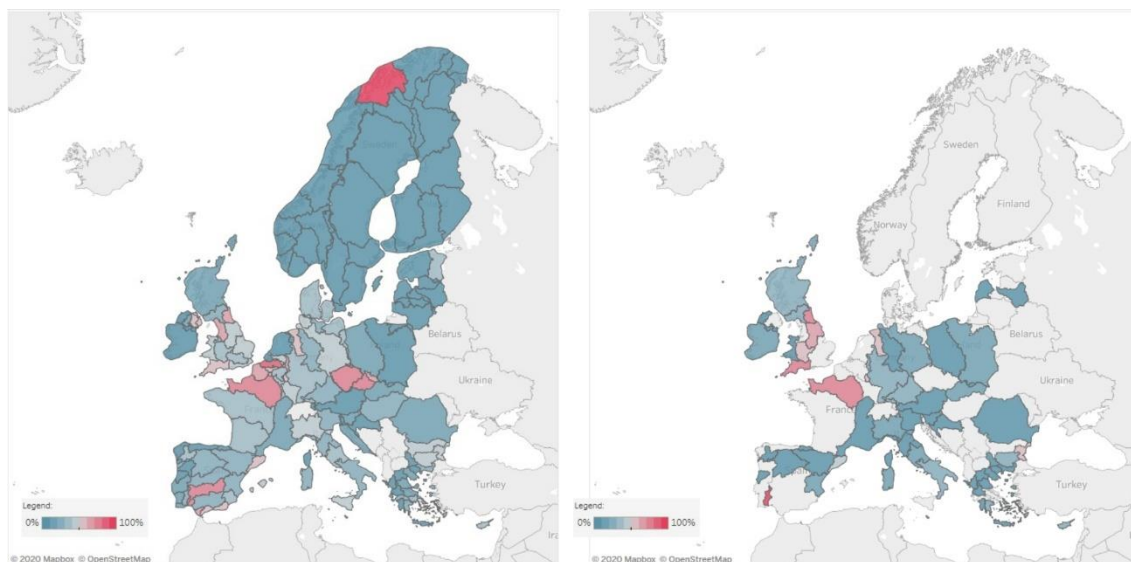
Sl. 3.7. Kvantitativni status svih izdvojenih vodnih tela podzemnih voda u Evropskoj uniji (levo); Kvantitativni status samo karstnih vodnih tela podzemnih voda u Evropskoj uniji (desno). Legenda: plavo – dobar status; crveno – loš status (www.eea.europa.eu)

Kada je reč o celokupnom evropskom prostoru, prema podacima Evropske agencije za životnu sredinu, skoro tri četvrtine svih vodnih tela u Evropi su dobrog hemijskog statusa, dok ostatak od 25% čine vodna tela podzemnih voda lošeg hemijskog statusa (14%) i vodna tela koja su ostala neidentifikovana zbog nepostojanja adekvatnih podataka (11%) (Sl. 3.8). Kada je reč o dominantnom tipu poroznosti, najveći procenat vodnih tela podzemnih voda dobrog kvalitativnog statusa u zemljama EU je u okviru karstnog (77%) i intergranularnog (85%) tipa izdani. Međutim, karstni tip izdani obuhvata i veliki broj vodnih tela podzemnih voda lošeg kvalitativnog statusa (22%).

Hemijski parametar koji najviše utiče na identifikovanje vodnog tela podzemnih voda koje je u lošem hemijskom statusu jeste sadržaj nitrata. Prema izveštajima Evropske agencije za životnu sredinu, u 24 države članice EU, nitrati su uzrokovali loš hemijski status u 18% ukupne površine pod vodnim telima podzemnih voda, dok su na drugom mestu pesticidi sa 6,5% (EEA, 2018).

Poljoprivredne aktivnosti najviše utiču na loš hemijski status vodnih tela podzemnih voda Evrope, dok je na drugom mestu intruzija morske vode.

Sl. 3.8 prikazuje kvalitativni status vodnih tela podzemnih voda u Evropskoj uniji. Tako, na levoj slici prikazan je kvalitativni status vodnih tela podzemnih voda koja su izdvojena u Evropskoj uniji prema pripadajućim rečnim slivovima, dok desna slika prikazuje kvalitativni status samo karstnih vodnih tela u Evropskoj uniji, takođe u smislu pripadnosti rečnom slivu. Sa pomenute slike može se videti da su karstna vodna tela u Evropskoj uniji generalno dobrog hemijskog statusa, tj. nisu pod kvalitativnim pritiskom, osim centralnog i južnog dela Velike Britanije i severne Francuske, odnosno južnog dela Portugala.



Sl. 3.8. Kvalitativni status svih izdvojenih vodnih tela podzemnih voda u Evropskoj uniji prema pripadajućem rečnom slivu (levo); Kvalitativni status samo karstnih vodnih tela podzemnih voda u Evropskoj uniji prema pripadajućem rečnom slivu (desno). Legenda: plavo – dobar status; crveno – loš status (www.eea.europa.eu)

3.4 Neophodne podloge za menadžment vodnih resursa – mogućnosti i ograničenja

PURS podrazumevaju integrisani pristup oceni hemijskog i kvantitativnog statusa vodnih resursa u cilju njihove zaštite, racionalne i održive eksploatacije i preventivnog delovanja na bilo koje hipotetičko pogoršanje statusa (Marinović & Stevanović, 2019). S tim u vezi, postoji nekoliko osnovnih ciljeva koje PURS treba da ispune:

- Ocena sadašnjeg stanja korišćenja vodnih resursa;
- Ocena pritisaka na kvantitet i kvalitet vodnih resursa;
- Predlog i organizacija monitoring mreže vodnih resursa;
- Predlog potrebnih mera za popravku stanja i dugoročno održivo korišćenje vodnih resursa, uz evidentiranje zaštićenih područja i posebno zaštitu zavisnih ekosistema.

Svaki PURS mora sadržati deo koji se odnosi na podzemne vode, budući da su one vrlo često neizostavni deo u ukupnom vodosnabdevanju stanovništva u Evropi i svetu, a neretko i osnovni vid snabdevanja vodom. Stoga, hidrogeološke analize u sklopu PURS podrazumevaju nekoliko neophodnih koraka koji korespondiraju postavljenim ciljevima koje PURS treba da dostigne (Marinović & Stevanović, 2019):

- Delineacija i karakterizacija vodnih tela podzemnih voda;
- Ocena pritisaka na kvalitet i kvantitet podzemnih voda;

- Predlog pozicioniranja monitoring mreže podzemnih voda;
- Predlog programa mera.

Delineacija vodnih tela podzemnih voda predstavlja prvi korak koji se obavlja u sklopu hidrogeoloških analiza u okviru PURS, a vrši se na osnovu geoloških i hidrogeoloških karakteristika i topografije terena. S obzirom na to da su geološke i hidrogeološke karakteristike Evrope jako različite, nije moguće formirati uniformnu metodologiju izdvajanja, već ODV pomoću svoju pratećih dokumenata daje samo smernice za delineaciju.

Definisanje granica jednog karstnog sistema nije nimalo lak zadatak, imajući u vidu činjenicu da je u karstu jako teško odrediti granice sistema, pogotovo jer slivne površine obično sadrže autogene i alogene delove (Stevanović, 2015c), dok sa druge strane, zavisno od sezonskih oscilacija nivoa karstnih podzemnih voda može doći do reorijentacije pravaca tečenja karstnih podzemnih voda (Stevanović, 2015a). Poznati su primeri kada usled nailaska obilnih kišnih epizoda dolazi do rapidnog podizanja nivoa karstnih izdani, što uslovljava aktivaciju nekadašnjih tačaka isticanja karstnih podzemnih voda, koje su na višim kotama, a usled evolucije karstne izdani, danas su u zoni aeracije, odnosno iznad nivoa podzemnih voda. Ovaj fenomen često može uzrokovati prirodnu podzemnu bifurkaciju karstnih podzemnih voda koje tada mogu isticati iz jednog slivnog područja u drugi (Roje – Bonacci & Bonacci, 2013). Takođe, sliv karstnih izdani takođe je teško odrediti iz razloga što se topografska (površinska) i hidrogeološka (podzemna) granica sliva često ne poklapaju, jednim delom ili čak celom dužinom (Herak et al. 1981; Bonacci, 2015; Bonacci & Andrić, 2015; Ristić Vakanjac et al. 2016). Obično je hidrogeološka granica nekoliko puta veća od topografske, na šta jasno ukazuje prosečno isticanje na vrelu i poznavanje vrednosti padavina na konkretnom terenu.

Takođe, problem koji se javlja pri delineaciji karstnih vodnih tela podzemnih voda jeste njihovo obavezno atribuiranje površinskim vodnim telima, što je takođe preporuka ODV u cilju dodeljivanja jedinstvenog kôda po kome će vodno telo nedvosmisleno biti prepoznatljivo u svim analizama. Naime, u hijerarhiji, ODV na prvo mesto stavlja površinska, pa podzemna vodna tela, tako da se podzemna definišu prema pripadajućem rečnom slivu. Takav koncept u karstu često dovodi do grešaka, s obzirom na to da se topografska i hidrogeološka vododelnica u karstu skoro po pravilu ne poklapaju.

Delineacija vodnih tela treba da bude prilagođena razmeri posmatranja, tj. u zavisnosti od toga da li se PURS radi na međunarodnom ili nacionalnom nivou. Generalno, granice vodnih tela podzemnih voda treba da prate konture (hidro)geoloških jedinica, odnosno da budu nezavisne od političkih granica (državnih, pokrajinskih, republičkih i dr.). Takođe, u određenim slučajevima neophodno je izdvojiti i delove terena koji su označeni kao vodonepropusni, a koji imaju bitnu ulogu pri površinskom oticaju i prihranjivanju podzemnih voda. Takvi slučajevi su česti u karstnim izdanima, kada se alogeni deo sliva mora uključiti u okvire granica vodnog tela podzemnih voda. Osim toga, pri procesu delineacije vodnih tela, moraju se uzeti u obzir svi zakonski dokumenti, odnosno literaturni izvori i iskustva zemalja slične geološke građe.

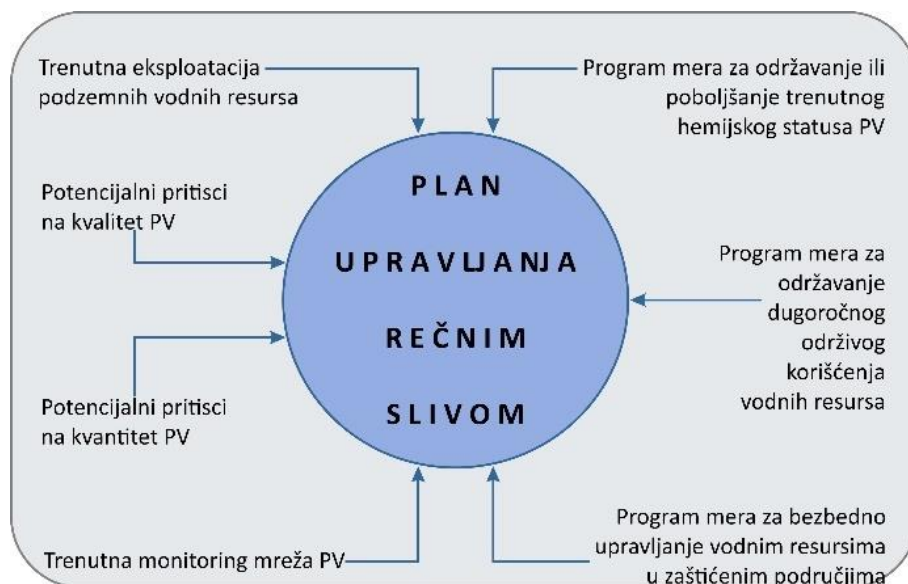
Radi lakše analize i preliminarne delineacije vodnih tela podzemnih voda, Direktiva dozvoljava grupisanje pojedinačnih vodnih tela podzemnih voda. Grupisanje je moguće izvesti prema dva kriterijuma (Stevanović et al. 2015):

- po osnovi istovetne ili slične hidrogeološke funkcije (izdani istog tipa poroznosti koji mogu biti i međusobno odeljeni lateralno ili u vertikalnom profilu, nepropusnim ili slabije propusnim stenama, ali čine jednu funkcionalnu celinu);
- po osnovi regionalne povezanosti (izdani različitog tipa poroznosti, ali u neposrednom ili bliskom kontaktu). Na taj način izbegava se izdvajanje vrlo malih tela podzemnih voda

i ona se posmatraju kao veće celine, što ima svog značaja i u analitičkom, ali i finansijskom smislu (npr. kod uspostavljanja monitoring mreže).

Nakon delineacije vodnih tela podzemnih voda, sledi korak koji umnogome dalje određuje „sudbinu“ vodnog tela, odnosno da li će biti definisano kao loše ili dobro sa aspekta hemijskog ili kvantitativnog statusa. Taj metodološki korak koji definiše vodno telo jeste karakterizacija. Ovaj pojam precizno određuje i opisuje geološke, hidrogeološke, strukturne, petrološke i druge faktore, zatim definiše brzinu vodozamene i geometriju vodnog tela (što je posebno važno, budući da Vodič definiše vodno telo u tri dimenzije), uslove prihranjivanja, cirkulacije i dreniranja, hidrodinamičke uslove, povezanosti podzemnih voda sa površinskim, tj. sa drugim podzemnim vodama i definisanju bilansa, režima i kvaliteta podzemnih voda. Za ocenu kvantitativnog statusa podzemnih voda i pritisaka na kvantitet podzemnih voda, obično se koriste podaci o nivoima podzemnih voda, odnosno procentualna iskorišćenost raspoloživih podzemnih voda u odnosu na eksploataciju. Ocena kvantitativnog statusa preko nivoa podzemnih voda u karstu može biti problematična, budući da npr. nivo podzemnih karstnih voda, npr. u Crnoj Gori može oscilirati i po nekoliko desetina metara samo u toku jednog dana. Sa druge strane, pritisci na kvantitet podzemnih voda se definišu u vidu opterećenja podzemnih voda određenim hemijskim parametrima, za šta je potrebna monitoring mreža podzemnih voda. Ukoliko ona odsustvuje, hemijski status podzemnih voda može biti ocenjen ranjivošću podzemnih voda na zagađenje.

Iz prethodno navedenog, proističu i završni koraci hidrogeološke analize u sklopu PURS, a tiču se projekcije monitoring mreže podzemnih voda i predloga programa mera za poboljšanje statusa podzemnih voda. Monitoring mreža treba biti ravnomerno raspoređena, tako da pokriva sve tipove izdani, ali i da frekvencija osmatranja bude više fokusirana na podzemne vode karstne izdani zbog dinamičnog režima, kao i izdani lošeg kvantitativnog i/ili hemijskog statusa. Program mera treba da sadrži konkretne postupke koje je neophodno preduzeti u cilju popravljivanja lošeg i održavanja dobrog statusa podzemnih voda. Očekivani rezultati u domenu podzemnih voda koje bi svaki PURS trebalo da ispuni dati su na sl. 3.9.



Sl. 3.16. Faktori i rezultat hidrogeološke analize u okviru Planova upravljanja rečnim slivom (Marinović & Stevanović, 2019, modifikovano)

4 KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Karakterizacija karstnih podzemnih voda, kao i metodologija ocene pritisaka na njihov kvalitet i kvantitet zasniva se koncipiranju i testiranju na dobro izučenim područjima, kako bi se mogla dati pretpostavka o pritiscima na podzemne vode karstnih sistema u delimično ili potpuno neizučnim terenima.

Karakterizacija karstnih podzemnih voda podrazumeva definisanje opštih i specifičnih osobina karstnog hidrogeološkog sistema, kao i analizu kvantiteta tj. režima isticanja, bilansa i rezervi podzemnih voda i kvaliteta vode. Poznavanje karakteristika režima karstnih podzemnih voda daje mogućnost predviđanja njihovog ponašanja u uslovima velikih i malih voda, kada se javljaju maksimumi, odnosno minimumi isticanja. Karakterizacija karstnih podzemnih voda podrazumeva opis opštih i specifičnih osobina na osnovu fizičko-geografskih, klimatskih, geomorfoloških, pedoloških, vegetacionih faktora, zatim primenu niza geoloških i negeoloških metoda istraživanja, kao što su terenska prospekcija i analiza postojećih (hidro)geoloških karata u cilju geometrizacije karstnog sistema u planu i profilu, zatim matematičkih i statističkih metoda radi uvida u hidrauličke karakteristike cirkulacije karstnih podzemnih voda i definisanja uticaja ulaznih parametara (kiša i sneg, pre svega) na formiranje isticanja karstnih podzemnih voda na vrelima. Hidrohemijske metode se najčešće primenjuju pri analizi kvaliteta karstnih podzemnih voda, koje se zasnivaju na uzorkovanju i izradi hemijskih, radioloških i mikrobioloških analiza podzemnih voda u karstu.

Nakon definisanja opštih i specifičnih karakteristika karstnog sistema, evaluacija pritisaka na kvantitet i kvalitet karstnih podzemnih voda predstavlja neophodni korak ka održivom upravljanju vodnim resursima, u skladu sa konceptom održivog razvoja. Formiranjem metodologije ocene pritisaka na vodne resurse i njenom primenom na odabrana područja definiše se da li su karstne podzemne vode pod kvantitativnim i/ili kvalitativnim pritiskom.

Modeliranje kvantiteta i kvaliteta karstnih podzemnih voda daje mogućnost predviđanja ponašanja režima ovih voda u budućem periodu, što je naročito važno u periodu velikih i malih voda, kada dolazi do ekstremnih pikova isticanja podzemnih voda, odnosno do minimalne izdašnosti vrela kada treba obezbediti konstantno potrebnu količinu vode, ukoliko je vrelo kaptirano. Takođe, predikcija kvaliteta karstnih podzemnih voda, posebno u maksimumu kada često dolazi do zamućenja voda ili pri eventualnim ekscenim zagađenjima, može dati veoma korisne informacije u vidu sistema za rano upozorenje. Modeliranje kvantiteta i kvaliteta podzemnih voda u vidu formiranja stohastičkog modela režima karstnih podzemnih voda predstavlja takođe neophodni korak i podlogu za optimalno upravljanje podzemnim vodama.

Formiranje logističke regresione jednačine za odabrane karstne sisteme omogućuje predikciju mogućih kvantitativnih pritisaka na neizučnim karstnim terenima, sa minimalnim brojem ulaznih podataka. Upotreba logističkih regresionih modela je česta pri regionalnim istraživanjima, u kojima se identifikuju parametri koji utiču na ispitivane pojave u okviru izučenih područja, kako bi se one transferisale i verifikovale na pojave u neizučnim područjima sa ograničenim obimom ulaznih podataka (Nolan et al. 2015; Ćuk, 2017). Kartama ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda vizuelno se definiše kvalitativni pritisak, tako da procena ovog tipa pritiska na osnovu logističkih regresionih modela nije moguća. Uspostavljanjem monitoring mreže, koja bi kontinuirano pratila hemijske parametre podzemnih voda u vidu vremenskih serija, mogao bi se izraditi model na osnovu koga bi bilo moguće primeniti logističku regresionu analizu.

4.1 Karakterizacija kvantitativne komponente režima karstnih podzemnih voda

4.1.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Padavine, obično u vidu kiše i snega, predstavljaju glavni vid prihranjivanja podzemnih voda karstnih sistema. Stoga, pravilna kvantifikacija veličine padavina kao ulaznog elementa u karstni hidrogeološki sistem je neophodna i prethodi evaluaciji cirkulacije i isticanja karstnih podzemnih voda i formiranju matematičkih relacija kojima se opisuje uticaj ulaznih signala (padavina) na izlazni (isticanje karstnih podzemnih voda). Najčešći slučaj koji se dešava u hidrogeologiji karsta jeste razmatranje samo izmerenih količina padavina bez korekcije stvarno palih kiša i preračunavanja snežnog pokrivača u ekvivalent vode u tečnom stanju, koji je realan pri otapanju snega. Jemcov (2008) navodi najčešće greške pri uključivanju u analizu nekorigovanih vrednosti padavina: zanemarivanje uticaja drugih klimatskih faktora (pre svega vetra) na količinu padavina; zanemarivanje gubitaka na račun intercepcije; zanemarivanje snežnih padavina u ukupnom bilansu karstnih podzemnih voda. Ustanovljeno je da brzina vetra od 5 m/s utiče na to da izmerene vrednosti snežnih padavina iznose samo 22% od stvarnih snežnih padavina, odnosno da izmerene vrednosti kiše iznose 87% stvarno pale kiše (Yang et. al. 1998; Petrič, 2002), tj. da je stvarna vrednost padavina najčešće veća za 5-15% u odnosu na izmerene vrednosti (Petrič, 2002).

Imajući navedeno u vidu, korigovanje padavina u vidu kiše i snega je prethodilo kvantitativnoj karakterizaciji karstnih podzemnih voda odabranih područja. Korekcija padavina izvršena je prema jednačini (4.1) (Bonacci, 1994; Petrič, 2002):

$$P_a = k \cdot P_g + \Delta P_w \quad (4.1)$$

gde su:

P_a – korigovane vrednosti padavina (mm);

k – korekcionni faktor uticaja vetra;

P_g – izmerene vrednosti padavina (mm);

ΔP_w – korekcije usled gubitka vlaženjem (mm), koje iznose 0,03 mm za kišu, odnosno 0,15 mm za sneg.

Nakon korekcija usled gubitaka vlaženjem, korigovane vrednosti padavina su proračunate na osnovu uticaja vetra prema jednačinama (4.2) i (4.3), datim u procentima (Yang et. al. 1998):

Za padavine u vidu kiše:

$$R = \exp(4,606 - 0,041W_s^{0,69}) \quad (4.2)$$

Za padavine u vidu snega:

$$R = 101,04 - 5,62W_s \quad (4.3)$$

gde je W_s brzina vetra u m/s.

Sledeći korak pri korekciji padavina je uzimanje u razmatranje veličine intercepcije, što predstavlja onu količinu vode koja se zadržava na krošnjama drveća, lišću i drugoj vegetaciji tako da zapravo ne dospevaju na površinu terena. Ovu veličinu je praktično nemoguće direktno izmeriti, već se njen proračun vrši na osnovu empirijskih jednačina (4.4) i (4.5) (Prohaska, 2003; Jemcov, 2008):

Za vegetacioni period:

$$T_v = 0,901 \cdot P - 0,8 \quad (4.4)$$

Za vanvegetacioni period:

$$T_{vv} = 0,914 \cdot P - 0,38 \quad (4.5)$$

gde su:

T_v – korigovane padavine u procesu intercepcije tokom vegetacionog perioda (mm);

T_{vv} – korigovane padavine u procesu intercepcije tokom vanvegetacionog perioda (mm);

P – izmerene vrednosti padavina (mm).

Pri proračunu korigovanih padavina u procesu intercepcije za vegetacioni period je razmatran period od 1. aprila do 30. septembra, dok je za vanvegetacioni period usvojen period od 1. oktobra do 31. marta. Ovaj period treba prihvatiti uslovno, budući da u zavisnosti od tipa vegetacije, vegetacioni period može počinjati i završavati se kasnije (npr. hrastove šume gube list sredinom novembra, a olistavaju ponovo sredinom aprila). Ipak, vegetacioni (april-oktobar) i vanvegetacioni (oktobar-april) periodi su određeni kao uslovni početak i kraj vegetacije, a i kako bi bolje korespondirali sa periodom hidrološke godine.

Kada je reč o prihranjivanju karstnih podzemnih voda, osim padavina u vidu kiša, veliku ulogu u ukupnom bilansu podzemnih voda ima i snežni pokrivač, pogotovo u periodu otapanja snega, kada se značajna količina vode može infiltrirati u podzemlje. To je važno pogotovo u visokoplaninskim područjima u kojima je veliko rasprostranjenje karstifikovanih stena, a koja se najčešće odlikuju i visokim vrednostima snežnog pokrivača (npr. Durmitor, Žabljak, Bjelašnica, Jabuka). Stoga, proračun parametra *Vodeni ekvivalent snega* (engl. *Snow water equivalent - SWE*), u vidu jednake visine padavina (u mm vodenog stuba) koje bi se izlučile u tečnom stanju (Jemcov, 2008) predstavlja neophodni korak pri evaluaciji prihranjivanja karstnog sistema. Preračunavanje snežnog pokrivača u SWE najčešće se vrši proračunom na bazi bilansa energije, odnosno na bazi jednačina temperaturnog indeksa, najviše zavisno od toga da li se otapanje snežnog pokrivača odvija tokom kišnog perioda, kada kiša pada preko snega, ili u periodima bez padavina (US Army Corps of Enginners, 1998; Jemcov, 2008). Savremeni pristup proračunu vodenog ekvivalenta snega uključuje automatsku stanicu koja prima energiju preko solarnog panela, zagreva sneg prikupljen u stanici, momentalno ga topi i meri kao kišu. U slučaju postojanja kiše preko snežnog pokrivača, za proračun SWE koriste se jednačine (4.6) za otvorena i delimično pošumljena područja i (4.7) za pošumljena područja:

$$M = (1,33 + 0,239 \cdot kv + 0,0126P) \cdot T + 2,3 \quad (4.6)$$

$$M = (3,38 + 0,0126P) \cdot T + 1,3 \quad (4.7)$$

gde su:

M – visina otapanje snežnog pokrivača u mm/dan;

k – koeficijent vetra u slivu;

v – brzina vetra na visini od 15 m u odnosu na tlo u km/h;

P – visina dnevnih padavina u mm;

T – srednja temperatura zasićenog vazduha.

Sa druge strane, pri otapanju snega u uslovima bez kišnih padavina, koristi se jednačina (4.8):

$$M_s = C_m \cdot (T_a - T_b) \quad (4.8)$$

gde su:

M_s – visina otapanja snega u mm/dan;

C_m – koeficijent otapanja snega (mm/°C/dan), koji se preračunava za pozitivne vrednosti dnevnih temperatura vazduha na osnovu zavisnosti: $C_m = 0,6436 \cdot T + 1,6893$;

T_a – temperatura vazduha (°C);

T_b – bazna temperatura (°C), koja obično iznosi 0°C;

Nakon korekcije izmerenih padavina i proračuna stvarno prispelih voda na površinu terena, kao i preračunavanja ukupne visine snežnog pokrivača u vodeni ekvivalent snega, sledeći korak podrazumeva proračun potencijalne i stvarne evapotranspiracije, kao i zemljišne vlage, kako bi se proračunao višak vode koji zapravo predstavlja efektivnu infiltraciju u karstni hidrogeološki sistem. Odnos prethodno navedenih parametara dat je relacijom (4.9):

$$S = P - E - \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (4.9)$$

gde su:

S – višak vode u zemljištu koji se ne potroši na zadovoljenje zemljišne vlage. Ova vrednost predstavlja veličinu efektivne infiltracije u karstni sistem;

P – padavine (mm) – korigovana vrednost uvećana za veličinu vodenog ekvivalenta snega;

E – evapotranspiracija (mm);

w – zemljišna vlaga, tj. promena veličine zemljišne vlage u vremenu.

Evapotranspiracija predstavlja klimatski parametar, koji je značajan pri bilansiranju karstnih podzemnih voda. Ova vrednost podrazumeva količinu vode koja ispari sa krošnji drveća, lišća i vodenih površina. S obzirom na to da je jako teško izmeriti ovaj klimatski parametar, posebno u karstu gde ne postoji mogućnost izrade lizimetara, evapotranspiracija se najčešće određuje preko empirijskih jednačina, koje u sebi mogu uključivati više klimatskih parametara. Proračun evapotranspiracije za odabrane karstne sisteme izvršen je na osnovu linearizovane Torntvajtove jednačine (Mintz & Walker, 1993), prema relaciji (4.10):

$$ETP = 0,17 \cdot \left(\frac{n_{max}}{12} \right) \cdot T_m \quad (4.10)$$

gde su:

ETP – vrednost potencijalne evapotranspiracije u mm;

n_{max} – maksimalno moguće astronomsko trajanje sunčevog sjaja;

T_m – srednja dnevna temperatura vazduha na 2 m visine.

Maksimalno moguće trajanje sunčevog sjaja proračunato je na osnovu astronomskog kalkulatora nacionalnog istraživačkog centra Kanade¹⁵, gde se zadavanjem geografske dužine i širine sračunava ova vrednost. Ovaj astronomski kalkulator samo je jedan od nekoliko njih koji se koriste za proračun maksimalno mogućeg trajanja sunčevog sjaja, a iskorišćen je zbog jednostavnosti proračuna. Preračunavanje potencijalne u stvarnu evapotranspiraciju omogućena je množenjem potencijalne evapotranspiracije koeficijentom β koji uključuje odnos stanja zemljišne vlage i mogućnosti zemljišta da zadrži vlagu, tj. odnos poljskog kapaciteta zemljišta i tačke venjenja (Dunne & Leopold, 1978; Xu & Singh, 2004; Reed, 2003; Jemcov, 2008). Finalno, proračun viška vode koji predstavlja efektivnu infiltraciju u karstni sistem vrši se preko relacije (4.11):

¹⁵ <https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/sun-calculator/>

$$w_i = w_{i-1} + P \cdot \alpha_{i-1} - PET \cdot \beta_{i-1} \quad (4.11)$$

gde su:

w_i – sadržaj vode u zemljištu (mm);

P – vrednost padavina (mm);

α - funkcija infiltracije padavina bez obzira na sadržaj vlage u zemljištu; ovaj parametar se određuje kalibracijom, zadavanjem različitih vrednosti sadržaja vode u zemljištu, a kao početna vrednost zadaje se odnos w/w^* ;

PET – potencijalna evapotranspiracija (mm);

β - funkcionalna zavisnost zemljišne vlage $\beta = \frac{w}{w^*}$;

w^* - kapacitet zadržavanja vode u zemljištu;

i – vremenski korak.

Postupak proračuna viška vode, odnosno efektivne infiltracije u karstni sistem kalibriše se zadavanjem maksimalnog kapaciteta zemljišta da primi vlagu i korelacijom ukupno dobijene vrednosti efektivne infiltracije sa sumom ukupno isteklih količina vode na vrelu u mm, uzimajući u obzir i veličinu sliva (Jemcov, 2008). Na ovaj način, vrši se i provera prethodno zadate vrednosti veličine slivnog područja karstnog vrela koja je izdvojena terenskom prospekcijom i analizom hidrogeološke karte. Finalni proračun efektivne infiltracije i stvarne evapotranspiracije uključuje kalibraciju deficita zemljišne vlage i veličine slivnog područja, kako bi se vrednosti efektivne infiltracije i isticanja na vrelu svele praktično na istu vrednost, što bi značilo da je količina infiltrirane vode i istekla na vrelu. Deficit vlage koji se tom prilikom usvaja, mora se smatrati uslovnim, odnosno prosečnim za celokupni period osmatranja, budući da se ocenjuje na osnovu satelitskog snimka, koji je nastao u jednom delu hidrološke godine (za potrebe disertacije obrađeni su snimci nastali tokom letnjih meseci, dakle u malovodnom periodu), tako da nije obavezno da vrednosti efektivne infiltracije moraju biti ekvivalentne količine istekle vode na vrelu. S tim u vezi, treba istaći da se u ovim slučajevima zanemaruje površinski i podzemni oticaj, koji obično u karstnim terenima nije veliki, ali može bitno uticati na ravnotežu efektivne infiltracije, površinu slivnog područja i isticanja na vrelu, koja se postavlja kao uslov validnosti navedene metodologije. Isto tako, isticanje podzemnih voda na višim kotama usled povišenja nivoa podzemnih voda se najčešće ne meri i stoga ne uzima u razmatranje u ovoj metodologiji, a što može bitno da utiče na dobijene rezultate. Takođe, posebno treba naglasiti uticaj određenih faktora na finalni rezultat površine slivova i procenta efektivne infiltracije. Naime, neadekvatan položaj meteorološke stanice (npr. stanica se nalazi van slivnog područja i/ili na nereprezentativnoj nadmorskoj visini) može dati pogrešnu sliku o vrednostima kišnih i snežnih padavina, stvarnim brzinama vetra i temperaturi vazduha. Ovi parametri direktno utiču na korekciju kišnih padavina i proračun vodenog ekvivalenta snega, tako da neadekvatna odredba ovih parametara posledično utiče i na pogrešno ocenjenu površinu sliva. Ostali faktori se odnose na zanemarivanje gustine vegetacije, zatim odredbu deficita vlage u zemljištu, definisanje veličine evapotranspiracije prema empirijskoj jednačini Torntvajta, zanemarivanje evapotranspiracije otopljenog snežnog pokrivača, budući da je mala verovatnoća da se 100% otopljenog snega infiltrira u podzemlje, zanemarivanje efekta koji prouzrokuje proces zamrzavanja tla tokom zimskih meseci, a koji utiče na deficit vlage. Iz tih razloga, biće dat kritički osvrt na rezultate primenjene metodologije na svakom odabranom karstnom sistemu, u smislu realne procene slivne površine i procenta efektivne infiltracije.

Finalni proračun efektivne infiltracije podrazumevao je svodenje vrednosti viška vode za područja šuma i ogoljenih terena, tj. efektivne infiltracije na jedinstvenu vrednost, što je

učinjeno uz pomoć vegetacionog indeksa. Detaljnija analiza i postupak proračuna viška vode koja se javlja pri bilansiranju vrednosti zemljišne vlage data je u radovima Petrič (2001), Jemcov (2008) i Jemcov & Petrič (2009).

Korekcija pale kiše i preračunavanje snežnih padavina vrši se posebno za područja sa retkom (ili bez) vegetacije, a posebno za ona sa gustom vegetacijom. Izdvajanje područja sa i bez vegetacije moguće je primenom metoda daljinske detekcije i kreiranjem tzv. NDVI karata. NDVI (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*) karte se kreiraju na osnovu odnosa bliskoinfracrvenog (*band 5*) i crvenog (*band 4*) spektralnog kanala, budući da biljke upijaju crvene i infracrvene zrake, a reflektuju zelene, na osnovu čega je moguće ustanoviti prostorni raspored vegetacije. Klasifikacijom NDVI snimka, izvršeno je prostorno izdvajanje područja sa šumama i bez njih, tj. područja sa niskom vegetacijom, na osnovu čega je sračunat vegetacioni indeks korišćen pri finalnom proračunu efektivne infiltracije. U cilju provere, kreirana je karta upotrebe zemljišnog sloja na osnovu *CORINE 2018 Land Use* karte (EEA, 2018), tako što su posebno izdvojena šumska područja od područja sa niskom ili bez vegetacije.

Za osmatrački period odabran je interval 2015-2020 godina, budući da je bio direktno diktiran raspoloživošću podacima o izdašnosti većine karstnih vrela. Ukoliko se uporede prosečne godišnje sume padavina za navedeni period sa istorijskim podacima, može se ustanoviti da su vrednosti za Niš, Zlatibor, Sjenicu i Žabljak nešto više od istorijskih vrednosti, dok je na stanicama Bjelašnica, Crni Vrh i Cetinje izmerena prosečna višegodišnja suma padavina ispod istorijskog proseka. Stoga se za vrelo Bosne, vrelo Mlave i vrelo Rijeke Crnojevića može smatrati da su ulazni podaci relevantniji od ulaznih podataka ostalih sistema, budući da je na stanicama Bjelašnica, Crni Vrh i Cetinje suma padavina ispod istorijskog proseka.

4.1.2 Osnovna statistika vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda

Preliminarni uvid u vremenske serije isticanja karstnih podzemnih voda na odabranim karstnim vrelima, dat je na osnovu analize osnovnih statističkih parametara za svaku vremensku seriju isticanja. Osnovna statistika vremenskih serija isticanja je prikazana za celokupni period od 2015. do 2020. godine, kao i za svaku pojedinačnu godinu i obuhvata sledeće statističke parametre: **ukupni broj podataka** koji je analiziran, **srednja vrednost** vremenske serije, sračunata kao aritmetička sredina uzorka, **medijana** kao centralna vrednost uzorka, koja deli vremensku seriju sortiranu od manje ka većoj vrednosti na dva jednaka dela, **mod** (ili **modus**) kao vrednost koja se najčešće javlja u vremenskoj seriji (najfrekventnija vrednost), **minimalna** i **maksimalna** vrednost vremenske serije, **varijansu (disperziju)** kao matematičko očekivanje odstupanja vrednosti slučajne promenljive od njene aritmetičke sredine, **standardna devijacija** kao apsolutna mera disperzije slučajne promenljive od aritmetičke sredine, **koeficijent varijacije** kao procentualna mera odnosa standardne devijacije i aritmetičke sredine i **koeficijent asimetrije** kao mera asimetrije vrednosti vremenske serije u odnosu na srednju vrednost.

Pomenuti statistički parametri proračunavaju se sledećim relacijama:

Srednja vrednost:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.12)$$

Varijansa:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.13)$$

Standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.14)$$

Koeficijent varijacije:

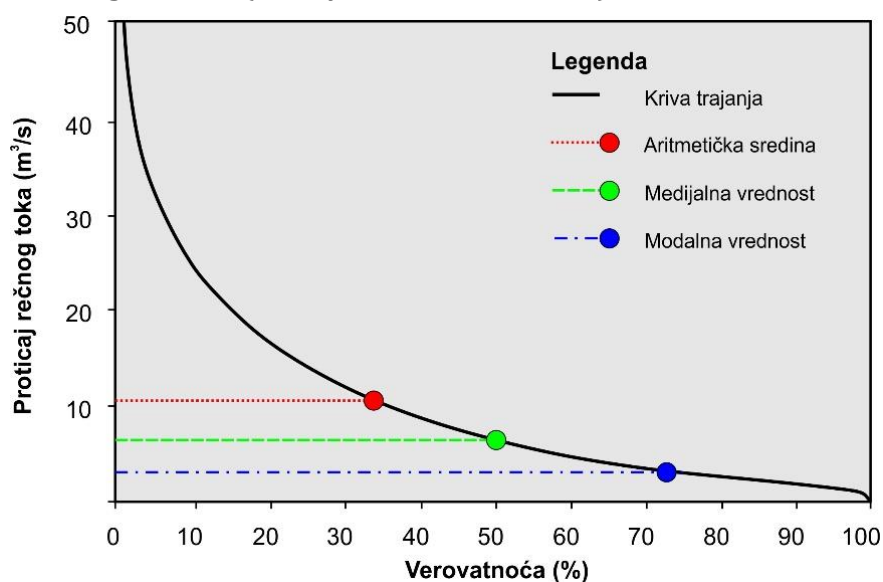
$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

Koeficijent asimetrije:

$$C_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad (4.16)$$

4.1.3 Krive trajanja isticanja karstnih podzemnih voda

Analize krivih trajanja isticanja podzemnih voda (engl. *Flow Duration Curves*) pokazuju odnos izdašnosti vrela i učestalosti isticanja, tj. pokazuju frekvenciju tokom koje je isticanje jednako ili više od zadatog proticaja (Sl. 4.1). Drugim rečima, ako je npr. isticanje $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, a frekvencija Q_{60} , to znači da se u minimum 60% vremena može očekivati isticanje podzemnih voda u iznosu od $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Krive trajanja se najčešće prikazuju tabelarno i kreiranjem dijagrama normalne i log-normalne verovatnoće (Sl. 4.1) (Vogel & Fennessey, 1994; Smakhtin, 2001). Nagib i oblik krive trajanja može ukazivati na hidrogeološke karakteristike sliva, tako da strmi nagib krive ukazuje na razvijen sistem karstnih kanala koji brzo provode podzemnu vodu do vrela, dok blagi nagib krive ukazuje na značajni retencioni kapacitet i dobre akumulacione karakteristike karstnog sistema (Searcy, 1959; Malik 2015).



Sl. 4.1. Izgled teorijske krive trajanja na primeru reke Aheron, Grčka za period 1947-1987 (Vogel & Fennessey, 1994)

Pri analizi, krive trajanja protoka karstnih podzemnih voda najčešće se prikazuju u procentima, tako da Malik (2015) ističe da vrednosti od Q_0 do Q_1 ukazuju na ekstremne poplavne talase, dok vrednosti do Q_{10} ukazuju na isticanja koja se mogu javljati u periodima visokih voda. Dalje, vrednosti isticanja između Q_{20} i Q_{40} pokrivaju srednje godišnje isticanje, dok se Q_{50} odnosi na

medijalnu vrednost. Vrednosti isticanja iznad Q_{70} do Q_{100} ukazuju na isticanje u malovodnim periodima, dok vrednosti između Q_{95} i Q_{100} ukazuju na ekstremne sušne periode.

Ukoliko se analiziraju relacije među frekvencijama protoka vrela, mogu se izvući dodatni zaključci o geometriji i hidrodinamičkim karakteristikama karstnog sistema. Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) ukazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda. Recipročan odnos ove dve vrednosti, dakle Q_{90} / Q_{50} ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema.

Još jedna klasifikacija sistema može biti izvršena na račun koeficijenta varijabilnosti vrela, koji podrazumeva odnos Q_{10} / Q_{90} (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020). Koeficijent varijabilnosti vrela sličan je koeficijentu hidrodinamičke neravnomernosti. Međutim, koeficijent varijabilnosti vrela daje realniju sliku odnosa isticanja vrela pri velikim i malim vodama, budući da u proračun ne uzima ekstremne vrednosti, koje bi dovele do nepreciznih zaključaka.

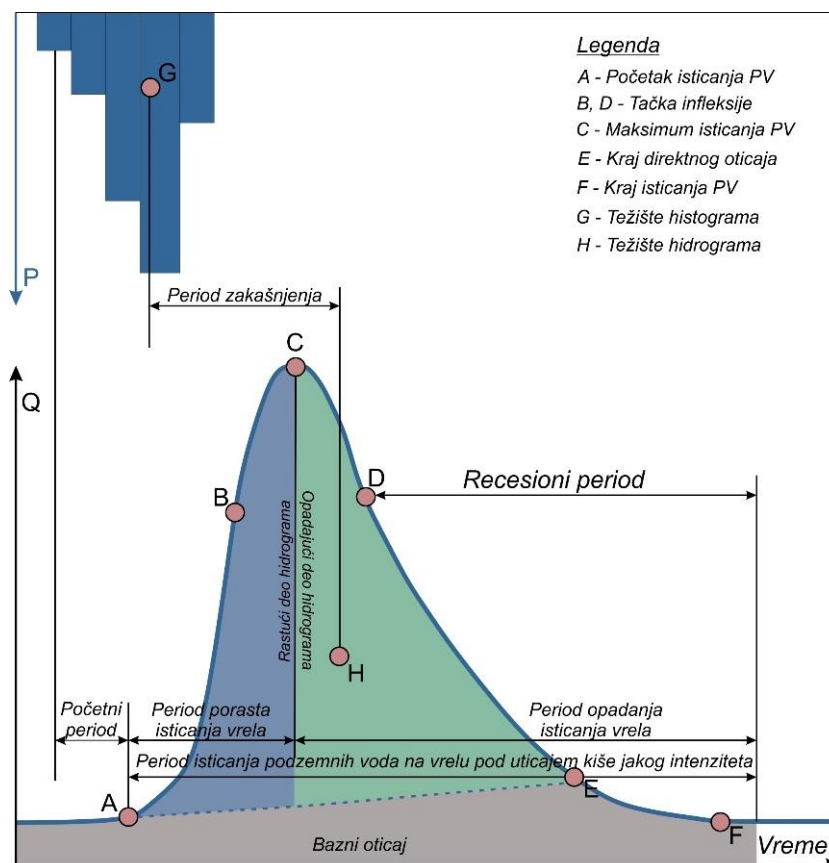
4.1.4 Recesiona analiza isticanja karstnih podzemnih voda

Analiza krive isticanja karstnog vrela može dati pouzdane podatke o funkcionisanju karstnog hidrogeološkog sistema kako u periodu prihranjivanja, tako i u periodu dreniranja podzemnih voda. Sam oblik krive isticanja, odnosno periodi pojava ekstremnih vrednosti daju uvid u ponašanja sistema u različitim periodima (Bonacci, 1993; Fiorillo, 2014). Jako izraženi pikovi isticanja (maksimalne vrednosti) mogu ukazati na dobru razvijenost karstnih kanala i pukotina, tj. visok stepen karstifikacije sistema i dobru povezanost karstnih kanala sa karstnim vrelom. Nasuprot ovome, hidrogram bez jako izraženih pikova i sa niskim koeficijentom hidrodinamičke neravnomernosti može ukazati na slabo razvijen sistem, niskog stepena karstifikacije, kod koga su karakteristični slaba povezanost karstnih kanala i pukotina i verovatna dominacija matrične poroznosti ili suprotno od ovoga na veliku akumulaciju voda u karstnom podzemlju na koji infiltracija novih voda ne utiče bitno na uspostavljeni stabilni režim (nema piston efekta).

Od stepena razvoja KHS zavisice brzina odziva izlaznog signala sistema (dreniranja) na ulazni signal (infiltracija padavina ili površinskih voda). Jedan teorijski hidrogram isticanja karstnog vrela prikazan je na sl. 4.2, gde se može pokazati reakcija sistema na kišnu epizodu značajnog intenziteta. Sa pomenute slike može se videti da kiša jakog intenziteta prouzrokuje intenzivnu efektivnu infiltraciju u podzemlje, kada se nivo podzemnih voda podiže, a samim tim povećava se i hidrostatički pritisak. Prenošenjem pritiska kroz karstne kanale i pukotine, intenzivira se isticanje podzemnih voda što je na sl. 4.2 predstavljeno plavim segmentom ABC kao rastući deo hidrograma. Nakon završetka kišne epizode koja je napunila sistem i povećala dinamičke rezerve, isticanje podzemnih voda se nastavlja smanjenim intenzitetom, što je na sl. 4.2 predstavljeno segmentom CDE (zelena boja) kao opadajući deo hidrograma.

Analiza opadajuće grane hidrograma isticanja karstnog vrela naziva se recesiona analiza. Pre nego što se teorijski detaljnije prikaže analiza recesione krive, trebalo bi definisati termin *kriva recesije*, odnosno *recesioni period*. Period recesije predstavlja vreme tokom hidrološkog ciklusa kada je karstni sistem bez direktnog prihranjivanja na račun padavina ili površinskih voda, tj. kada na karstnom vrelu ističe samo deo voda koji predstavlja bazni oticaj (obično tokom letnjih meseci). Analizom opadajuće grane hidrograma tokom recesionog perioda, moguće je dati određene pretpostavke o funkcionisanju KHS, dok je uspostavljanjem matematičkih relacija izdašnosti karstnog vrela i vremena moguće dati kratkoročnu prognozu isticanja vrela u datom trenutku ili proračunati količinu istekle vode tokom recesionog perioda (Krešić, 2009). Kriva

recesije (*retardaciona kriva* ili *kriva tarismana*) predstavlja opadajuću granu hidrograma, gde je pretpostavljeno da se isticanje podzemnih voda vrši samo na osnovu gradijenta nivoa podzemnih voda i efektivne poroznosti, bez uticaja prihranjivanja (bilo isticanjem novoinfiltrirane vode, bilo prenošenjem pritiska). Ova kriva je počinje tačkom infleksije, koja matematički razdvaja krivu isticanja na konveksni i konkavni deo, što je predstavljeno tačkom D na slici 4.1, dok je kriva recesije predstavljena segmentom DF na istoj slici.



Sl. 4.2. Teorijski hidrogram isticanja karstnog vrela kao reakcija KHS na prihranjivanje na račun kiše jakog intenziteta (prema Krešiću, 2013)

Postoji nekoliko metoda kojima se može analizirati recesiona kriva. Bonacci (1993) i Fiorillo (2011, 2014) daju pregled metoda analize recesione krive i proračuna koeficijenata pražnjenja koje u principu razrađuju dva koncepta koja su nastala početkom 20. veka. U tom periodu, Maje (franc. *Maillet*) i Businessk (franc. *Boussinesq*) daju matematički opis baznog oticaja podzemnih voda, koji nije prouzrokovan prihranjivanjem, već se odvija isključivo na račun prethodno akumulirane vode. Pomenuta dva autora, praktično istovremeno daju matematičko tumačenje ponašanja KHS tokom perioda recesije, i to eksponencijalnom (Maillet, 1905) i hiperboličnom (Boussinesq, 1903, 1904) zavisnošću, koje su sa aspekta funkcionisanja KHS u recesionom periodu, zapravo komplementarne, budući da se u dobro razvijenom KHS prvi mikrorežim pražnjenja najčešće pokorava Businesskovoј hiperboličnoј jednačini (turbulentni režim tečenja ili β režim), a ostali mikrorežimi Majeovoj eksponencijalnoj jednačini (laminarni režim tečenja ili α režim). Maje (1905) predlaže eksponencijalni zapis retardacione krive jednačinom (4.17):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (4.17)$$

dok Businessk (1903, 1904) hiperboličnom funkcijom (4.18) opisuje istu krivu:

$$Q_t = \frac{Q_0}{[1 + \alpha(t - t_0)]^2} \quad (4.18)$$

U jednačinama (4.17) i (4.18), nalaze se zajednički parametri koji označavaju sledeće:

Q_t – izdašnost vrela (m^3/s) u periodu $t-t_0$;

Q_0 – izdašnost vrela (m^3/s) u periodu t_0 ;

t_0 – vreme početka recesionog (mikro)režima;

t – kraj recesionog (mikro)režima;

α – koeficijent recesije (Ukoliko je reč o turbulentnom režimu, radi se o β režimu);

Ukoliko se Majeova jednačina (4.17) logaritmuje, dobija se zavisnost navedenih parametara iz kojih je moguće iskazati koeficijent recesije α jednačinom (4.19) u kojoj figuriše korekcionni faktor 0.4343, kojim je omogućeno da se isticanje izražava u m^3/s , a vreme u danima:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343 \cdot (t - t_0)} \quad (4.19)$$

Analiza recesione krive primenom Majeovih jednačina (4.17) i (4.19) podrazumeva nanošenje podataka o dnevnim vrednostima isticanja tokom perioda recesije na semilogaritamski dijagram zajedno sa vremenom u danima. Tako, vrednosti isticanja u recesionom periodu se ređaju duž prave linije, čijim nagibom je određen koeficijent recesije – α .

Čest je slučaj da se recesiona kriva dobro razvijenog KHS može aproksimirati trima mikrorežimima pražnjenja (sl. 4.2). Krešić (1991, 2009) navodi da su vrednosti koeficijenta recesije obično reda veličine 10^{-2} ili 10^{-3} , gde prvi odgovara brznoj propagaciji vode kroz veće karstne kanale i pukotine (strmiji nagib recesione krive), dok svaki sledeći predstavlja sporije pražnjenje kroz matričnu poroznost stene ili manje karstne kanale usled slabog hidrostatičkog pritiska, što je na grafiku prikazano blažim nagibom retardacione krive. Time se može odrediti ukupna jednačina (4.20) recesionog perioda razvijena u redove, koja je definisana sa n mikrorežima pražnjenja (Milanović P. 1979; Bonacci, 1987; Krešić, 1991; Mijatović, 1990; Stevanović, 1991; Jemcov, 2008):

$$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + \dots + Q_{0n}e^{-\alpha_n t} \quad (4.20)$$

Takođe, koeficijent recesije i zapremina vode akumulirana u karstnom hidrogeološkom sistemu su obrnuto proporcionalni (Mijatović, 1968; Milanović P. 1979), te je na taj način moguće proračunati količinu vode koja je bila akumulirana u KHS prema jednačini (4.21) koja podrazumeva zbir zapremina voda akumuliranih na početku svakog mikrorežima pražnjenja:

$$V_0 = \sum_1^i V_i = \sum_1^i \frac{Q_i}{\alpha_i} \times 86400 \text{ s} \quad (4.20)$$

gde su:

V_0 – zapremina istekle vode na početku recesionog perioda;

V_i – zapremina istekle vode na početku mikrorežima pražnjenja;

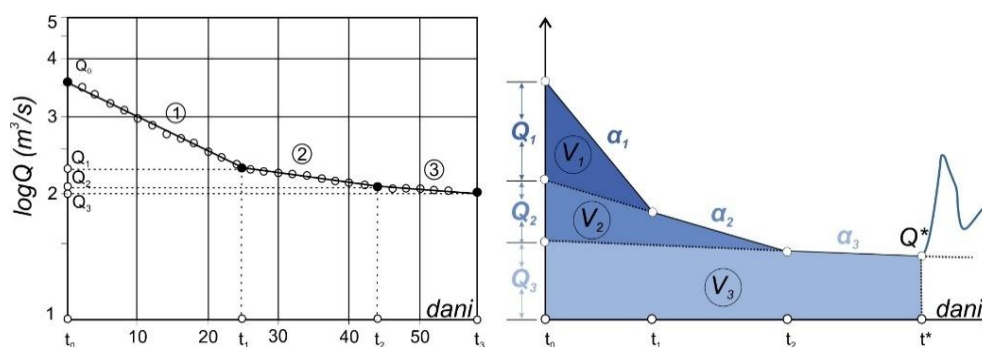
Q_i – vrednosti isticanja vrela tokom mikrorežima pražnjenja;

α_i – koeficijent recesije tokom mikrorežima pražnjenja;

i – broj mikrorežima pražnjenja karstnog hidrogeološkog sistema;

Na kraju, ukoliko se jednačina (4.20) primeni na poslednju vrednost isticanja tokom recesionog perioda (Q^* na sl. 4.3 desno), moguće je proračunati zapreminu vode (V^*) koja je ostala na kraju

recesionog perioda. Istovremeno, može se dobiti i zapremina istekle vode u m^3/s kao razlika V_0 i V^* u periodu diskretizacije $t-t_0$.



Sl. 4.3. Semilogaritamski dijagram recesionog perioda dobro razvijenog KHS (levo); Zapremine istekle vode tokom recesionog perioda (desno) (Krešić, 2009)

Teorijski slučajevi formiranja prave linije nanošenjem vrednosti isticanja podzemnih voda u recesionim uslovima na semilogaritamski dijagram praktično su retkost. Šta više, jako je teško izdvojiti recesioni period koji je bez uticaja prihranjivanja ili prenošenja pritiska usled nailaska nove količine vode. Stoga, praksa je pokazala da prvi mikrorežim pražnjenja, koji podrazumeva brzo pražnjenje i samim tim obično pripada turbulentnom režimu tečenja je najbolje opisivati hiperboličnim funkcijama, dok se ostali (drugi, treći...) mikrorežimi pražnjenja opisuju eksponencijalnim funkcijama zadovoljavajuće preciznosti. Tako, Jemcov (2008) navodi postojanje jednorezervoarskih (Amit et al. 2002) i dvorezervoarskih (Mangin, 1970) modela KHS kojima se pomoću hiperboličnih funkcija opisuje recesija sistema. Takođe, Kovács et al. (2005) i Kovács & Perrochet (2008) razmatraju brzo i sporo isticanje podzemnih voda u recesionim uslovima kroz fenomen dvojne poroznosti KHS. Naime, pomenuti autori formiraju jednačinu recesionih perioda KHS usvajajući da se brzo pražnjenje sistema odvija kroz karstne kanale i velike pukotine (engl. *conduit flow*), dok se sporo pražnjenje (bazni oticaj) odvija kroz matriks stene, odnosno matričnu poroznost. Malik (2015) navodi da je iz pomenutih razloga veoma teško dati jednačinu koja će precizno opisati celokupni recesioni period. Stoga, isti autor predlaže jednačinu za opisivanje recesionog perioda KHS koja u sebi uključuje eksponencijalni i hiperbolični deo, kao i parametar β koji predstavlja koeficijent recesije brzog oticaja, slično kao u slučaju linearnih rezervoara (Bonacci, 2011), odnosno linearnog opadanja isticanja u Toričelijevom rezervoaru (Fiorillo, 2011).

Analiza recesione krive predstavlja kompleksan zadatak u cilju kvantitativne karakterizacije karstnog hidrogeološkog sistema. Matematičko opisivanje procesa isticanja podzemnih voda u karstu u recesionim uslovima zasniva se na definisanju turbulentnog (brzog) tečenja i laminarnog tečenja (spori, bazni oticaj), koji je posebno važan imajući u vidu da on obično traje dosta duže. Tako, pomenute metode pomažu kvantitativnoj karakterizaciji KHS, a procena efektivne poroznosti je moguća na osnovu definisanja kritične vrednosti efektivne infiltracije i skoka vrednosti isticanja koje ona prouzrokuje na vrelu, nakon recesionog perioda. Poređenjem prosečnog skoka isticanja i zapremina infiltrirane vode moguće je pretpostaviti efektivnu poroznost, tj. stepen karstifikacije karstnog sistema.

4.1.5 Analiza direktnog i baznog oticaja karstnih podzemnih voda

Posmatrajući teorijski hidrogram isticanja karstnog vrela na sl. 4.2, može se ustanoviti da rastući deo (ABC segment) i opadajući deo (CDE segment) hidrograma zajedno predstavljaju period isticanja direktnog (ili brzog) oticaja koji nastaje upravo reakcijom sistema na intenzivnu infiltraciju (Atkinson, 1977; Gunn, 1985; Fiorillo, 2014). Nakon prolaska talasa, preko karstnog vrela nastavljaju da ističu podzemne vode koje su bile u sistemu (saturisanoj

zoni) pre nailaska poplavnog talasa. Taj deo podzemnih voda koji bi isticao i bez aktivnog prihranjivanja na račun kišne epizode predstavlja *bazni* (ili spori) *oticaaj*.

Postupak razdvajanja hidrograma na direktni i bazni oticaj preuzet je iz hidrologije, gde se koristi za definisanje udela površinskih i podzemnih voda u formiranju ukupnog hidrograma reke. Dezintegriranje hidrograma karstnog vrela na direktni i bazni oticaj ukazuje na udeo voda koji ističe kao reakcija sistema na intenzivnu infiltraciju (direktni oticaj) i udeo voda koji se odnosi na podzemne vode koje su bile u sistemu (saturisanoj zoni) pre nailaska talasa novoinfiltrirane vode. Suštinski, bazni oticaj karstnog sistema u periodima visokih i srednjih voda predstavlja podzemnu vodu akumuliranu u sistemu koja ističe u uslovima pada pritiska, nakon umirenja pikova izazvanih kišnom epizodom, dok u periodima malih voda (recesije) predstavlja laminarno pražnjenje sistema kroz matriks stene i/ili karstne kanale koji dublje zaležu, tako da je ostvareno laminarno tečenje sa slabim hidrostatičkim pritiskom. Na ovaj način moguće je oceniti da li se hidrogram vrela formira više na račun direktnog ili baznog oticaja, kakve su mu retencione sposobnosti i koji mu je stepen razvijenosti karstnih kanala.

Disagregacija hidrograma karstnog vrela na direktni i bazni oticaj, odnosno razdvajanje komponenti hidrograma na oticaj prouzrokovan direktnim prihranjivanjem sistema i oticaj prethodno akumulirane vode može se izvršiti na nekoliko načina. Budući da je veoma teško precizno detektovati trenutak pojave novoinfiltrirane vode na vrelu, kao i njeno direktno poreklo, najčešće primenjena tehnika jeste razlaganje hidrograma na direktni i bazni oticaj. Jedan od najčešćih slučajeva je razdvajanje hidrograma grafičkim putem, korišćenjem određenih softverskih alata, odnosno pomoću hemijskih ili izotopskih analiza (Krešić, 1991).

Teorijski gledano, određivanje baznog oticaja je kompleksan zadatak, imajući u vidu složenost strukture KHS. Iako je na teorijskom hidrogramu (Sl. 4.2) jednostavno uočavanje odziva sistema na kišnu epizodu, to u praksi nije slučaj. Naime, usled fenomena dvojne poroznosti sistema (postojanja kanala i matrične poroznosti na različitim nivoima) i inverznim gradijentom, ali i preklapanjem kišnih epizoda i prihranjivanjem na račun drugih vidova doticaja vode (Jemcov, 2008), teško je precizno definisati trenutak kada se bazni oticaj javlja na vrelu. Efekti intenzivne kišne epizode, osim porasta vrednosti isticanja i reakcije sistema (plavi i zeleni segment hidrograma na sl. 4.2), ogledaju se i u dinamičkim rezervama sistema. Naime, nakon završetka prihranjivanja, u teorijskom slučaju, dva su moguća scenarija za dinamičke rezerve (Krešić, 1991, 2013):

- Novoinfiltrirana voda je u potpunost istekla kroz karstno vrelo, a dinamičke rezerve su ostale na nivou od pre pojave kiše. Dakle, nije došlo do povećanja dinamičkih rezervi i bazni oticaj je iste vrednosti kao pre prihranjivanja (slučaj na teorijskom hidrogramu 4.2 – tačke A i F imaju istu vrednost isticanja, tj. istu Y koordinatu, dok iste tačke imaju različitu X koordinatu, pomeću za vremenski korak trajanja reakcije KHS na intenzivno prihranjivanje);
- Novoinfiltrirana voda je delom istekla kroz karstno vrelo, a delom je popunila dinamičke rezerve KHS (matričnu poroznost i karstne kanale i pukotine), čime je bazni oticaj podignut na viši nivo hidrograma (hipotetički slučaj ako se zamisli da tačke A i F nemaju istu vrednost isticanja, tj. Y koordinatu (F ima veću vrednost), dok iste tačke istovremeno imaju različitu X koordinatu, pomeću za vremenski korak trajanja reakcije KHS na intenzivno prihranjivanje).

Prethodnih decenija razdvajanje hidrograma najčešće je vršeno manuelno primenom različitih tehnika (recesija baznog oticaja (engl. *base-flow-recession*; Rorabaugh, 1964) i podešavanje krive oticaja (engl. *curve-fitting*; Lindsley et al. 1982), dok se poslednjih godina sve više koriste određeni softverski alati koji simuliraju manuelno grafičko razdvajanje (Jemcov, 2008). Ovo je

pogotovo važno jer se uočena subjektivnost autora svodi na minimum, čime se isključuje mogućnost dobijanja različitih rezultata za istu vremensku seriju isticanja karstnih podzemnih voda. Jemcov (2008) daje pregled savremenih softverskih paketa za razdvajanje hidrograma na komponentu direktnog i baznog oticaja, koji su predstavljeni u tabeli 4.1. Svi pomenuti softveri za proračun baznog oticaja koriste broj dana, tj. baze, koja je zasnovana na prethodnoj recesiji, a data je sledećom jednačinom (4.21) (Lindsley et al., 1982):

$$N = 0.827 \cdot A^{0.2} \quad (4.21)$$

gde su:

N – broj dana na hidrogramu nakon pika, kada prestaje bazni oticaj;

A – slivno područje (km²).

Tabela 4.1. Pregled softverskih paketa za razdvajanje hidrograma na direktni i bazni oticaj (prema Jemcovu, 2008)

Softver	Metoda razdvajanja	Referenca
HYSEP	1. Metoda fiksnih intervala 2. Metoda klizećih intervala 3. Metoda lokalnog minimuma	Sloto & Crouse, 1996
Institut za hidrologiju UK (1980)	Metoda definisanja prevojnih tačaka (engl. <i>turn points</i>) koje predstavljaju minimume na hidrogramu petodnevnih nepreklapajućih perioda, manjih 0,9 puta u odnosu na okolne (susedne) vrednosti	Nathan & McMahon, 1990
PART	Metoda definisanja prethodnih recesionih perioda (dana) koji predstavljaju isključivo bazni oticaj, dok je direktni oticaj određen dnevnim opadanjem isticanja većim od 0,1 log perioda	USGS (Rutledge 2007)
BFI	1. Metod Instituta za hidrologiju (Standardni metod) 2. Modifikovani metod	Wahl & Wahl, 1995

Osim pomenutih metoda, Malik (2015) navodi razdvajanje hidrograma vrela formiranjem glavne recesione krive vrela (engl. *Master Recession Curve* – MRC) i seta jednačina kojima se ona opisuje. Metoda se zasniva na pojednostavljenom konceptu razumevanja fizičkih procesa u hidrološkom sistemu: svaka vrednost isticanja karstnog vrela reflektuje pijezometarski nivo sistema za matričnu poroznost (male i srednje pukotine) i karstne kanale (Malik, 2015). Naime, svaka vrednost isticanja karstnih podzemnih voda može biti formirana od barem jedne komponente oticaja ili se može raščlaniti na nekoliko njih. Razdvajanje se zasniva na određivanju reprezentativnog vremena koje je prošlo od maksimuma isticanja (što bi bila vrednost N ili baza) u zavisnosti da li se oticaj pokorava eksponencijalnoj (brzi, direktni oticaj) ili linearnoj zavisnosti (spori, bazni oticaj) (Malik, 2015).

U cilju razdvajanja hidrograma razmatranih odabranih karstnih vrela Dinarida i Karpatobalkanida, korišćene su dve metode – metoda lokalnog minimuma (engl. *Local Minimum Method* - LMM) i rekurzivni digitalni filter EWMA. LMM zasniva se na određivanju broja dana nakon pika hidrograma kada teoretski prestaje bazni oticaj, uz korišćenje parametra f od 0,9 (Wahl & Wahl, 1995). Ova metoda razvijena je od strane Američkog geološkog zavoda (USGS) u okviru HYSEP automatskog softverskog paketa (tabela 4.1). Određivanje broja dana (N) omogućeno je preko relacije (4.21). Teorija o razdvajanju hidrograma preuzeta je iz hidrologije, tako da je primena ovog koncepta u hidrogeologiji karsta zahtevala razmatranje dodatnih faktora, koji utiču na veličinu sliva. Takav pristup primenjen je kod određivanja parametra N za razdvajanje hidrograma, gde je iskorišćena komparacija promene indeksa baznog oticaja za vrednosti N od 1 do 10, tako da je za proračun ovog parametra uzeta tačka nakon koje se

ublažava nagib krive indeksa baznog oticaja (Wahl & Wahl 1995; Jemcov, 2008). Na taj način, određeni su svi potrebni parametri za proračun indeksa baznog oticaja prema ovoj metodi.

Razdvajanje hidrograma na direktni i bazni oticaj izvršeno je i primenom rekurzivnog digitalnog filtera EWMA (Tularam & Ilahee, 2008), koji u sebe uključuje koeficijent recesije i stoga se može smatrati relativno pouzdanijom metodom disagregacije hidrograma nego što je slučaj sa LMM. Takva situacija se javlja najviše zbog smanjene subjektivnosti autora koja je očigledna pri odabiru N parametra, odnosno zbog uvođenja u proračun i recesionog koeficijenta. Jednačina (4.22) razdvajanja hidrograma pomoću EWMA rekurzivnog digitalnog filtera glasi (Tularam & Ilahee, 2008):

$$q_{b(i)} = \alpha q_i + (1 + \alpha)q_{b(i-1)} \quad (4.22)$$

gde su:

q_i – izmerena ukupna izdašnost za i -ti trenutak;

q_{bi} – filtrirani bazni oticaj za i -ti trenutak;

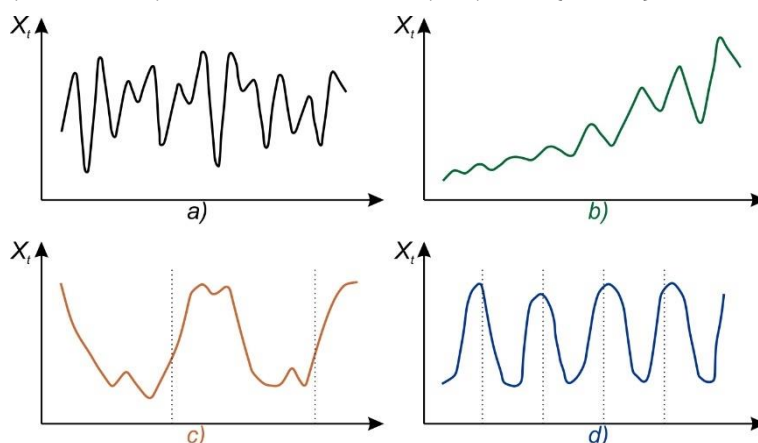
$q_{b(i-1)}$ – filtrirani bazni oticaj za prethodni trenutak;

α - koeficijent recesije.

4.1.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Jemcov (2008) navodi da kvantitativna karakterizacija KHS može biti izvršena analizom celokupnog hidrograma karstnog vrela (Bonacci, 1993), zatim recesionog dela hidrograma (Padilla & Pulido-Bosh, 1994) ili analizom hidroloških ciklusa primenom korelacione ili spektralne funkcije (Mangin, 1994), što je omogućeno manipulacijom vremenskim serijama padavina i efektivne infiltracije (ulaznog signala) i isticanja podzemnih voda (izlaznog signala).

Definicija termina *vremenska serija* podrazumevala bi uređeni niz podataka u vremenu. One mogu biti neprekidne, kada se podatak može zabeležiti u ma kom intervalu (što je generalno slučaj sa isticanjem stalnih karstnih vrela), dok je prekidna vremenska serija ona kod koje se opservacije beleže u istim vremenskim intervalima (npr. časovno, dnevno, mesečno, kvartalno, godišnje itd.) (Kovačić, 1995), što je slučaj sa padavinama ili povremeno aktivnim karstnim vrelima. Postoji nekoliko tipova vremenskih serija: konstantna serija, serija sa trendom, serija sa cikličnim varijacijama i serija sa sezonskim varijacijama (Sl. 4.4).



Sl. 4.4. Tipovi vremenskih serija: a) konstantna; b) serija sa porastom trenda; c) serija sa cikličnim varijacijama; d) serija sa sezonskim varijacijama (Kovačić, 1995, modifikovano)

Kovačić (1995) detaljnije definiše pomenute tipove vremenskih serija tako da prvi tip vremenske serije (Sl. 4.4a) ima slučajna odstupanja oko konstantnog nivoa, pa se za takve

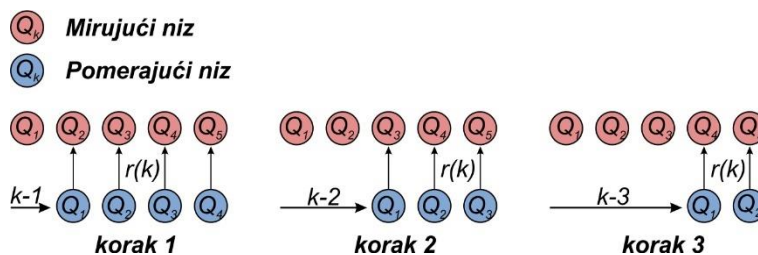
vremenske serije kaže da su stacionarne u sredini. Drugi tip vremenskih serija (Sl. 4.4b) je serija sa trendom sa slučajnim fluktuacijama oko tog uzlaznog trenda, koja je za razliku od prvog tipa nestacionarna u sredini, budući da se nivo serije povećava u vremenu. Treći i četvrti tip vremenskih serija (Sl. 4.4c i 4.4d) karakteristične su po tome što se varijacije periodično ponavljaju, a međusobne razlike su u tome što ako je period ponavljanja sličnog toka serije duži od godinu dana, onda je reč o cikličnom karakteru serije (tip c), dok ukoliko je period ponavljanja kraći od godinu dana, radi se o sezonskom karakteru serije (tip d).

Svrha analiziranja vremenskih serija odgleda se u definisanju uzroka pojave, predviđanja ponašanja vremenske serije u narednom periodu, odnosno kontrolisanja vremenske serije manipulacijom parametara koji uslovljavaju njenu pojavu. Kovačić (1995) definiše 4 parcijalna cilja analize vremenskih serija, koji su komplementarni i pripadaju sveobuhvatnoj svrsi analize jedinstvene vremenske serije:

1. **Deskripcija.** Prvi korak pri analizi vremenske serije, kada se definiše njena sumarna statistika i daje grafički prikaz;
2. **Objašnjenje.** Korišćenje varijacija jedne vremenske serije u cilju definisanja varijacija u drugoj vremenskoj seriji;
3. **Prognoziranje.** Korišćenje prethodnih opservacija za identifikaciju i ocenu modela vremenske serije koja se potom koristi sa formiranje prognoze vrednosti serije u budućem periodu;
4. **Kontrola.** Formiranje funkcije prenosa vremenske serije na osnovu koje se prognoziraju buduće veličine serije, a zatim se ulazna serija prilagođava željenim izlaznim rezultatima modela.

Glavna razlika u metodološkom pristupu analizi vremenskih serija jeste u pogledu domena, koji može biti *vremenski* ili *frekventni*. Kada je reč o vremenskom domenu analize vremenske serije, obično se koristi autokorelaciona funkcija kada se vrši univarijantna analiza, odnosno kroskorelaciona funkcija kada se vrši bivarijantna analiza. Sa druge strane, kada se vremenska serija iskazuje kao funkcija frekvencije, tada je reč o frekventnom domenu u kome se koristi spektralna funkcija gustine u okviru univarijantne analize, odnosno krosspektralna funkcija gustine kada je reč o bivarijantnoj analizi vremenskih serija (Kovačić, 1995). Takođe je važno napomenuti da vremenski i frekventni domen analize vremenskih serija ne isključuju jedan drugi, već su oni komplementarni i ekvivalentni, budući da se spektralna funkcija gustine iskazuje na osnovu autokorelacione funkcije i obrnuto (Kovačić, 1995).

Autokorelaciona funkcija podrazumeva opisivanje sukcesivnih članova jedne iste vremenske serije (tj. zavisne ili nezavisne promenljive) i utvrđivanja njene zavisnosti i periodičnosti (Sl. 4.5) (Krešić, 1991; Larocque et al. 1998; Jemcov, 2008). Ovom funkcijom je iskazana korelaciona struktura vremenske serije između dva uzajamna njena niza, pomerena za određeni vremenski korak. Drugim rečima, autokorelacija podrazumeva definisanje uticaja vrednosti promenljive od pre jednog, dva, tri ... n dana na današnje vrednosti.



Sl. 4.5. Teorijski prikaz primene autokorelacione analize

Ova funkcija uključuje proračun koeficijenata autokorelacije za određeni vremenski korak, koji potom formiraju autokorelogram i definišu memoriju sistema. Koeficijent autokorelacije se proračunava prema jednačinama (4.23):

$$r(k) = \frac{COV(x_i, x_{i+k})}{VARx_i} \quad (4.23a)$$

$$COV(x_i, x_{i+k}) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{X})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (4.23b)$$

$$VARx_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.23c)$$

gde su:

$COV(x_i, x_{i+k})$ – kovarijansa između mirujućeg i pomerajućeg niza;

$VAR(x_i)$ – varijansa mirujućeg, početnog niza;

N – ukupan broj podataka niza;

k – korak (lag) autokorelacije;

\bar{x} – srednja vrednost mirujućeg, početnog niza;

x_i – vrednost slučajno promenljive u trenutku $t = i + k$.

Autokorelaciona funkcija predstavlja važnu komponentu pri kvantitativnoj analizi i karakterizaciji KHS, budući da izgled autokorelograma može dati preliminarni uvid u karstifikovanost i evolutivni stepen sistema. Naime, ukoliko je nagib autokorelograma strm, tj. memorija sistema niska, takav sistem se tumači kao slabo razvijen sa postojanjem predisponiranih pravaca kretanja podzemnih voda kroz dominantne karstne kanale, tako da vode brzo prođu put od mesta infiltracije do mesta isticanja. Takav sistem takođe se generalno odlikuje malom storativnošću i malim dinamičkim rezervama. Sa druge strane, ukoliko je nagib autokorelograma blag, tj. memorija sistema visoka, takav sistem se može smatrati kao dobro razvijen i karstifikovan, sa razvijenim karstnim kanalima značajnih dimenzija koji predstavljaju predisponirane pravce kretanja podzemnih voda. Takođe, takav sistem se generalno odlikuje visokom storativnošću, što rezultuje značajnim dinamičkim rezervama.

Funkcija koja obuhvata vremenski domen analize vremenskih serija, ali u bivarijantnom okruženju naziva se *kroskorelaciona funkcija*. Ova funkcija podrazumeva određivanje međusobne zavisnosti dve diskretizovane promenljive od kojih je jedna zavisna ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), a druga nezavisna promenljiva ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) (Sl. 4.6). U slučaju KHS, to bi podrazumevalo analizu korelisanosti padavina (P) (ulaznog signala u sistem) i isticanja podzemnih voda na vrelu (Q) (izlaznog signala iz sistema), gde se razmatra uticaj padavina na isticanje i vreme potrebno za reakciju sistema na prihranjivanje. Koncept formiranja kroskorelacione funkcije suštinski je identičan autokorelacionoj analizi, s tim što se umesto jedne vremenske serije, koriste dve (padavine i isticanje), od kojih je jedna mirujuća, a druga pomerajuća.

Kroskorelaciona analiza daje bolji uvid u funkcionisanje KHS, tj. daje informacije o karakteru isticanja i uticaju padavina na formiranje isticanja karstnih podzemnih voda. Postupak proračuna koeficijenata kroskorelacije (pozitivnog r_{+k} i negativnog r_{-k}) i konstrukcije kroskorelograma identičan je kao kod autokorelacione funkcije, s tim što se korelacija obavlja između dva niza koji se pomeraju za vremenski korak k prema jednačinama (4.24):

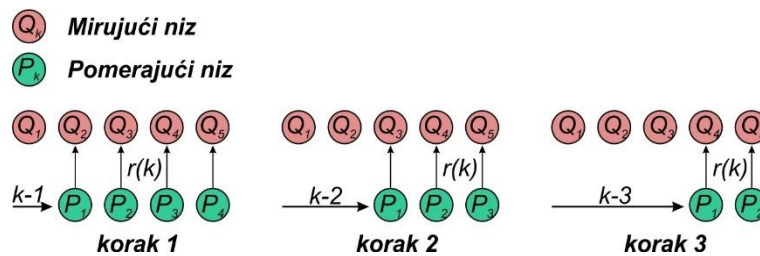
$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}}; r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (4.24a)$$

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (4.24b)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (4.24c)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (4.24d)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (4.24e)$$



Sl. 4.6. Teorijski prikaz primene kroskorelacione analize

Budući da se u okviru kroskorelacione funkcije definišu pozitivni i negativni koeficijenti kroskorelacije, treba napomenuti da ova funkcija nije simetrična, tj. da važi nejednakost $r_{+k} \neq r_{-k}$. Jemcov (2008) navodi da teorijski slučaj idealno centrirane kroskorelacione funkcije za lag $k = 0$, ukazuje na istovremenu reakciju ulaznog i izlaznog signala na treći nezavisni signal. Međutim, u praksi je češći slučaj kašnjenja reakcije izlaznog signala (isticanja) na ulazni (padavine), što generalno predstavlja vreme između nultog laga i maksimalnog koeficijenta kroskorelacije ($r_{xy \max}$). Vreme reakcije, odnosno kašnjenje može se tumačiti sa aspekta brzine transfera podzemnih voda u sistemu, pa tako manje kašnjenje signala implicira brže pražnjenje sistema, tj. njegovu promptnu reakciju na ulazni signal, gde se indirektno sistem može tumačiti kao jako razvijen i karstifikovan. Sa druge strane, veće kašnjenje signala implicira sporije pražnjenje sistema, odnosno sporiju reakciju KHS na ulazni signal, gde se indirektno sistem može tumačiti kao slabije razvijen i sa niskim stepenom karstifikacije.

Prilikom auto- i kroskorelacione analize, neophodno je utvrditi i intervale poverenja, iznad kojih vrednost imaju statističku značajnost za razmatranu vremensku seriju. S obzirom da je u pitanju dvostrani test, intervale poverenja imaju i pozitivnu i negativnu vrednost. Proračun intervala poverenja data je jednačinom (4.25), u okviru testa Andersona (Prohaska, 1981):

$$IP(rk) = \frac{1 \pm Z_{\alpha} \cdot \sqrt{N - k - 2}}{N - k - 1} \quad (4.25)$$

gde su:

$IP(rk)$ – interval poverenja;

N – dužina uzorka (niza);

k – korak;

Z_{α} - vrednost standardizovane promenljive za odabrani nivo poverenja (vrednost iz statističkih tablica).

Za određivanje praga statističke značajnosti auto- i kroskorelacione funkcije korišćen je interval poverenja na bazi 95% verovatnoće, odnosno empirijska vrednosti praga statističke značajnosti od 0,2 (Mangin, 1984, Ristić Vakanjac, 2015).

Kovačić (1995) navodi da je osnovni cilj analize vremenske serije u frekventnom domenu determinacija doprinosa različitih periodičnih komponenti njenom ukupnom varijabilitetu. Treba napomenuti da se teorijski koncept periodičnih komponenti zasniva na pojavljivanju ciklusa jednakog intenziteta u jednakim vremenskim intervalima, što u praksi skoro nikada nije slučaj. To se može videti na primeru isticanja podzemnih voda jednog KHS, gde se zaista može uočiti cikličnost javljanja ekstremnih vrednosti isticanja, nejednakog intenziteta i različitog perioda pojavljivanja. Obično se radi o prolećnim i jesenjim pikovima, ili letnjim mesecima kada se radi o minimalnim vrednostima, međutim, precizno vreme pojave i intenzitet mogu višestruko varirati zavisno od intenziteta padavina, količine snega, zasićenosti saturisane zone i dr. Stoga, kada je reč o cikličnom pojavljivanju komponenti jednog KHS, mora se istaći da je reč o iregularnim ciklusima koji se javljaju u sličnim, a ne identičnim vremenskim intervalima.

Radi boljeg razumevanja analize vremenske serije u frekventnom domenu, Kovačić (1995) navodi osnovu jednačinu (4.26) periodične komponente sa poznatom periodom, koja je predstavljena na sl. 4.7:

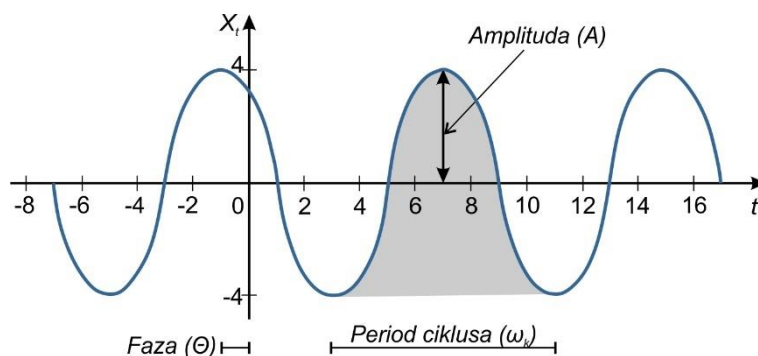
$$X_t = A \cos(\omega t + \theta), t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.26)$$

gde su:

ω – ugaona frekvencija ili frekvencija kosinusnih varijacija (u radijanima);

A – amplituda kosinusnih varijacija;

θ – fazni pomak.



Sl. 4.7. Jednostavni ciklični model vremenske serije (Kovačić, 1995, modifikovano)

Pri analizi vremenskih serija u frekventnom domenu u okviru univarijantnih analiza vremenskih serija, koristi se *spektralna funkcija gustine*. Ova funkcija konvertuje autokorelacionu funkciju iz vremenskog u frekventni domen uz pomoć Furijeovih transformacionih redova. Kako Jemcov (2008) navodi, koncept primene spektralne funkcije gustina zasniva se na identifikaciji pikova indikatora periodičnosti konkretne vremenske serije, čime se ujedno i vrši karakterizacija KHS. Opšti oblik jednačine spektralne frekvencije gustine je dat relacijom (4.27):

$$S(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad (4.27)$$

gde su:

k – broj autokorelacionog koeficijenta ($k = 1, 2, \dots, m$);

$D(k)$ – funkcija filtriranja;

$r(k)$ – koeficijent autokorelacije za korak k ;

f – frekvencija;

Najčešće korišćene funkcije filtriranja su (Mangin, 1975; Krešić, 1991; Jemcov, 2008):

Funkcija Tukey-a (4.28)

$$D(k) = \frac{\left(1 + \cos \frac{\pi k}{m}\right)}{2} \quad (4.28)$$

Funkcija Pazen-a (4.29)

$$D(k) = 1 - 6 \frac{k^2}{m^2} \left(1 - \frac{k}{m}\right) \text{ za } 0 \leq m \leq \frac{n}{2}$$

$$D(k) = 2 \left(1 - \frac{k}{m}\right)^3 \text{ za } \frac{n}{2} \leq m \leq n \quad (4.29)$$

Kritična tačka u primeni analize vremenskih serija spektralnom funkcijom gustine predstavlja determinacija frekventne rezolucije i tačke odsecanja autokorelograma koja pokazuje broj koeficijenata autokorelacije koji će ući u proračun i na osnovu kojih će se formirati spektar (Krešić, 1991; Jemcov, 2008). Tako, Krešić (1997) navodi da pri spektralnoj frekvenciji gustine broj koeficijenata autokorelacije ne treba da prelazi 10% ukupne dužine uzorka, dok ako se radi o vremenskoj seriji od nekoliko godina, broj koeficijenata može biti i preko 30% dužine niza. Jemcov (2008) preporučuje da tačka odsecanja korelograma bude ispod trećine dužine serije. Pri kvantitativnoj analizi i karakterizaciji KHS korišćenjem spektralne frekvencije gustine, koristi se regulaciono vreme spektra, kao jedinica trajanja impulsne funkcije koja odgovara trajanju uticaja ulaznog signala, tj. vremenu reakcije sistema (Mangin, 1975; Jemcov, 2008).

Kao što je slučaj sa transformacijom autokorelacione funkcije u frekventni domen, tj. spektralnu frekvenciju gustine, tako je moguća i transformacija kroskorelacione funkcije u *krosspektralnu frekvenciju gustine*. Ova funkcija predstavlja konvertovanje kroskorelacione funkcije iz vremenskog u frekventni domen uz pomoć Furijeovih transformacionih redova, kao što je slučaj i kod univarijantne analize. Međutim, kod krosspektralne frekvencije gustine radi se o bivarijantnoj analizi koja pored izlaznog signala (isticanja KHS) uključuje i ulazni signal (padavine). To je važno sa aspekta karakterizacije kvantitativne komponente KHS. Opšti oblik krosspektralne funkcije gustine predstavljen je jednačinama (4.30) koja uključuje realni (krosspektrum) i imaginarni (kvadratni-spektrum) deo, što je posledica asimetrije kroskorelacione funkcije (Padilla & Pulido- Bosh, 1995; Jemcov, 2008):

$$S_{xy} = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f) \quad (4.30a)$$

$$h_{xy} = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m \left(r_{xy}(k) + r_{xy}(k) \right) D(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad (4.30b)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m \left(r_{xy}(k) + r_{xy}(k) \right) D(k) \sin(2\pi f k) \right] \quad (4.30c)$$

Glavna korist primene krosspektralne frekvencije gustine ogleđa se u tome što se na osnovu nje mogu definisati kašnjenje i trajanje odziva KHS na ulazni signal u frekventnom domenu. Pomenuto je zapravo i suština interpretacije rezultata dobijenih primenom krosspektralne funkcije, koja u sebi može takođe uključivati i *funkciju faze*, pogodnu za definisanje kašnjenja izlaznog signala u odnosu na ulazni za različite frekvencije, zatim *koherentnu funkciju* koja ukazuje na (ne)linearnost relacije ulazni – izlazni signali i *funkciju rasta* koja uključuje povećanje ili smanjenje izlaznog u odnosu na ulazni signal, što se sa aspekta karakterizacije KHS može tumačiti kao promena dinamičkih rezervi u vremenu (Padilla & Pulido-Bosh, 1995; Larocque et al. 1998; Jemcov, 2008).

Funkcija faze podrazumeva transformaciju realnog ko-spektruma dela krosspektralne funkcije u funkciju amplitude i faze relacijom (4.31):

$$S_{xy}(f) = |S_{xy}(f)| \exp[i\Theta_{xy}(f)] \quad (4.31)$$

gde funkcija amplitude u frekventnom domenu predstavlja ulazno-izlaznu kovarijansu (4.32):

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad (4.32)$$

dok je funkcija faze u frekventnom domenu prikazana relacijom (4.33), a u vremenskom domenu relacijom (4.34) (Larocque et al. 1998; Jemcov, 2008):

$$\Theta_{xy}(f) = \arctan \frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)} \quad (4.33)$$

$$\tau = \frac{\Theta_{xy}(f)}{2\pi f} \quad (4.34)$$

U jednačinama (4.31) do (4.34), parametri su sledeći:

S_{xy} – kros-spektralna funkcija;

Θ_{xy} – fazna funkcija;

λ_{xy} – kvadratni spektrum;

h_{xy} – ko-spektrum.

Pomenuta kros-amplitudna ukazuju na trajanje impulsnog odziva vremenske serije sa mogućnošću filtriranja periodične komponente funkcije (u hidrogeološkoj praksi, to su najčešće padavine ili efektivna infiltracija). Fazna funkcija je komplementarna kros-amplitudnoj funkciji pri kros-spektralnoj analizi ukazujući na kašnjenje izlaznog signala u odnosu na ulazni za različite frekvencije, tako da se prosečno kašnjenje dobija najboljim poklapanjem nagiba krive (Padilla & Pulido-Bosh, 1995; Jemcov, 2008).

Osim pomenutih, u okviru bivarijantne analize u frekventnom domenu, primenjuju se još dve funkcije – koherentna i funkcija rasta. Koherentna funkcija pokazuje linearnost odnosa ulazno-izlazne komponente, zavisi od spektralne i kros-spektralne funkcije (jednačina 4.35) (Padilla & Pulido-Bosch 1995; Larocque et al. 1998; Jemcov, 2008). Perfektno linearan sistem ima koherentne vrednosti od 1. Takav slučaj je redak u hidrogeologiji karsta, s obzirom na to da karstni sistemi pripadaju grupi izrazito nelinearnih dinamičkih sistema.

$$CO_{xy}(f) = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x(f)S_y(f)}} \quad (4.35)$$

Funkcija rasta ukazuje na smanjenje (< 1) ili pojačanje (> 1) izlaznog signala u odnosu na ulazni, što bi u hidrogeologiji karsta ukazivalo na promenu rezervi podzemnih voda u karstnom sistemu, tj. na njihovo povećanje u periodu velikih voda i smanjenje u periodu malih voda (jednačina 4.36) (Padilla & Pulido-Bosch 1995; Larocque et al. 1998; Jemcov, 2008):

$$G_{xy}(f) = \frac{S_{xy}}{S_x(f)} \quad (4.36)$$

U jednačinama (4.35) i (4.36) figurišu sledeći parametri:

CO_{xy} – koherentna funkcija;

G_{xy} – funkcija rasta;

S_{xy} – kros-spektralna funkcija;

$S_{x(f)}$ i $S_{y(f)}$ – spektralne funkcije gustine ulazne vremenske serije.

4.2 Karakterizacija kvaliteta karstnih podzemnih voda

S obzirom na činjenicu da je mineral kalcit dominantan u formiranju hemijskog sastava krečnjaka, može se pretpostaviti da i podzemne vode akumulirane u krečnjacima imaju sličan hemijski sastav. Naime, hemijski sastav karstnih podzemnih voda direktno će zavisiti od hemijskog i mineraloškog sastava stena kroz koje se voda filtrira, kao i od vremenskog perioda koje će ona provesti u podzemlju. Tako, u zavisnosti od stepena interakcije *voda – stena*, kao i od vremena potrebnog vodi da stigne od zone prihranjivanja do zone isticanja, odnosno od turbulentnog ili laminarnog režima tečenja podzemnih voda, zavisice količina rastvorenih minerala kojima će voda biti obogaćena, odnosno ukupna mineralizacija podzemnih voda.

Karstne podzemne vode obično su malomineralizovane, budući da je propagacija podzemnih voda od mesta infiltracije do mesta isticanja često brza, kao i da stene kroz koje voda prolazi (najčešće krečnjak i dolomit) sadrže samo osnovne mineralne komponente koji ih izgrađuju (kalcijum karbonat uz dodatak magnezijuma za dolomite). Stevanović & Papić (2008) navode podatak o očekivanoj mineralizaciji podzemnih voda u krečnjacima koja može biti 0,3 g/l, odnosno u dolomitima do 0,5 g/l. Stoga, podzemne vode karstnih sistema akumulirane u krečnjacima, obično su hidrokarbonatno – kalcijumskog tipa ($\text{HCO}_3 - \text{Ca}$), sa prelazom ka magnezijumskom jonu koji je zajedno sa kalcijumom dominantan u dolomitima ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), tako da su podzemne vode u ovom tipu stena obično hidrokarbonatno – magnezijumske - kalcijumske ($\text{HCO}_3 - \text{Mg, Ca}$), sa mogućnošću pojave i drugih hemijskih elemenata, ali u manjim koncentracijama.

Prema fizičko – hemijskim karakteristikama, karstne podzemne vode formirane u krečnjacima i dolomitima po pravilu su bez boje, ukusa i mirisa, čime je definisan izuzetan prirodni kvalitet ovih voda. One su obično prozračne, bez prisustva suspendovanih čestica koje mogu povećati mutnoću vode. Redovno se dešava da prirodna, sirova podzemna voda ima mutnoću i ispod 1 NTU jedinica, što je njena maksimalna dozvoljena koncentracije u vodi za piće. Ovaj parametar može biti narušen nailaskom poplavnog talasa pod uticajem intenzivne kišne epizode koja može povećati mehaničku i hemijsku eroziju sedimenata, ali i pokrenuti već suspendovani materijal i glinenu ispunu u karstnim kanalima, koje podzemna voda nosi sa sobom do karstnog vrela. Odsustvo mirisa i ukusa podzemnih voda karstnih sistema uzrokovano je hemijskim, tj. mineraloškim sastavom krečnjaka, odnosno dolomita.

Hemijski sastav karstnih podzemnih voda sastavljen je od hemijskih parametara različite koncentracije. Tome doprinosi njihov sadržaj u mineraloškom sastavu matične stene, odnosno

rastvorljivost ovih minerala, a neretko i antropogeni faktor. Langmuir (1984) navodi procese koji imaju uticaja na formiranje hemijskog sastava podzemnih voda, tj. njen kvalitet:

- Hemijski sastav infiltriranih atmosferskih padavina;
- Evapotranspiracija voda koje se infiltriraju ili zaležu plitko ispod površine;
- Kiselost i stepen nezasićenosti voda koje prihranjuju izdan;
- Dostupnost i rastvorljivost karbonata i halita, gipsa i anhidrita;
- Brzine rastvaranja stena i period interakcije voda – stena;
- Hidrološki procesi koji uključuju razblaživanje, tj. mešanje različitih podzemnih voda;
- Antropogeni faktori, tj. zagađenje podzemnih voda iz različitog izvora zagađenja.

Komponente hemijskog sastava koje su obično sadržane u podzemnim vodama u koncentracijama većim od 1 mg/l nazivaju se *makrokomponente* hemijskog sastava podzemnih voda. One su i najznačajnije sa aspekta klasifikacije i geneze podzemnih voda, dajući direktan odgovor na pitanje u kom tipu stene su akumulirane. Makrokomponente hemijskog sastava podzemnih voda čine oni elementi čija je koncentracija dominantna i koji direktno odražavaju stepen interakcije podzemnih voda sa matičnom stenom. Najčešće makrokomponente u podzemnim vodama karstnih sistema su Ca^{2+} , Mg^{2+} , N^+ i K^+ među katjonima, odnosno HCO_3^- , SO_4^{2-} i Cl^- među anjonima. Pomenuti katjoni i anjoni koji predstavljaju makrokomponente hemijskog sastava podzemnih voda formiraju tri glavne grupe prema kojima je moguće klasifikovati podzemne vode u karstu (White, 2010):

- Bikarbonatna grupa, kod koje su dominantni HCO_3^- anjon i Ca^{2+} i Mg^{2+} katjoni nalazi se pretežno u krečnjacima i dolomitima;
- Sulfatna grupa, kod koje su dominantni SO_4^{2-} anjon, odnosno magnezijumski i alkalni katjoni, nalazi se u gipsu i anhidritima;
- Hloridna grupa, kod koje su dominantni Cl^- anjon i alkalni katjoni, nalazi se u halitima.

Od ostalih činilaca hemijskog sastava podzemnih voda karstnih sistema, svakako treba pomenuti i one elemente čija je koncentracija ispod 1 mg/l, koji se nazivaju *mikrokomponentama*, među kojima se izdvajaju bor, bromidi, fluoridi, jodidi, fosfati, metali i nemetali (aluminijum, arsen, barijum, hrom, cink, bakar, litijum, mangan, živa, nikl, selen, hrom i dr.), zatim radioaktivni elementi u vidu radijuma i urana, organske materija kao ukupni i rastvoreni organski ugljenik i rastvoreni kiseonik (Krešić, 2009).

Poznavanje koncentracije makro- i mikrokomponentata može koristiti pri proračunu ukupne koncentracije rastvorenih stena i minerala u karstnim podzemnim vodama (engl. *Total dissolved solids* – TDS), koja je određena merenjem suvog ostatka nakon zagrevanja uzorka vode na 103° do 180°C . Vrednosti ukupno rastvorenih supstanci proporcionalne su još jednom parametru hemijskog sastava podzemnih voda koji se naziva *specifična elektroprovodljivost* (E_c). Ovaj parametar podrazumeva sposobnost 1 cm^3 vode da provodi struju i izražava se u mernim jedinicama S/cm, odnosno $\mu\text{S}/\text{cm}$, budući da su vrednosti u malomineralizovanim podzemnim vodama obično niske. Specifična elektroprovodljivost relativno lako se meri pomoću terenskih uređaja. Veza sa ukupnom mineralizacijom vode zasniva se na relaciji da vrednost specifične elektroprovodljivosti pomnožena sa koeficijentom 0,7 daje preliminarnu procenu ukupno rastvorenih supstanci u podzemnim vodama (Krešić, 2009). Vrednost specifične elektroprovodljivosti u pijaćim podzemnim vodama varira obično od 30 do 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Davis & DeWiest, 1991), dok ovaj parametar u karstnim podzemnim vodama obično iznosi od 300 do 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Parametri koji dodatno definišu kvalitet karstnih podzemnih voda su *tvrdoća vode*, *pH vrednost* i *redoks potencijal*. Tvrdoća vode podrazumeva prisustvo rastvorenih soli kalcijuma i magnezijuma u vodi i izražava se u nemačkim stepenima tvrdoće. Parametar pH podrazumeva

negativni dekadni logaritam koncentracije vodonikovih jona H^+ i OH^- , tako da kada su njihove koncentracije u ravnoteži, rastvor je pH neutralan, odnosno vrednost pH je oko 7 (po Ivanovu 6,8 - 7,2 su neutralne vode). Ekstremne pH vrednosti pokazuju odsustvo H^+ jona kada je rastvor alkalni (bazni rastvor), a vrednost pH = 14, odnosno odsustvo OH^- jona kada se radi o kiselom rastvoru i pH vrednosti od 1 (pH vrednost ne može biti jednaka 0, zbog logaritamskog izražavanja koncentracije vodonikovih jona). Ove vrednosti su uvek u zbirnoj koncentraciji od 14, što znači da porast koncentracije H^+ jona automatski znači i smanjenje OH^- jona i obrnuto. Vrednosti pH u karstnim podzemnim vodama su obično u granicama neutralnosti, dakle između 6,5 – 7,5.

Redoks potencijal, odnosno redukcija i oksidacija rastvora (u ovom slučaju podzemnih voda) podrazumeva primanje (tj. oksidaciju) i otpuštanje (tj. redukciju) elektrona. Redoks potencijal izražava se u milivoltima (mV) i može varirati od +700 mV do -400 mV (Krešić, 2009). Pozitivan predznak znači da su uslovi koji vladaju u izdani aerobni, odnosno da se radi o oksidacionoj sredini, dok negativan predznak govori suprotno – da se radi o anaerobnim uslovima, tj. da je u pitanju redukciona sredina. Takođe, mikrobiološki i bakteriološki sastav podzemnih voda može dati informaciju o aerobnim ili anaerobnim uslovima u sistemu, ali i o prodoru određenih zagađujućih supstanci. Mikroorganizmi, bakterije i ostali organizmi lako mogu ući u KHS, budući da je on obično izložen direktnom uticaju sa površine terena ili povezan sa njom preko ponora. Tako, prisustvo fekalnih koliformnih bakterija ili fekalnih streptokoka direktno može ukazivati na prodor zagađujućih materija.

Osim hemijskih parametara kvaliteta voda, koje ona genetski sadrži u različitim koncentracijama, karstne podzemne vode mogu sadržati određene količine hemijskih parametara koji su antropogenog porekla. U tim slučajevima, obično se radi o sadržaju nitrata i pesticida koji ukazuju na intenzivnu poljoprivrednu aktivnost na površini terena, dok prisustvo određenih metala, fenola i sl. mogu ukazivati na ekscena zagađenja karstnih voda sa površine terena, najčešće derivatima nafte. Međutim, ovakvi slučajevi nisu česti u našoj zemlji, najviše iz razloga što su mesta na kojima je najveće rasprostranjenje karstnih stena obično retko naseljena, odnosno što povlatni, zemljišni sloj može amortizovati pesticide i nitratna jedinjenja iz poljoprivredne aktivnosti.

Sve prethodno navedeno utiče na formiranje hemijskog sastava podzemnih voda karstnih sistema, koje su obično prirodno odličnog kvaliteta, koji umnogome dalje određuje namenu i potrebni tretman ovih voda radi korišćenja u različite svrhe.

Karakterizacija kvaliteta karstnih podzemnih voda vrši se na osnovu skraćenih i kompletnih hemijskih analiza podzemnih voda. Ocena kvaliteta podzemnih voda vrši se na osnovu komparacije izmerenih vrednosti parametara kvaliteta i maksimalno dozvoljenih koncentracija prema važećoj zakonskoj regulativi, dok se rezultati hemijskih analiza prikazuju tabelarno prikazuju i vizuelizuju u vidu Pajperovih i kružnih dijagrama, odnosno formule Kurlova, i brojnih drugih grafičkih priloga.

4.3 Razvoj metodologije ocene pritisaka na karstne podzemne vode

4.3.1 Definicija pritisaka na podzemne vode

Status podzemnih voda prema ODV i pratećim vodičima (CIS) može biti *dobar* ili *loš*, odnosno može se odnositi na *kvalitativni (hemijski)* ili *kvantitativni režim* podzemnih voda. *Pritisaci na podzemne vode*, takođe podrazumevaju definisanje opterećenja kvalitativnog i kvantitativnog režima podzemnih voda, koji mogu biti najčešće uzrokovani antropogenim uticajem u vidu neadekvatne i neracionalne eksploatacije podzemnih voda, kada je reč o kvantitativnom

pritisku, odnosno prekomernim korišćenjem nitrata i/ili pesticida u poljoprivrednoj proizvodnji ili upuštanjem netretiranih otpadnih voda industrije u vodotoke i zemljište, odlaganja otpada na divljim deponijama i dr., kada je reč o kvalitativnom pritisku na podzemne vode.

Ocena hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda definiše pravac i strategiju dopunskih hidrogeoloških detaljnih istraživanja na nacionalnom nivou, čiji je cilj poboljšanje trenutnog statusa i buduće racionalno korišćenje podzemnih voda u skladu sa konceptom održivog razvoja, na čemu insistiraju propisi i regulative EU.

U cilju adekvatnog upravljanja bilo kojim resursom, neophodno je upoznati količinu resursa kojim se raspolaže. Drugim rečima, jedan od osnovnih zadataka koji mora biti ispunjen da bi se ocenio **kvantitativni status podzemnih voda u karstu**, odnosno da bi se adekvatno upravljalo karstnim podzemnim vodama jeste pouzdana ocena vodnog bilansa i rezervi podzemnih voda karstnih sistema. Sama ocena vodnog bilansa u karstu predstavlja veoma složen zadatak za istraživače iz nekoliko razloga, među kojima se posebno ističe otežano određivanje granica sliva u karstu, posebno zbog mogućnosti njenih promena u vremenu i prostoru.

Na globalnom nivou postoji nekoliko inicijativa, pre svega sadržanih u okviru UNESCO – IHP programa, koje imaju za cilj razvoj metodologije ocene rezervi i bilansa podzemnih voda. Jedan od takvih dokumenata je *Atlas svetskih izvorišta*, odnosno monografija „*Groundwater around the World*“ (Margat & Van der Gun, 2013) u kojoj se daje bilans podzemnih voda na globalnom planu, do nivoa kontinenta i država. Takođe, određeni podaci o bilansima podzemnih voda na globalnom nivou dati su na sajtu FAO/AQUASTAT i Svetske meteorološke organizacije (WMO) i njene Komisije za hidrologiju (CHy).

Dok se kvantitativni pritisak na podzemne vode odnosi na oscilaciju nivoa podzemnih voda i opterećenje bilansnih rezervi vodnog tela podzemnih voda efektima eksploatacije podzemnih voda, pritisci na kvalitet se definišu u vidu opterećenja podzemnih voda određenim hemijskim parametrima i ranjivošću podzemnih voda na zagađenje. Prema evropskoj regulativi, **pritisak na kvalitet podzemnih voda**, odnosno loš hemijski status podzemnih voda zasniva se na prisustvu povišenih koncentracija hemijskih parametara koji nisu geogenetskog porekla, već su posledica uticaja pre svega antropogenih faktora. Pored sadržaja netretiranih kontaminanata u rudarskoj delatnosti, podzemna voda može sadržati i određenu koncentraciju hazardnih supstanci – arsena, olova, bakra i drugih metala. Takođe, odsustvo kanalizacione mreže, pretežno u ruralnim delovima, može uticati negativno na kvalitet podzemnih voda, tj. predstavljati bitan element pri definisanju kvalitativnog statusa podzemnih voda. Pritiske na kvalitet podzemnih voda može povećati i intruzija morske vode u priobalnim oblastima, posebno u karstnim terenima iz kojih se eksploatiše podzemna voda.

Da bi se pritisak na kvalitet podzemnih voda mogao definisati, potrebno je uspostaviti adekvatnu monitoring mrežu podzemnih voda, pomoću koje će se vršiti redovno uzorkovanje podzemnih voda i pratiti njen hemijski sastav, na osnovu čega će biti moguće utvrditi koncentraciju svih hemijskih parametara koji se nalaze u podzemnim vodama. Sa druge strane, usled nepostojanja monitoring mreže podzemnih voda, za ocenu kvalitativnih pritisaka, mogu se koristiti i određene aproksimacije. One se sastoje u kreiranju karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda, na osnovu prikupljenih postojećih punktualnih i/ili difuznih zagađivača, objedinjenih u jedinstveni katastar. Pomenute karte se tako, mogu koristiti za preliminarnu ocenu kvalitativnog statusa, tj. pritisaka na kvalitet podzemnih voda.

4.3.2 Formiranje metodologije ocene pritisaka na kvantitet karstnih podzemnih voda

4.3.2.1 Metodologija bilansiranja karstnih podzemnih voda

Pre nego što se pristupi razradi metodologije i proračunu bilansa, trebalo bi razmotriti sam pojam *bilans podzemnih voda*. Različiti autori su se bavili proučavanjem bilansa podzemnih voda, pa tako Poehls & Smith (2009) navode da vodni bilans (engl. *groundwater budget*) predstavlja kvantifikaciju povezanosti prihranjivanja i dreniranja izdani u okviru jednog sliva¹⁶. Na osnovu ove definicije se može zaključiti da glavni parametri koji figurišu pri bilansiranju podzemnih karstnih voda su uslovi prihranjivanja i isticanja KHS. Stevanović (1991) navodi da “*pod bilansiranjem izdanskih voda treba podrazumevati celokupni složeni dinamički proces prihranjivanja, cirkulacije i isticanja izdanskih voda, kao analizu ulaznih i izlaznih elemenata, i svih faktora koji na taj proces utiču u određenim vremenskim ciklusima*”¹⁷. Isti autor navodi i principe koje treba poštovati prilikom bilansiranja podzemnih voda:

- Precizno definisanje perioda za koji se bilans proračunava;
- Nepromenljivost metoda proračuna uzlaznih i izlaznih komponenata u sukcesivnim periodima;
- Obezbeđenje pouzdanosti proračuna i opreznost pri eliminaciji subjektivnih uticaja.

Definiciju vodnog bilansa može se predstaviti u formi jednačine (4.37) kao:

$$\text{Ulazni parametri} \pm \text{Izlazni parametri} = \text{Promene u rezervama vode} \quad (4.37)$$

Krešić (2013) navodi da se jednačine vodnog bilansa mogu napisati u formi čiji će rezultat biti zapremina vode u određenom vremenskom intervalu, fluksu (toku vode) izraženom kao zapremina vode u jedinici vremena, odnosno gustini toka vode izraženom kao zapremina vode prema površini određenog terena u jedinici vremena.

Šta zapravo predstavljaju ulazne i izlazne komponente vodnog bilansa? Praktično, u okviru njih se ubrajaju sve prihodne i rashodne komponente koje određuju zapreminu vode na konkretnom terenu. Tako, u **prihodne (ulazne) komponente** vodnog bilansa se svrstavaju:

- Atmosferske padavine (kiša, sneg i dr.);
- Doticaji iz drugih slivova (površinski i/ili podzemni);
- Svi ostali vidovi “ulaska” vode na sliv (npr. veštačko prihranjivanje i sl.).

Sa druge strane, **rashodne (izlazne) komponente** vodnog bilansa podrazumevaju:

- Oticanje vode sa sliva (površinski i/ili podzemni);
- Evapotranspiracija (podrazumeva evaporaciju, intercepciju i transpiraciju);
- Isticanje podzemnih voda preko vrela;
- Svi vidovi eksploatacije podzemnih voda u cilju iskorišćavanja za različite namene.

Metodologija bilansiranja podzemnih voda treba biti prilagođena konkretnom tipu izdani. Pod time se podrazumeva da se određeni bilansni elementi mogu zanemariti kada se računa bilans jednog tipa izdani, dok sa druge strane, isti član bilansne jednačine može biti krucijalan za neki drugi tip. Tako, bilansna jednačina podzemnih voda u karstu može se prikazati relacijom (4.38) (Stevanović, 2015c), odnosno grafički na sl. 4.8.

$$P + I_s + I_g = R_f + E_t + E_g + Q_s + Q_{sb} + Q_a \pm R \pm E \quad (4.38)$$

¹⁶ Poehls D.J. & Smith G.J. 2009: *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*, p.364

¹⁷ Stevanović Z. 1991: *Hidrogeologija karsta Karpato – Balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja*, p.203

gde su:

U – ulazne komponente:

P – atmosferski talozi

Is – površinski doticaj

Ig – podzemni doticaj

I – izlazne komponente:

Rf – površinski oticaj

Et – evapotranspiracija

Eg – evaporacija sa nivoa izdani

Qs – isticanje preko vrela

Qsb – podzemno isticanje

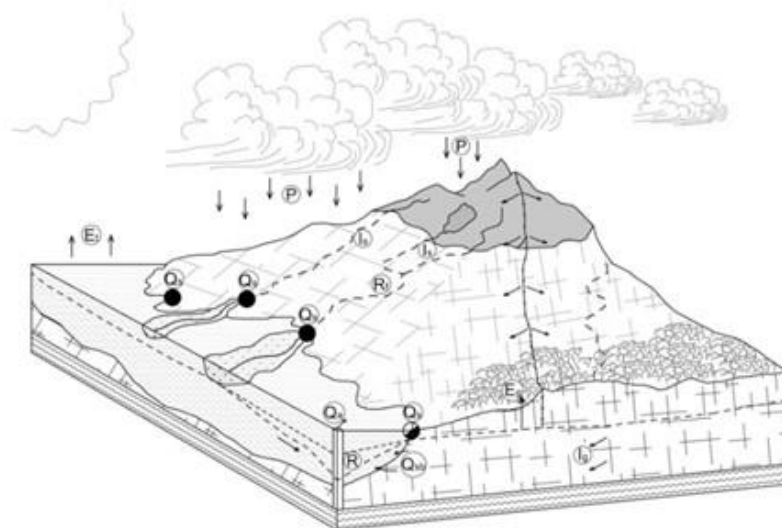
Qa – veštačka eksploatacija

R – rezerve izdanskih voda

E – greška određivanja pojedinih veličina

Bilansna jednačina (4.38), na prvi pogled ne ukazuje na kompleksnost proračuna bilansa karstne izdani. Zapravo, bilo bi veoma jednostavno odrediti bilans jednog karstnog sistema ukoliko bi bili poznati svi pomenuti članovi bilansne jednačine. Međutim, problem upravo predstavljaju određeni elementi jednačine koji se ne mogu zanemariti, a koji su sa druge strane jako teško merljivi, kao što je slučaj npr. sa podzemnim isticanjem vode. Pomenuti bilansni elementi mogu biti određeni neposredno, tj. direktnim merenjem određenih članova jednačine (npr. hidrometrija), odnosno eksperimentalnim i empirijskim metodama i modeliranjem, kako bi se simulacijom dobili određeni parametri, koje ipak treba prihvatati sa određenom rezervom ukoliko se ima u vidu anizotropnost i nehomogenost karstnih izdani (Stevanović, 1991). Posrednim (indirektnim) putem se neki članovi određuju ukoliko su poznati svi drugi elementi.

Padavine, tj. atmosferski talozi jedan su od članova bilansne jednačine koji se mogu odrediti sa najvećim stepenom pouzdanosti. U njih spadaju atmosferske kiše, sneg i kondenzovana voda. Međutim, glavni problem kod određivanja padavina jeste neravnomerni raspored meteoroloških stanica, u smislu da se one često nalaze na nižim nadmorskim visinama nego što je nadmorska visina zone prihranjivanja karstnog sistema. Poguščavanje mreže stanica i postavljanje totalizatora na teško pristupačnim terenima mogu uspešno rešiti ove nedostatke.



Sl. 4.8. Parametri za ocenu bilansa podzemnih voda u karstu u otvorenim i poluzatvorenim strukturama (Stevanović, 2015c)

Površinski doticaj predstavlja prihranjivanje izdani na račun infiltracije voda iz rečnih tokova. Ovaj parametar može značajno prihranjivati sistem u vidu autogenog ili alogenog prihranjivanja, a najtačnije se određuje hidrometrijskim merenjem na sukcesivnim hidrometrijskim profilima površinskih tokova, na osnovu kojih je moguće ustanoviti veličinu gubitaka proticaja rečnog toka, što bi ukazivalo na veličinu prihranjivanja. Takođe, merenjem proticaja na aktivnim ponorima može se utvrditi veličina gubitka površinske vode.

Podzemni doticaj predstavlja količinu vode koja prihranjuje izdan isticanjem iz neke druge, susedne izdani. Stevanović (1991) navodi da su za određivanje ovog bilansnog elementa neophodna kontinuirana osmatranja režima izdani uz konstantnu korelaciju kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika ležišta između kojih se vrši raspodela voda, na osnovu čega se može zaključiti da je ovaj član najteže merljiv. Podzemni doticaj može biti lateralan ili vertikaln, kada se gravitacione ili ascedentne vode infiltriraju u izdan (Stevanović, 2015c).

Površinski oticaj podrazumeva bi onu količinu atmosferskih padavina koja se, nakon izlučivanja na površinu terena, sakuplja u površinske rečne tokove i njima otiče ka regionalnim erozionim bazisima. Ovaj član bilansne jednačine u karstu najčešće ima niske vrednosti budući da je apsorpciona moć otvorenih karstnih terena velika, te se velike količine vode infiltriraju u podzemlje, a rečna mreža u karstu je slabo razvijena. Površinski oticaj na karstnim terenima se najčešće formira nailaskom poplavnog talasa, kada se podzemlje zasiti infiltriranim vodom, što se najčešće dešava tokom prolećnih meseci kada dolazi do obilnih padavina, koje su često praćenje otapanjem snega. Površinski oticaj se određuje merenjem proticaja svih stalnih ili povremenih površinskih tokova koji se nalaze na terenu, gde se merenje vrši na njihovim izlaznim profilima.

Podzemni oticaj podrazumeva količinu vode koja se iz jedne izdani infiltrira u drugu izdan (u dubljim delovima karstne izdani) ili površinski tok. Ovaj parametar je najteže odredljiv i obično se aproksimativno ocenjuje. Crpenja iz grupe bunara lociranih u izdanima na bliskom kontaktu sa karstom (npr. aluvijonu ili poroznim sedimentima u basenima) mogu dati približnu ocenu o veličini podzemnog oticaja iz karsta. Simultana hidrometrijska merenja površinskih tokova mogu dati rezultat ukoliko karstna izdan podzemno prihranjuje rečni tok. U slučaju pravilnog pozicioniranja mernog profila, vrednosti pa čak i mesto podzemnog isticanja (tj. prihranjivanja površinskog toka) mogu se locirati sa zadovoljavajućim stepenom tačnosti. Pored ovih metoda, Stevanović (1991) navodi da se za odredbu podzemnog isticanja mogu primeniti simultane termometrijske metode gde se na osnovu temperaturnih anomalija površinskih voda mogu odrediti mesta podzemnog isticanja voda u rečne tokove.

Evapotranspiracija podrazumeva sumarno isparavanje vode sa celog sliva uključujući isparavanja vode sa površine terena, sa slobodne vodene površine, intercepciju sa šuma i drugih vrsta vegetacionog pokrivača, kao i transpiraciju. Na vrednosti evapotranspiracije utiču meteorološki parametri, vlažnost zemljišta, vegetacija, poljoprivredne kulture koje se na površini terena uzgajaju. Izračunavanje evapotranspiracije je vrlo kompleksno, budući da veliki broj parametara utiče na nju.

Isticanje preko vrela podrazumeva direktan vid praženjenja karstnog sistema. Karstna vrela najčešće se nalaze na obodnim delovima otvorenih karstnih masiva, gde karbonatni sedimenti dolaze u kontakt sa nekarbonatnim naslagama, dok je sam položaj karstnih vrela uzrokovan položajem rasednih struktura i pukotinskih sistema (Stevanović, 1991). Određivanje ovog parametra je izvodljivo jednostavnim merenjem izdašnosti karstnih vrela u okviru sliva. Međutim, da bi se stekla realna slika o vrednostima izdašnosti, režimu isticanja i načinu praženjenja neophodno je kontinuirano meriti veličinu isticanja na što većem broju izvora jednog sliva.

Efektivna infiltracija jedan je od bitnih članova bilansne jednačine i sa hidrogeološkog aspekta verovatno najznačajniji. Ona predstavlja količinu vode koja se infiltrira u saturisanu zonu nakon gubitaka na isparavanje, zasićenje zemljišne vlage i fizičko – hemijsko vezivanje za poroznu sredinu. Može se odrediti direktno preko lizimetra u povlatnom sloju, osmatranjem nivoa podzemnih voda ili analizom hidrograma, dok se posredno može odrediti primenom npr.

metode CMB (engl. *Chloride Mass Balance*) gde se preko odnosa koncentracije hlora u padavinama i podzemnim vodama dobija veličina efektivne infiltracije (Bromley et al. 1997).

Evaporacija sa nivoa izdani predstavlja isparavanje vode sa slobodne vodene površine izdani i praktično može se zanemariti, pogotovo ako se bilans izračunava za karstne izdani čiji se nivo nalazi na većim dubinama. Ovaj parametar se jako teško može odrediti, međutim u određenim slučajevima može se definisati preko fluktuacije nivoa uz uslov da nema dreniranja i prihranjivanja izdani.

Greške pri proračunu podrazumevaju sve one neprecizne procene parametara koji ulaze u bilans voda. Pretpostavka je da greška mora postojati iz razloga što je nemoguće precizno odrediti sve parametre, ali treba težiti da ona bude što manja.

Postoji nekoliko nivoa sigurnosti pri analizi bilansa podzemnih voda, koje najviše zavise od perioda osmatranja i od faktora koji se osmatraju. Stevanović (2015c) izdvaja 4 nivoa sigurnosti pri proceni bilansa:

- *Siguran nivo* – baziran na najmanje 10-ogodišnjem periodu osmatranja od strane nacionalne organizacije stručne za obavljanje hidrogeoloških/hidroloških poslova;
- *Relativno siguran* – baziran na najmanje 2-godišnjem periodu osmatranja i stohastičkom modeliranju;
- *Nesiguran* – baziran na trenutnim merenjima i opservacijama/modeliranju.
- *Potpuno nesiguran* - baziran na retkim merenjima, obilascima terena i gruboj proceni.

Na bilans karstne izdani utiče nekoliko faktora. U njih spadaju geološke karakteristike u planu i profilu i tipovima stena koje se nalaze na istražnom prostoru, hidrogeološki faktori (prostiranje izdani u horizontalnom i vertikalnom smislu), geomorfološki, klimatski, geobotanički, pedološki (vegetacioni) faktori i dr. Pored njih, veoma je važno odrediti vremenski period za koji se izračunava bilans, u smislu da se ne mogu očekivati relativno iste vrednosti bilansa ako se rade na višegodišnjem i sezonskom nivou.

Imajući u vidu da je određivanje nekih parametara jednačine moguće samo na osnovu procene, neki članovi mogu biti zanemareni, pre svih podzemni doticaj i evaporacija sa nivoa izdani. Iz tih razloga, kao i zbog uprošćavanja bilansiranja karstne izdani, bilansna jednačina može se aproksimovati sledećom jednačinom (4.39) (Stevanović, 1991):

$$P = Q_{sr} + gubici \quad (4.39)$$

gde su:

P – suma padavina koja se izluči na slivu;

Q_{sr} – sumarna izdašnost svih karstnih vrela u okviru slivnog područja;

$gubici$ – sumarna veličina svih ostalih članova rashodne komponente (evapotranspiracije, površinski oticaj i podzemno isticanje).

Jednačina (4.39) korišćena je pri proračunu bilansa podzemnih voda odabranih karstnih sistema, imajući u vidu definisane ulazne i izlazne parametre. Izražavajući jednačinu (4.39) po Q , proračun bilansa podzemnih voda u karstu može se definisati u vidu sledeće relacije (4.40):

$$P - AET = Q \pm \Delta S \quad (4.40)$$

gde su:

P – prosečna godišnja suma korigovanih vrednosti padavina koje uključuju korekciju kiše i ukupni sneg pretvoren u vodeni ekvivalent (mm);

AET – prosečna godišnja suma stvarne evapotranspiracije sračunata linearizovanom metodom Torntvajta uz korišćenje korekcionog faktora za proračun potencijalne u stvarnu evapotranspiraciju (mm);

Q – prosečna godišnja izdašnost karstnog sistema;

ΔS – promene rezervi karstnih podzemnih voda u sistemu.

Pored određivanja bilansa karstnih podzemnih voda, neophodno je istovremeno izvršiti i proračun rezervi voda. Rezerve prema definiciji podrazumevaju zapreminu vode koja se nalazi u sistemu. One se mogu podeliti na *dinamičke* i *statičke* rezerve, *bilansne*, *vanbilansne* i *eksploatacione* rezerve. *Dinamičke* rezerve se definišu kao zapremina vode koja je akumulirana između maksimalnog i minimalnog nivoa izdani, odnosno kote isticanja, a mogu se izjednačiti sa srednjegodišnjom vrednošću isticanja vode na vrelu. Takođe, dinamičke rezerve se mogu izjednačiti i sa vrednošću Q_{50} sa krive trajanja protoka karstnog vrela koja odgovara medijalnoj vrednosti, budući da je ona realnija od aritmetičke sredine ekstremnih vrednosti. *Statičke* rezerve podrazumevaju zapreminu vode akumuliranu ispod kote isticanja do baze karstifikacije.

Proračun statičkih rezervi podrazumeva korišćenje jednačine (4.41):

$$Q_{st} = \mu \times V \quad (4.41)$$

gde su:

Q_{st} – statičke rezerve izdanskih voda (m^3)

μ – koeficijent karstifikacije karbonatnih sedimenata (efektivna poroznost)

V – zapremina izdanske zone (debljina sedimenta (m) od kote isticanja do baze karstifikacije sa površinom (m^2))

Statičke rezerve ne uključuju period diskretizacije vremena, tj. radi se o izračunavanju samo zapremine sistema koji akumulira vodu (efektivna poroznost akumulacionog prostora), dok dinamičke rezerve imaju vremensku komponentu, tako da se one izražavaju u m^3/god ili m^3/s .

Eksploatacione rezerve podrazumevaju onu zapreminu vode koja se može nesmetano koristiti za različite potrebe, ali u skladu sa održivim razvojem. Određivanje eksploatacionih rezervi uslovljeno je brojnim faktorima. Svakako, prvi od njih je detaljno upoznavanje resursa i raspoložive količine podzemnih voda. Osim toga, moraju se precizno definisati koje su potrebe za vodom, ali i ekološki uslovi, tako da je potrebno uspostaviti tzv. bezbedni proticaj (engl. *safe yield*) koji će korisnicima osigurati kontinualnu isporuku kvalitetne vode, a sa druge strane neće imati negativne posledice na ekološke uslove. Iz tih razloga, postoji nekoliko osnovnih obrazaca (tabela 4.2) koji definišu eksploatacione rezerve uzimajući u obzir količinu resursa kojim se raspolaže i konkretne uslove na području.

Na osnovu tabele 4.2, postavlja se pitanje: koju od formula koristiti pri proračunu eksploatacionih rezervi? Tačnog odgovora, po pravilu nema. Aplikativnost prethodno navedenih formula zavisiće isključivo od konkretnih uslova na terenu. Tako, npr. korišćenje eksploatacionih rezervi samo kao dela statičkih rezervi (ili u poslednjem slučaju kada vodoprivredno ograničenja potpuno limitiraju eksploataciju) je u najvećem broju slučajeva veoma loše, ali ukoliko je to jedino rešenje pitanja vodosnabdevanja stanovništva, onda se i taj slučaj razmatra. Takvih primera je mnogo u aridnim zemljama.

Sa druge strane, čest je slučaj kada se kao eksploatacione rezerve koriste cele dinamičke i deo statičkih rezervi umanjani za vodoprivredna ograničenja (slučaj 3). Ovaj slučaj je najčešći u uslovima kada se tokom godine slobodno mogu koristiti izdanske vode uz poštovanje

vodoprivrednih ograničenja, dok se u malovodnim periodima smanjuje eksploatacija dinamičkih, odnosno potpuno obustavlja eksploatacija statičkih rezervi (Stevanović, 2011). Druga opcija koja se može primeniti u ovom slučaju podrazumeva povećanje eksploatacionih rezervi crpenjem statičkih rezervi, s tim da se deo voda upušta u rečno korito radi obezbeđenja ekološkog protoka. Takođe, vodoprivredno ograničenje podrazumeva vodoprivredni minimum kao količinu vode koja se mora ostaviti nizvodnim potrošačima u slivu, tj. ne sme se narušiti malovodni period, odnosno biološki minimum koji podrazumeva količinu vode koja omogućava nesmetano funkcionisanje ekosistema.

Tabela 4.2. Formule za određivanje eksploatacionih rezervi (Q_{exp}) (Stevanović, 2011)

Objašnjenje	Formula	Legenda
1. Q_{exp} samo kao deo statičkih rezervi	$Q_{exp} = n \times \frac{Q_{st}}{T}$	Q_{exp} – eksploatacione rezerve
2. Q_{exp} kao cele dinamičke i deo statičkih rezervi	$Q_{exp} = Q_{dyn} + n \times \frac{Q_{st}}{T}$	Q_{st} – statičke rezerve Q_{dyn} – dinamičke rezerve
3. Q_{exp} kao cele dinamičke i deo statičkih rezervi u funkciji vodoprivrednog ograničenja	$Q_{exp} = Q_{dyn} + n \times \frac{Q_{st}}{T} - VO$	T – period eksploatacije n – korekcionni faktor
4. Q_{exp} kao deo dinamičkih rezervi u funkciji vodoprivrednog ograničenja (vodoprivredni minimum)	$Q_{exp} = Q_{dyn} - VO (VM)$	VO – vodoprivredno ograničenje VM – vodoprivredni minimum
5. Q_{exp} kao deo dinamičkih rezervi u funkciji vodoprivrednog ograničenja (biološki minimum)	$Q_{exp} = Q_{dyn} - VO (BM)$	BM – biološki minimum
6. Nema eksploatacionih rezervi	$Q_{exp} < VO (BM)$	

Pri određivanju eksploatacionih rezervi neophodno je tačno precizirati za koji period se izračunavaju eksploatacione rezerve. To je posebno važno zbog pravilnog određivanja dela statičkih rezervi koje se mogu koristiti u okviru eksploatacionih rezervi, budući da pored hidrogeoloških uslova, kvantitet ovih rezervi zavisi i od perioda tokom kojeg se koriste. Iz tog razloga, Stevanović (1991) uvodi *faktor eksploatacije* u tri kategorije: Prva kategorija je najnepovoljnija i dozvoljava iskorišćenje 20% statičkih rezervi u periodu od 35 godina. Druga kategorija uključuje iskorišćenje do 35% statičkih rezervi za period eksploatacije do 35 godina, dok treći dozvoljava eksploataciju i do 50% statičkih rezervi u istom periodu eksploatacije (u slučaju izdani sa dobrim obnavljajućim potencijalom).

4.3.2.2 Definisane koncepta ocene kvantitativnih pritiska

Koncept ocene kvantitativnog pritiska na karstne podzemne vode podrazumeva komparaciju eksploatiranih količina podzemnih voda karstnog sistema sa raspoloživim rezervama podzemnih voda istog sistema. Raspoložive rezerve podzemnih voda jednog karstnog sistema podrazumevale bi njegove eksploatacione rezerve umanjene za ekološki optimum. Pojam **ekološki optimum** podrazumevao bi potrebe ekosistema i nizvodnih korisnika, koje je potrebno zadovoljiti u toku hidrološke godine, tj. ovaj pojam integriše potrebe biotopa i biocenoze koje se moraju obezbediti pri upravljanju podzemnim vodama. Kvantifikacija ekološkog optimuma ne mora nužno da zadovoljava „ostavljanje“ samo minimalne izdašnosti karstnog vrela ekosistemu i nizvodnim korisnicima na raspolaganje, već može uključiti i nešto veću količinu podzemnih voda koju je potrebno obezbediti ekosistemu i nizvodnim korisnicima u cilju njihovog normalnog funkcionisanja.

Ekološki optimum može se odrediti na osnovu sledeće relacije (4.42):

$$Q_{eo} = 0.2 \cdot Q_{50} \quad (4.42)$$

gde su:

Q_{eo} – količine vode, određene kao ekološki optimum koje bi trebalo ostaviti za potrebe nizvodnih korisnika i/ili zavisnih ekosistema za nesmetano funkcionisanje;

Q_{50} – medijalna ili izdašnost vrela koja se javlja u minimum 50% vremena na krivoj trajanja protoka, što predstavlja i vrednost dinamičkih rezervi podzemnih voda karstnog sistema.

Finalno, za potrebe ocene eksploatacionih rezervi odabranih karstnih sistema u okviru disertacije primenjena je jednačina (4.43), odnosno slučaj 4 iz Tabele 4.2:

$$Q_{expl} = Q_{dyn(50)} - Q_{eo} \quad (4.43)$$

gde su:

Q_{expl} – eksploatacione rezerve podzemnih voda karstnog sistema:

$Q_{dyn(50)}$ – dinamičke rezerve podzemnih voda karstnog sistema, odnosno izdašnost vrela koja se javlja u minimum 50% vremena na krivoj trajanja protoka (medijalna vrednost);

Q_{eo} – ekološki optimum.

Takođe, pri definisanju kvantitativnih pritisaka može se proračunati još jedan ekološki parametar – *alarmni prag*, tj. vrednost isticanja podzemnih voda ispod koje ne sme da padne ekološki optimum, tj. izdašnost karstnog vrela (Bonacci, 2003; Stevanović et al. 2022a). Ova vrednost određena je jednačinom (4.44) (Bonacci, 2003; Stevanović et al. 2022a):

$$Q_{ap} = 0.2 \cdot Q_{80} \quad (4.44)$$

gde su:

Q_{ap} – isticanje vrela predstavljeno kao alarmni prag ispod koje ekološki optimum ne sme pasti;

Q_{80} – izdašnost vrela koja se javlja u minimum 80% vremena na krivoj trajanja protoka.

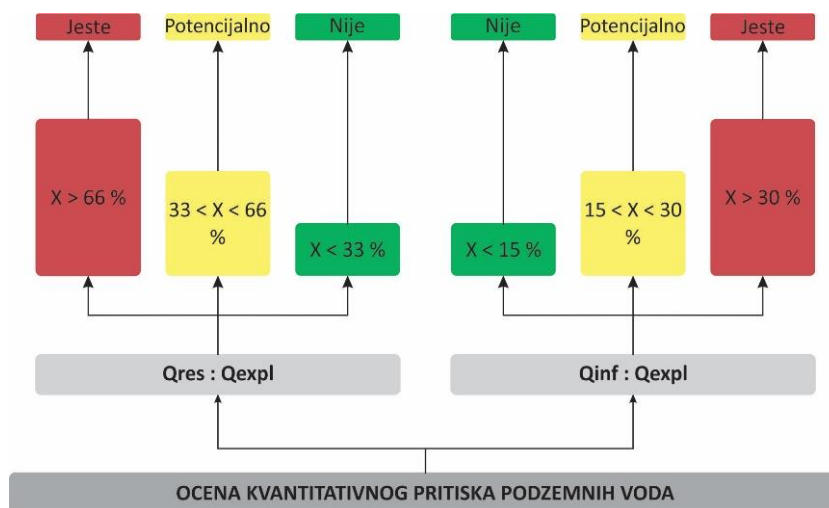
ODV i prateći CIS Vodič br. 18, koji se odnosi na ocenu statusa podzemnih voda, definiše da su podzemne vode u dobrom kvantitativnom statusu ako „*prosečne višegodišnje vrednosti eksploatacije podzemnih voda ne prelaze raspoložive rezerve podzemnih voda*“, zatim ako nivoi podzemnih voda održavaju zavisne ekosisteme i tokove površinskih voda ili ako ne prouzrokuju intruziju morskih voda. Na ovaj način definisan je koncept ocene kvantitativnog statusa u smislu određivanja odnosa raspoloživih rezervi i ukupne količine eksploatisane vode. Međutim, kada se radi o kvantifikaciji ovog odnosa u smislu preciznog definisanja granice kada su podzemne vode pod kvantitativnim pritiskom, a kada ne, ODV ne daje precizna uputstva, već ostavlja svakoj zemlji da odredi svoje kriterijume. Ovo se čini kao logično rešenje, imajući u vidu priličnu heterogenost u prostornoj i vremenskoj distribuciji podzemnih voda na prostoru čitave Evrope. Stoga, Marinović & Stevanović (2019) predlažu dva koncepta koje je moguće primeniti pri definisanju kriterijuma za ocenu kvantitativnog statusa podzemnih voda u terenima sa relativno povoljnim uslovima obnavljanja vodnih resursa (kontinentalne oblasti poput Dinarskog karsta):

1. *Podzemne vode karstnog sistema su pod pritiskom, ako ukupna eksploatacija podzemnih voda prelazi dve trećine ukupno raspoloživih rezervi podzemnih voda.*
2. *Podzemne vode karstnog sistema su pod pritiskom, ukoliko godišnja vrednost eksploatacije podzemnih voda prevazilazi 30% količine novoinfiltrirane vode.*

Takođe, radi sigurnijeg definisanja kvantitativnog statusa podzemnih voda, pogotovo u zemljama koje nisu članice EU i koje nemaju adekvatnu pokrivenost teritorije monitoring

mrežom, može se uvesti dodatna kategorija – *potencijalno pod pritiskom*. Ova kategorija podrazumeva slučajeve kada su eksploatisane količine podzemnih voda između jedne i dve trećine ukupno raspoloživih rezervi, dok drugi koncept uključuje ovu kategoriju ukoliko trenutna eksploatacija iznosi između 15 i 30% novoinfiltrirane vode (Sl. 4.9). Dostupnost raspoloživih podataka diktira odabir koncepta ocene kvantitativnog pritiska, mada bi oba koncepta trebalo da daju slične rezultate.

S obzirom na to da su u sklopu istraživanja za potrebe izrade doktorske disertacije odabrani i karstni sistemi iz kojih se ne eksploatišu vode, u tim slučajevima usvojena je preliminarna hipoteza da podzemne vode ovih sistema nisu pod kvantitativnim pritiskom, s obzirom na to da nisu kaptirane. Za ove primere izvršen je proračun maksimalne količine vode koja bi se hipotetički mogla koristiti tako da karstni sistem ostane u klasi *Nije pod pritiskom*. Drugim rečima, kreiran je scenario prema kome je određena maksimalna količina vode koja bi potencijalno mogla da se eksploatiše tako da procentni odnos sa eksploatacionim rezervama, odnosno novoinfiltriranim vodama bude 32,9% odnosno 14,9%, dakle praktično na samoj granici klasa *Nije pod pritiskom* i *Potencijalno pod pritiskom*. Prvi uslov koji bi trebalo zadovoljiti pri optimizaciji rešenja u okviru ovog scenarija, odnosno proračunu maksimalne količine vode koja bi se mogla eksploatisati jeste da ona bude na nivou 32,9% eksploatacionih rezervi. Nakon toga, ukoliko ta količina vode zadovoljava i uslov da iznosi 14,9% novoinfiltrirane vode, proračunata vrednost maksimalne količine vode koja se može iscrpeti se usvaja. Ukoliko to nije slučaj, rešenje se dodatno optimizuje na osnovu dopunskog kriterijuma ($Q_{zahvaćeno} = 14,9\% I_{ef}$), tako da zadovolji i drugi uslov. Optimizacija rešenja za proračun maksimalne količine vode koja se može eksploatisati tako da sistem nije pod kvantitativnim pritiskom izvršena je korišćenjem programskog dodatka *Solver* u okviru *Microsoft Excel* softvera, pomoću generalizovane metode redukovanih gradijenata za nelinearne sisteme (engl. *Generalized reduced gradient nonlinear method*) (Lasdon et al. 1974).



Sl. 4.9. Shematski prikaz ocene kvantitativnog pritiska na karstne podzemne vode

4.3.3 Formiranje metodologije ocene pritiska na kvalitet karstnih podzemnih voda

4.3.3.1 Metodologija kreiranja karata ranjivosti podzemnih voda

Pojam „ranjivost podzemnih voda“ prvi put se pominje sredinom dvadesetog veka, odnosno 1968. u Francuskoj, kada ovaj termin uvodi Margat u naučnu nomenklaturu. Margat (1968) definiše da je ranjivost podzemnih voda u funkciji geoloških, hidrogeoloških i hidroloških karakteristika sredine, odnosno da se sa lateralnom promenom (hidro)geoloških parametara menja i stepen ranjivosti podzemnih voda. Sve promene u ranjivosti podzemnih voda prikazuju su na odgovarajućim kartama ranjivosti, koje su bile zasnovane na različitim hidrogeološkim

faktorima u vidu dubine do nivoa podzemnih voda, vodopropusnosti povlatnih slojeva, veze između površinskih i podzemnih voda i brzine filtracije podzemne vode (Živanović, 2011).

Iako postoje različita tumačenja termina *ranjivost podzemnih voda*, sva ona se suštinski ogledaju u tome da ranjivost podzemnih voda praktično podrazumeva stepen zaštite koju geološki medijum pruža podzemnim vodama pri infiltraciji zagađujućih materija. Sličnu definiciju navodi i Živanović (2011), prema kome "*ranjivost podzemnih voda možemo definisati kao skup osobina prirodne sredine koje određuju osetljivost izdani na zagađivanje sa površine terena*".

Prema tipu ranjivosti, Vrba & Zaporozec (1994) izdvajaju sledeća dva tipa:

- Opšta ranjivost podzemnih voda (engl. *intrinsic vulnerability*), koja podrazumeva ocenu ranjivosti podzemnih voda isključivo na osnovu prirodnih karakteristika izdani (u vidu geoloških, hidrogeoloških i hidroloških karakteristika izdani), dok se osobenosti zagađujuće materije ne razmatraju; i
- Specifična ranjivost podzemnih voda (engl. *specific vulnerability*), koja pored prirodnih faktora geološke sredine i podzemnih voda, u razmatranje uzima i karakteristike zagađujućih materija.

Ranjivost podzemnih voda se prikazuje na kartama ranjivosti, koje podrazumevaju manje ili više subjektivnu ocenu autora o prirodnoj ranjivosti podzemnih voda. Osnovna svrha izrade ovakve karte je klasifikacija i izdvajanje područja sa različitim stepenom ranjivosti, odnosno potencijalne ugroženosti, koje se na kartama prikazuju različitim bojama ili šrafurama. Milanović S. et al. (2010) navode prednosti izrade karte ranjivosti, odnosno pouzdane ocene prirodne ranjivosti podzemnih voda u vidu:

- Obezbeđivanja korisniku što tačnije procene osetljivosti izdani na ljudski uticaj;
- Omogućavanja poređenja relativne ranjivosti sa ljudskim uticajem;
- Omogućavanja poređenja relativne ranjivosti dveju izdani na različitim lokacijama;
- Obezbeđivanja upotrebe svih raspoloživih podataka da bi se izvela najbolja moguća interpretacija.

Savremena izrada karata ranjivosti podrazumeva skoro kao obavezujući rad po standardima geografskog informacionog sistema (GIS). Metode definisanja ranjivosti podzemnih voda mogu biti različite u zavisnosti od ulaznih parametara, odnosno tipa izdani za koju je konkretna metoda kreirana. Neke od najčešće korišćenih metoda su DRASTIC (Aller et al. 1987), EPIK (Dörflinger & Zwahlen, 1997), PI (Goldscheider et al. 2000), COP (Vias et al, 2002) i dr.

Koncept ranjivosti podzemnih voda, u svojoj inicijalnoj fazi zamišljen je na nivou manjeg slivnog područja, odnosno ležišta podzemnih voda. Takav pristup sledili su i autori koji su razrađivali i kreirali nove metode ranjivosti, najviše zbog dostupnosti neophodnih podloga za izradu same karte. Razmera definisanja ranjivosti podzemnih voda direktno diktira preciznost i nivo ulaznih podataka koji su neophodni za ocenu ranjivosti. Karte ranjivosti podzemnih voda uglavnom se kreiraju u razmeri od 1:10.000, pa do 1:250.000, dok u određenim slučajevima ocena ranjivosti može da se radi u razmeri 1 : 1.000.000, ili 1:2.000.000, kada se sagledava ranjivosti podzemnih voda jednog velikog područja (Foster et al. 2002; Jemcov & Živanović, 2020). Takav slučaj je recimo pri izradi regionalnih karata ranjivosti podzemnih voda, koje bi kao takve trebalo da uđu u planove upravljanja vodnim resursima kao neophodna podloga. Regionalne karte ranjivosti podzemnih voda imaju za cilj da prikažu generalnu ranjivost podzemnih voda na nacionalnom nivou, čime se ukazuje na lokacije koje su najpodložnije zagađenju. Time se dobija šira slika o ranjivosti podzemnih voda na nivou države, čime se stiču uslovi za fokusiranje istraživanja i preventivnog delovanja na kritične tačke (engl. *hot spots*).

Jedan od prvih primera kreiranja regionalne karte ranjivosti podzemnih voda izvršen je na prostoru Španije, tačnije na teritoriji provincije Alikante (Hernandez et al, 2004). Karta ranjivosti podzemnih voda na području Alikantea izvršena je pomoću DRASTIC metode. Ova metoda ocene ranjivosti podzemnih voda je pokazala da se najveće vrednosti ranjivosti podzemnih voda nalaze na prostoru otvorenih krečnjačkih površina, odnosno na terenima gde je nivo podzemnih voda blizu površine terena. Sa druge strane, jedan od prvih primera kreiranja regionalne karte ranjivosti podzemnih voda na nivou cele države u Evropi, urađen je na teritoriji Srbije, prema metodi IZDAN (Milanović S. et al. 2010), posebno kreiranoj za ovakav regionalni nivo. Sličan primer urađen je za prostor Savskog (Crnomorskog) sliva u Bosni i Hercegovini i teritoriju Crne Gore, prema novoformiranoj metodi **SODA** (Stevanović & Marinović, 2015; 2020), koja razmatra ranjivosti podzemnih voda akumuliranih u plićoj, prvoj izdani. Ova metoda kreiranja karte ranjivosti podzemnih voda u sebi uključuje faktore, koji su odabrani na osnovu značaja za prostor centralnog Balkana:

- Parametar **S** – inklinacija, nagib terena (engl. *Slope*)
- Parametar **O** – pokrivka, povlatni sloj (engl. *Overlying strata*)
- Parametar **D** – dubina do nivoa podzemnih voda (engl. *Depth to the GW table*)
- Parametar **A** – tip izdani (engl. *Aquifer*)

Za svaki od pojedinačnih parametara utvrđeni su težinski koeficijenti (od 1 do 10), čije vrednosti po pravilu rastu u pravcu “nepovoljnijih” sa aspekta uticaja koji imaju na ranjivost podzemnih voda. Tako, npr. najblaži nagib terena oceniće se najvećim težinskim koeficijentom (10), jer smanjenje mogućnosti površinskog oticaja i produženje “boravka” zagađujuće supstance na površini terena povećava mogućnost njegove infiltracije. Slično, izdani bez ili sa vrlo tankom nepropusnom povlatom diktiraju mogućnost lakog prodiranja zagađujuće supstance, tako da se oni ocenjuju najvećim koeficijentima. Ovakav gradacijski sistem koriste i druge metode ocene ranjivosti, kao što je npr. DRASTIC metoda.

Nagib terena (inklinacija, podloga S) predstavlja važnu podlogu pri kreiranju karte ranjivosti budući da direktno ukazuje na moguće brzo ili sporo površinsko oticanje, čime se definiše i period zadržavanja površinskih voda na konkretnom terenu, što dalje ima uticaja na infiltraciju u podzemlje. Ova podloga se može kreirati na osnovu dostupnog digitalnog elevacionog modela terena (DEM). Upotrebom *ArcGIS* platforme i ekstenzije *Spatial Analyst Tools* sa opcijom *Surface/Slope*, DEM se transformiše predstavljajući nagib terena u procentima. Težinski faktori koji se zadaju pri transformaciji su predstavljeni u tabeli 4.3, a težinski koeficijenti su kreirani na osnovu IZDAN i DRASTIC metode. Tereni sa nagibom od 2% i 6% sadrže najveće težinske faktore, s obzirom na to da su to delovi terena sa kojih voda ne otiče ili otiče veoma sporo, te je mogućnost infiltracije najveća.

Tabela 4.3. Težinski faktori podloge (S) - nagib terena

Nagib (%)	Težinski faktor (S)
preko 18	1
između 12 - 18	3
između 6 - 12	5
između 2 - 6	9
manje od 2	10

Povlatni sloj (podloga O) predstavlja podlogu karte ranjivosti podzemnih voda, čija se uloga ogleda u (ne)otkrivenosti geološke sredine u kojoj je akumulirana podzemna voda. Drugim rečima, arteske izdani u neogenim kompleksima, koje se po pravilu nalaze na većim dubinama znatno su zaštićenije od karstnih izdani u otvorenim hidrogeološkim strukturama, kod kojih je

prisutan visok stepen infiltracije atmosferskih voda, ali i potencijalnog kontaminanta. Ova podloga se može odrediti prema litologiji i tipu zemljišta, relativno jednostavno sa pedoloških karta (slično kao kod DRASTIC metode) odnosno karata upotrebe zemljišnog sloja (tzv. *CORINE Land Use maps*), kao i na osnovu prisutnih tipova izdani. Međutim, ono što je otežano pri kreiranju ove karte, jeste odredba debljine povlatnog sloja. Razlog tome leži u činjenici da čak iako je debljina povlate određena u jednoj tački, nema garancije da je ista ili slična debljina prisutna i u drugoj. Međutim, aproksimacijom i analogijom sa okolnim terenima, moguće je definisati i očekivanu debljinu povlate, ukoliko ona postoji. Težinski koeficijenti podloge *O* dati su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Težinski faktor uticaja podloge (*O*) – pokrivka (povlatni sloj)

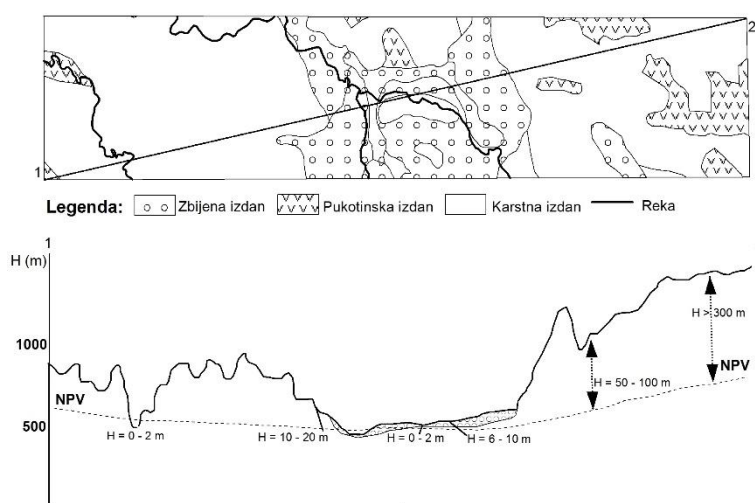
Litološke jedinice i njihova hidrogeološka funkcija	Debljina povlatnog sloja	Težinski faktor (<i>O</i>)
1. Aluvijalni, glacijalni i terasni sedimenti sa dominantnim sadržajem gline i debelim zemljišnim pokrivačem 2. Neogen – glina i zemljišni pokrivač	1. $H > 10$ m 2. $H > 20$ m	1-2
1. Pukotinska izdan 2. Aluvijalni, glacijalni i terasni sedimenti sa sadržajem gline i ostacima zemljišnog pokrivača 3. Neogen – glina, pesak	1. $H > 10$ m 2. $H = 8-12$ m 3. $H = 15-20$ m	3-4
1. Karstni sistemi i karstno – pukotinske izdani sa epikarstom debljine od 5 do 10 m 2. Aluvijalni, glacijalni i terasni sedimenti umerene propusnosti sa zemljišnim pokrivačem 3. Neogen – pesak, šljunak, glina sa zemljišnim pokrivačem	1. $H = 5-10$ m 2. $H = 3-8$ m 3. $H = 10-15$ m	5
1. Karstni sistemi i karstno – pukotinske izdani sa epikarstom debljine od 2 do 5 m 2. Aluvijalni, glacijalni i terasni sedimenti umerene propusnosti sa zemljišnim pokrivačem	1. $H = 2-5$ m 2. $H = 2-3$ m	6
1. Karstni sistemi sa epikarstom debljine od 1 do 2 m 2. Aluvijalni i fluvioglacijalni sedimenti umerene do visoke propusnosti sa tankim zemljišnim pokrivačem	1. $H = 1-2$ m 2. $H = 1-2$ m	7
1. Karstni sistemi sa kavernama, sa tankim povlatnim slojem 2. Aluvijalni i fluvioglacijalni sedimenti visoke propusnosti bez zemljišnog pokrivača	1. $H < 1$ m 2. $H < 1$ m	8
1. Karstni sistemi sa visokim stepenom karstifikacije i velikim brojem kaverni 2. Aluvijalni i fluvioglacijalni sedimenti visoke propusnosti, neograničeni	0	9
1. Karstni sistemi sa visokim stepenom karstifikacije i prisutnim pećinama i jamama, kavernama, svim klasičnim karstnim oblicima i veoma jakim izvorima	0	10

Dubina do nivoa podzemnih voda (D) predstavlja bitan faktor koji utiču na ranjivost podzemnih voda. Ova podloga podrazumeva odredbu položaja nivoa podzemnih voda u svakom pikselu rastera. Upravo ovaj faktor predstavlja najteže odredljiv parametar karte ranjivosti u sklopu ove metode, budući da ne postoji dovoljan broj bušotina i bunara, na kojima se meri nivo podzemnih voda. Kompleksnost ove podloge ogleda se i u problemu interpolacije nivoa kao tačkastih entiteta u različitim tipovima izdani. Ipak, najveći problem je neravnomernost ili pak

potpuno odsustvo podataka o nivoima podzemnih voda. Takođe, disproporcionalnost u dostupnosti podataka ogleđa se i po tipovima izdani, pa su tako dostupnije informacije o nivou podzemnih voda u intergranularnim i neogenim izdanima, u odnosu na karstne i pukotinske, gde praktično i nema osmatranja nivoa. Takođe, nije bilo moguće ni razmatranje sezonskih fluktuacija nivoa podzemnih voda, čime bi se mogle kreirati karte ranjivosti podzemnih voda u periodima visokih i niskih voda, ili po godišnjim dobima i sl. Da bi se dobile informacije o dubini do nivoa podzemnih voda, osim dostupnih podataka, moraju se primeniti određene aproksimacije zasnovane na topografskim i hidrogeološkim kartama, koje se zasnivaju na nadmorskoj visini glavnih izvora i kota terena u njihovom zaleđu, odnosno na proceni dubine do nivoa podzemnih voda u aluvijalnim sedimentima blizu površinskih rečnih tokova (Sl. 4.10). Težinski koeficijenti za podloge Dubina do nivoa podzemnih voda dati su u tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Težinski faktor uticaja (D) – Dubina do nivoa podzemnih voda

Tabela dubine do podzemne vode (m)	Težinski faktor (D)
> 300	1
100 - 300	3
50 - 100	4
20 - 50	6
10 - 20	7
5 - 10	8
2 - 5	9
< 2	10



Sl. 4.10. Aproksimacija ocene dubine do nivoa podzemnih voda za potrebe kreiranja podloge D u okviru karte ranjivosti (Stevanović & Marinović, 2020)

Tip izdani ili akvifera (A) predstavlja podlogu koja umnogome utiče na stepen ranjivosti podzemnih voda koji se može očekivati u konkretnoj hidrogeološkoj sredini. Naime, različiti tipovi izdani različito reaguju na hipotetički prodor zagađujuće supstance u hidrogeološku sredinu. Tako, intergranularne izdani dobrih filtracionih karakteristika (tj. sa visokim koeficijentima filtracije) i karstne izdani visokog stepena karstifikacije su visoko osjetljive (tj. ranjive) na potencijalna zagađenja, usled toga što se obično nalaze u okviru (polu)otvorenih hidrogeoloških struktura. Time je i definisana relativno laka infiltracija atmosferskih voda (ali i zagađujućih materija), čime se izdan relativno jednostavno zagađuje. Sa druge strane, duboke neogene izdani, odlikuju se povoljnijim karakteristikama sa aspekta zaštite podzemnih voda,

imajući u vidu veću dubinu zaleganja izdani i debeo zemljišni pokrivač u vidu povlatnog sloja, što ukazuje i na manju podložnost zagađenju.

Podloga A predstavlja zapravo uprošćenu hidrogeološku kartu teritorije za koju se kreira karta ranjivosti podzemnih voda. Težinski koeficijenti prikazani su u tabeli 4.6, a definisani su na osnovu raspoloživih hidrogeoloških karata različite razmere.

Tabela 4.6. Težinski faktor uticaja (A) – tipovi izdani

Tipovi izdani	Težinski faktor (TF)	Tipičan TF
Nepropusne stene	0-1	1
Pukotinski tip izdani	2	2
Intergranularni tip izdani u neogenim basenima, aluvijalne i terasne izdani niske do umerene propusnosti ($K_f > 1 \times 10^{-6}$ m/s)	2-4	3
Intergranularni tip izdani u neogenim basenima, aluvijalne i terasne izdani umerene propusnosti ($K_f = 1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$ m/s)	4-6	5
Karst i karstne izdani umerene propusnosti ($K_f = 1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$ m/s)	4-6	5
Aluvijalne, fluvio-glacijalne i terasne izdani umerene do visoke propusnosti ($K_f = 1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$ m/s)	6-8	7
Karstne izdani visoke propusnosti ($K_f = 1 \times 10^{-3}$ m/s)	8-9	9
Aluvijalne izdani duž glavnih reka, fluvio-glacijalne izdani, visoke propusnosti, neograničeni ($K_f = 1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$ m/s)	8-9	9
Karstne izdani visoke propusnosti sa snažnim izvorima ($K_f = 1 \times 10^{-3}$ m/s)	10	10

Nakon kreiranja sve četiri podloge, finalna karta ranjivosti podzemnih voda primenom SODA metode, može se dobiti sledećim algoritmom (4.45):

$$iR = (S \times 1) + (O \times 3) + (D \times 2) + (A \times 4) \quad (4.45)$$

gde su:

iR – indeks ranjivosti podzemnih voda;

S – vrednost težinskog koeficijenta nagiba terena;

O – vrednost težinskog koeficijenta povlatnog sloja;

D – vrednost težinskog koeficijenta dubine do nivoa podzemnih voda;

A – vrednost težinskog koeficijenta tipa izdani.

Kompilacijom prethodno navedenih podloga prema algoritmu (4.45), finalna karta ranjivosti mora biti klasifikovana u klase ranjivosti, koje predstavljaju standard ovakvog prikaza ranjivosti podzemnih voda. Klasifikacija ranjivosti podzemnih voda data je u tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Klasifikacija prirodne ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi

Ranjivost PV	Indeks
Vodonepropusne stene	< 10
Veoma niska	11 - 30
Niska	31 - 50
Umerena	51 - 70
Visoka	71-90
Veoma visoka	91 -100

4.3.3.2 Metodologija kreiranja karata hazarda podzemnih voda

Velika prirodna ranjivost karstnih podzemnih voda još više dolazi do izražaja kada se imaju na umu svi postojeći i potencijalni zagađivači na površini terena. Pomenuti zagađivači, predstavljeni na jedinstvenoj karti formiraju **Kartu hazarda podzemnih voda od zagađenja**, koja pokazuje sve zagađivače od kojih pretil opasnost. S obzirom na karakter zagađivača, ali i čestu nedostupnost katastra zagađivača na konkretnim terenima, karte hazarda podzemnih voda se najjednostavnije mogu kreirati na osnovu difuznih zagađivača na osnovu transformacije *CORINE Land Cover* karte (EEA, 2018). Saglasno legendi koja je prateći deo *CORINE* karte, svaki piksel na karti može imati vrednost u dijapazonu od 1 do 255, što predstavlja tip zemljišnog pokrivača. Budući da upotreba zemljišta može biti jedan od najvažnijih indikatora osetljivosti kvaliteta vode na zagađenja, svakom pikselu se dodeljuje koeficijent opterećenja od 0 do 1 u zavisnosti od potencijalne opasnosti od zagađenja. Pomenuti koeficijenti opterećenja su empirijski, uspostavljeni kao referentni standard, a u konkretnom slučaju preuzete iz evropskog projekta *CCWARE - Mitigating Vulnerability of Water Resources under Climate Change* (Čenčur Curk et al. 2014).

Transformacijom vrednosti piksela *CORINE* mape prema datim težinskim koeficijentima, dobija se karta hazarda prema difuznim zagađivačima, čije se vrednosti mogu klasifikovati u nekoliko kategorija, predstavljenih tabelom 4.8.

Tabela 4.8. Klasifikacija hazarda podzemnih voda

Hazard PV	Indeks
Bez hazarda	< 0.10
Veoma nizak	0.11 – 0.33
Nizak	0.34 – 0.60
Umeren	0.61 – 0.70
Visok	0.71 – 0.80
Veoma visok	0.81 – 1.0

4.3.3.3 Metodologija kreiranja karata rizika podzemnih voda

Karte hazarda podzemnih voda, koje reprezentuju potencijalnu opasnost od zagađenja podzemnih voda, mogu se kombinovati sa kartom prirodne ranjivosti čiji rezultat bi bila **Karta rizika u odnosu na difuzne zagađivače**. Kombinovanje karata ranjivosti i hazarda podzemnih voda prema difuznim potencijalnim zagađivačima podrazumeva množenje piksela ove dve karte, čime se dobijaju nove vrednosti koje zapravo predstavljaju rizik podzemnih voda od zagađenja. Naime, rizik zagađenja zavisice kako od potencijalnog difuznog zagađivača, tako i od ranjivosti podzemnih voda, pa tako npr. nizak stepen prirodne ranjivosti podzemnih voda može amortizovati visok stepen difuznog zagađivanja sredine usled neadekvatnog korištenja zemljišta i obratno.

Klasifikacija karata rizika podzemnih prema difuznim zagađivačima data je u tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Klasifikacija rizika podzemnih voda

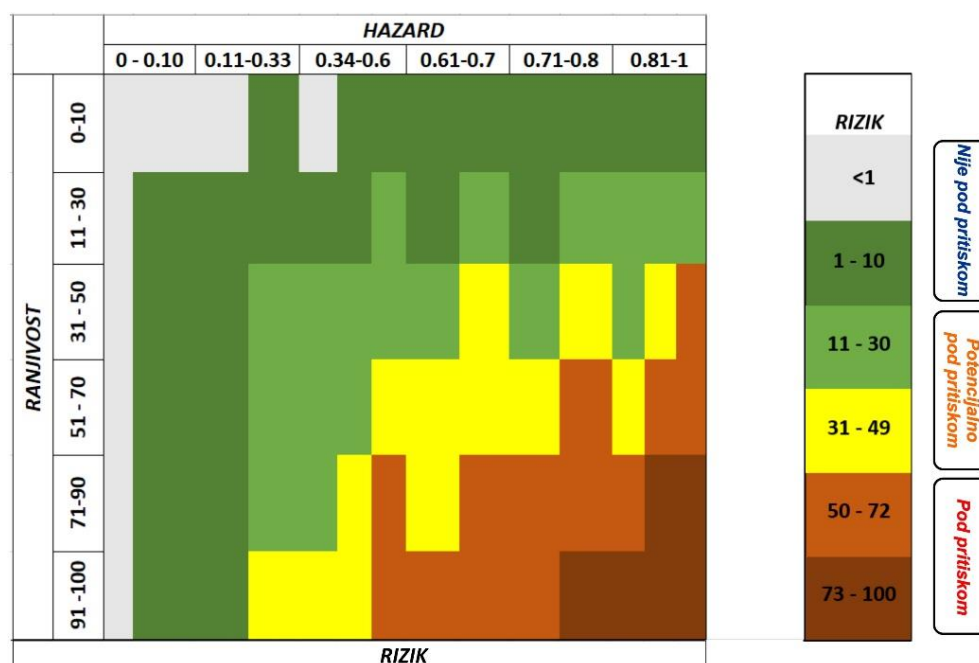
Rizik PV	Indeks
Bez rizika	< 1
Veoma nizak	1 – 10
Nizak	11 – 30
Umeren	31 – 49
Visok	50 – 72
Veoma visok	73 – 100

4.3.3.4 Definisanje koncepta ocene kvalitativnih pritisaka

Ocena pritisaka na kvalitet podzemnih voda karstnih sistema definisana je na osnovu karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda, na osnovu kategorija koje su date u tabeli 4.10. Tabela 4.10 pokazuje da generalno prve dve klase ranjivosti, hazarda i rizika podrazumevaju kategoriju *Nije pod pritiskom*, sledeće dve klase obuhvataju kategoriju *Potencijalno pod pritiskom*, dok poslednje dve klase ranjivosti, hazarda i rizika definišu kategoriju *Pod pritiskom*. Ovde je, takođe primenjen koncept koji uključuje kategoriju *Potencijalno pod pritiskom*, koja se uključuje u slučaju nedostatka adekvatnih podloga i podataka. Grafički prikaz koncepta kreiranja karata rizika podzemnih voda (Sl. 4.11) na osnovu karata hazarda i ranjivosti dat je na tzv. „toplotnoj“ karti rizika (engl. *Risk Heat Map*), na kojoj su vrednosti rizika podzemnih voda predstavljene dvodimenzionalno u bojama kako se obično predstavljaju i na karti. Sa slike 4.11 uočava se da sa povećanjem ranjivosti i hazarda povećava se i rizik zagađenja podzemnih voda, tj. pritisci na njihov kvalitet. Takođe, pomenuta toplotna karta sadrži i klase pritisaka koje su proistekle iz pripadajućih kategorija rizika podzemnih voda.

Tabela 4.10. Koncept klasifikacije ranjivosti, hazarda i rizika karstnih podzemnih voda prema difuznim zagađivačima i pripadajuće kategorije pritisaka na kvalitet podzemnih voda (Stevanović & Marinović, 2020)

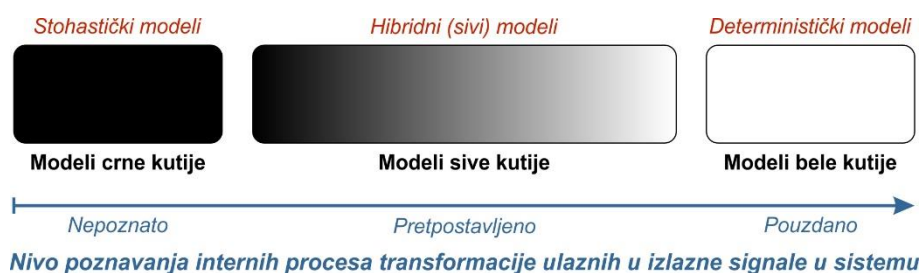
Ranjivost PV	Indeks	Hazard PV	Indeks	Rizik PV	Indeks	Pritisak
Vodonepropusne stene	< 10	Bez hazarda	< 0.10	Bez rizika	< 1	Nije pod pritiskom
Veoma niska	11 - 30	Veoma nizak	0.11 - 0.33	Veoma nizak	1 - 10	Potencijalno pod pritiskom
Niska	31 - 50	Nizak	0.34 - 0.60	Nizak	11 - 30	
Umerena	51 - 70	Umeren	0.61 - 0.70	Umeren	31 - 49	Pod pritiskom
Visoka	71-90	Visok	0.71 - 0.80	Visok	50 - 72	
Veoma visoka	91 -100	Veoma visok	0.81 - 1.0	Veoma visok	73 - 100	



Sl. 4.11. Toplotna karta rizika podzemnih voda i pripadajuće klase kvalitativnih pritisaka

4.4 Teorijske postavke modeliranja karstnih podzemnih voda

Prirodne i inženjerske nauke koriste različite simulacione modele kako bi se moglo predvideti ponašanje konkretnih sistema. Uspešnost simulacionog modela zavisi od niza faktora, među kojima prednjači kvalitet i obim ulaznih podataka i parametara, ali i poznavanje procesa koji konvertuju ulazni signal u izlazni. Kod inženjerskih nauka, pri simulaciji su najčešće poznati ulazni i izlazni signali sistema, ali i procesi koji se dešavaju u samom sistemu. To, međutim, kod prirodnih nauka nije slučaj, budući da je jako teško toliko dobro upoznati prirodni sistem, kako bi svi interni procesi bili precizno utvrđeni. Obično su ti procesi nepoznati ili aproksimirani, bez mogućnosti njihove decidne potvrde. Iz tih razloga, simulacioni modeli se u naučnoj praksi mogu svrstati u tri grupe – modeli crne, sive i bele kutije (Sl. 4.12). Modeli crne kutije (engl. *black box models*) predstavljaju modele sistema kod kojih su poznati (tj. merljivi) ulazni i izlazni signali, dok unutrašnjost sistema tj. procesi transformacije ulaza u izlaz ostaju nepoznati. Suprotno njima, modeli bele kutije (ili staklene kutije, engl. *white* ili *glass models*) podrazumevaju jasno određene ulazne i izlazne signale sistema, kao i precizno i tačno određene procese njihove transformacije i interakcije. Ovi sistemi se često nalaze u inženjerskim naukama (npr. elektrotehnici) kod kojih su obično jasni procesi koji pretvaraju impuls u izlazni signal. Modeli sive kutije (engl. *grey box*) imaju mesto između modela crne i bele kutije i predstavljaju njihovu tranzitnu fazu (Sl. 4.12) i pored ulaznih i izlaznih signala, uzimaju u razmatranje procese koji se dešavaju u sistemu, ali sa određenim pretpostavkama i dozom nesigurnosti.

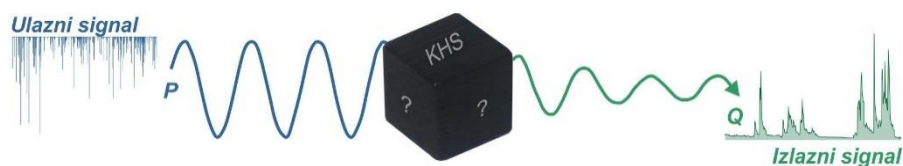


Sl. 4.12. Tri grupe simulacionih modela u inženjerskoj praksi

Modeli sive kutije se pokoravaju teoriji sivih sistema, koju prvi put uvodi Deng (1985), da bi danas nalazili primenu pri simulaciji opadanja rezervi vodnih resursa pod uticajem klimatskih promena (Bass et al. 1994), za simulaciju i predviđanje površinskog oticaja (Yu et al. 2001), odnosno simulaciju cirkulacije podzemnih voda (Mahmod & Watanabe, 2014) i fluktuacije nivoa podzemnih voda u bunarima u okviru baterije bunara (Thordarson, 2011). Poslednjih godina, nalaze svoju primenu u hidrogeologiji karsta pri modeliranju transformacija padavina u isticanje karstnih hidrogeoloških sistema primenom sivih (hibridnih) modela (Mohammadi & Mali, 2014). Takođe, Kovács & Sauter (2007), Tritz et al. (2011) i Rimmer & Hartmann (2012) navode formiranje modela sivih kutija u simulaciji KHS u vidu rezervoarskih modela (tzv. *reservoir* ili *lumped models*) koji mogu biti paralelni ili serijski i koji se mogu opisivati linearnim ili nelinearnim zakonima (Hartmann et al. 2014; Jukic & Denic-Jukic, 2006).

Karstni hidrogeološki sistemi najčešće se simuliraju modelima crne kutije, što predstavlja formiranje konceptualnih i simulacionih modela samo na osnovu ulaznih i izlaznih komponenti, dok fizički i prirodni procesi koji se dešavaju unutar sistema ostaju nepoznati (Sl. 4.13). Takav pristup je najviše zastupljen usled činjenice da je matematičko opisivanje prirodnih zakona i procesa vrlo kompleksno, dok je praktično nemoguće uključiti u jedan model i verno predstaviti sve procese koji dovode do pretvaranja ulaznog u izlazni signal. Ovi modeli ne zahtevaju poznavanje interne strukture sistema, već se karakterizacija funkcionisanja KHS zasniva na

međusobnoj povezanosti ulaznog i izlaznog signala. S tim u vezi, formiranje stohastičkih modela daje relativno dobre simulacije i prognoze na bazi modela crne kutije.



Sl. 4.13. Shematski prikaz modela KHS i transformacije ulaznih signala u izlazne na principu crne kutije

4.4.1 Deterministički modeli – mogućnosti i ograničenja primene

Modeli koji se zasnivaju na konceptu **sivih sistema** (pretpostavka funkcionisanja internih procesa karstnih hidrogeoloških sistema) nazivaju se determinističkim modelima i u hidrogeologiji karsta su retki i relativno nepouzdana. Osnovna razlika od stohastičkih modela jeste što deterministički modeli mogu dati odgovore na pitanja (Krešić, 2010; Mikszewski & Krešić, 2015):

- Kakav uticaj ima trenutna ili buduća eksploatacija podzemnih voda na nivo podzemnih i površinskih voda sa kojima je u hidrauličkoj vezi;
- Kako će reagovati potencijalni kontaminant na remedijacione mere i kakav će biti njegov transport kroz sistem?
- Broj i lokaciju bunara potrebnih da obezbede potrebnu količinu vode;
- Koja će biti vrednost isticanja karstnog vrela u određenom trenutku, ako ne bude bilo prihranjivanja na račun kiše;
- Kako će hipotetičko crpljenje voda određene vrednosti u zaleđu vrela uticati na samo vrelo?
- Koja količina vode će biti dostupna ukoliko se desi velika suša?
- Koje su mogućnosti precrpljivanja karstne izdani u recesionim uslovima i da li će izdan moći da kompenzuje ovu „pozajmicu“ na račun maksimalnih prolećnih i jesenjih izdašnosti? Da li svake godine može da se računa na ovaj vid regulacije karstne izdani?
- Kakva će biti prognoza kvaliteta podzemnih voda i kada će biti potrebno raditi tretman voda?
- Postoji li mogućnost za izgradnju površinske akumulacije i kakav će njen hipotetički uticaj biti na kvantitet podzemnih voda?
- Koliko dugo će biti potrebno kontaminantu da prođe kroz sistem i dođe do vrela? Koje koncentracije će biti u trenutku prolaska kroz vrelo?

Deterministički modeli mogu biti analitički i numerički i podrazumevaju predviđanje ili ocenu evolucije sistema u budućem periodu na osnovu precizno utvrđenog stanja sistema u prethodnom periodu bazirano na zakonima koji se odnose na cirkulaciju podzemnih voda (Krešić, 2010; Sivakumar, 2017). Drugim rečima, ovi modeli podrazumevaju proces sigurne i precizne simulacije tečenja (ili isticanja) podzemnih voda u vremenu t na osnovu ponašanja sistema u prethodnom vremenskom koraku $t_0 < t$. Naime, jako je teško predvideti pravce cirkulacije podzemnih voda u karstu i odrediti postojanje i lokaciju karstnih kanala koji dovode vodu do karstnih vrela. Takođe, pionirski pokušaji kreiranja determinističkih modela u karstu obuhvatali su formiranje ekvivalentne zapremine sredine koja će biti reprezentativna za ceo sistem. Takav koncept preuzet je iz hidrodinamičkog modeliranja podzemnih voda intergranularnih izdani. Međutim, takvom ekvivalentnom zapreminom je skoro nemoguće predstaviti i matričnu poroznost karsta i karstne kanale (engl. *EPM - Equivalent Porous Media*).

Sa druge strane, pomenuti hidrodinamički modeli u intergranularnoj sredini cirkulaciju podzemnih voda podrazumevaju u laminarnom režimu tečenja, što u karstnim sistemima

generalno nije slučaj, budući da cirkulacija karstnih podzemnih voda obično pripada turbulentnom režimu i samim tim se ne pokorava Darsijevom zakonu tečenja podzemnih voda. Pokušaji prevazilaženja ovog problema podrazumevali su zadavanje veoma visokih koeficijenata transmisibilnosti po privilegovanim pravcima tečenja, koji realno u prirodnim uslovima ne postoje, ili smanjivanje efektivne poroznosti matriksa krečnjaka, ali se oni nisu pokazali kao uspešni (Krešić, 1991, 2010).

Problem simulacije turbulentnog režima tečenja podzemnih voda u karstu uspešno je opisan procesom simulacije karstnih kanala kao cevovoda (engl. *Conduit Flow Process – CFP*) (Shoemaker, 2008; Krešić, 2010; Mikszewski & Krešić, 2015). CFP simulacioni model oslanja se na softverski paket MODFLOW, Američkog geološkog zavoda (USGS) i donosi nekoliko novih mogućnosti (Krešić, 2010):

- Povezivanje tradicionalnih jednačina kojima se opisuje cirkulacija podzemnih voda i jednačina diskretnih mreža cilindričnih cevovoda;
- Ubacivanje slojeva (podloga) sa visokim vrednostima koeficijenta filtracije koji mogu biti i u laminarnom i u turbulentnom režimu tečenja;
- Kombinacija prethodna dva slučaja.

Ovaj softver je jedan od najkorišćenijih i posebno pogodan jer je otvorenog kôda (engl. *open source*) i omogućava implementaciju različitih podpaketa koji integracijom u MODFLOW okruženje mogu rešavati konkretne i specifične probleme u hidrogeološkoj praksi. Međutim, iako ovaj softver ima brojne prednosti, glavni nedostaci ogledaju se u sledećem (Krešić, 2013; Mikszewski & Krešić, 2015): svi modelski slojevi (podloge) moraju biti kontinualni u celom modelu; nepouzdanost modela raste sa simulacijom velikih vertikalnih dislociranja slojeva uzrokovanih rasedima ili veštačkim strukturama; sve modelske ćelije moraju biti pravougaone, gde su redovi i kolone modela rasprostranjeni od jedne do druge granice modela; i nepouzdanost modela raste sa simulacijom kontakata porozne sredine koja sadrži velike razlike u vrednostima koeficijenata filtracije, što je posebno važno pri modeliranju karstnih sistema primenom ekvivalentne porozne zapremine veštačkim povećanjem hidrogeoloških parametara u karstnim kanalima.

Osim CFP procesa, poslednjih godina aktuelan je novi koncept kojim se do sada na najreprezentativniji način opisuje geometrija sistema i prostorna distribucija karstnih kanala i matrične poroznosti. Radi se o tzv. *nestrakturnoj mreži* (engl. *UnStructured Grid – USG*), koja je takođe razvijena u MODFLOW okruženju, kako bi se pukotinski i karstni sistemi verno predstavili (Panday et al. 2013; Krešić, 2013; Kresic & Panday, 2017; 2021). Suština koncepta ogleda se u tome što ovaj model uz pomoć različite kombinacije nodova može verno prikazati realno stanje u KHS sa aspekta prostorne distribucije sedimenata, poroznosti i kanala.

MODFLOW-USG je razvijen u cilju olakšanog pristupa modeliranju strakturnih i nestrukturnih mreža (tj. kontinualnih i diskontinualnih slojeva i kanala) pomoću mreže trouglova, šestouglova i ostalih poligonih oblika. Ovaj pristup dozvoljava visok nivo fleksibilnosti predstavljanja interne i eksterne geometrije sistema kombinacijom strakturne i nestrukturne mreže i poligona (Kresic & Panday, 2017; 2021).

Osim pomenutih numeričkih modela, Malard (2018) navodi i modele dvostrukog kontinuuma (engl. *Double Continuum Models – DCC*) koji simuliraju KHS sa dva kontinuuma povezanih transfer funkcijama – jedan za matričnu poroznost, a drugi za karstne kanale, zatim kombinovane diskretne modele kontinuuma (engl. *Combined Discrete-Continuum Models – CDC*) koji simulira karstne kanale diskretnim elementima, a matričnu poroznost konačnim elementima, i modele mreže diskretnih pukotina (engl. *Discrete Fracture Network Models –*

DFN) i modele mreže diskretnih kanala (engl. *Discrete Conduit Network models*) kojima se simulira tok podzemnih voda u karstu međusobno povezanim 3D karstnim kanalima.

Među numeričkim modelima, treba napomenuti i KARSYS pristup koji na osnovu 3D konceptualizacije modelira i simulira KHS (Malard, 2018). KARSYS pristup je razvijen od strane švajcarskog instituta za speleologiju i karst (engl. *Swiss Institute for Speleology and Karst Studies*) i predstavlja 3D pristup baziran na geološkim podlogama koji pored geoloških, uključuje i hidrogeološke informacije i hidrauličke zakone tečenja podzemnih voda u karstu u cilju formiranja konceptualnog modela (Jeannin et al. 2013; Malard, 2018). KARSYS pristup obuhvata nekoliko ekstenzija kojima se simulira prihranjivanje sistema, zatim simuliranje hidrauličkog toka podzemnih voda u karstnim kanalima, koje je posebno važno jer koristi prethodnu ekstenziju kao ulaz u sistem za simuliranje isticanja podzemnih voda i drugih komponenti sistema (akumulirane rezerve, uticaj veštačkih konstrukcija na sistem, uticaj poplavnih talasa, uloga lebdećih izdani i sl.) i ekstenzija koja se tiče preporuka za kartiranje KHS prema rezultatima dobijenim KARSYS modelima, koji se odnose na karte karstnih podzemnih voda, karte karstnih izdani i karte toka podzemnih voda u karstu (Malard, 2018). Ovaj pristup primenjen je na više karstnih terena u Švajcarskoj (Malard & Jeannin, 2013; Malard et al., 2015, 2016;) i Sloveniji (Turk et al., 2013, 2014) i pokazao se kao uspešan u modeliranju KHS.

Nelinearni karakter KHS umnogome otežava proces modeliranja bilo stohastičkim, bilo determinističkim modelima. Reakcija izlaznog signala na ulazni, tj. isticanja na prihranjivanje u okviru KHS ne odvija se linearnom zavisnošću, već se opisuje nekom od nelinearnih funkcija. Takav karakter je potpuno jasan iz činjenice da čak i minimalne promene u sistemu mogu prouzrokovati značajnu reakciju sistema, ali i obrnuto. Stoga, poslednjih godina sa razvojem savremenih računara i kompjuterskih tehnika, donekle je olakšano modeliranje KHS uz pomoć nelinearnih metoda. Među njima, kao najprimenljivije ističu se nelinearne stohastičke metode, metode veštačkih neuronskih mreža, metode fazi logike i dr. (Sivakumar, 2017).

4.4.2 Stohastički modeli – mogućnosti i ograničenja primene

Karstni hidrogeološki sistemi su izuzetno kompleksni medijumi koji imaju sposobnost nelinearne transformacije ulaznih signala sistema, tj. infiltriranih padavina u izlazni signal, tj. dreniranje sistema. Nelinearni karakter KHS ogleda se najviše u tome što npr. isti intenzitet padavina ne izaziva istu vrednost isticanja na vrelu, odnosno npr. duplo veća količina infiltrirane vode ne duplira vrednost isticanja na vrelu. Stoga, jasno je da se radi o nelinearnom karakteru sistema, gde na konvertovanje ulaznih signala u izlazne sigurno utiču i drugi faktori. Neki od njih su evolutivni karakter sistema, što znači da je sistem pod konstantnom mehaničkom i/ili hemijskom erozijom kojom voda „probija“ nove puteve kako bi stigla do vrela. Drugi faktori mogu uključivati efektivnu poroznost sistema (koja je povezana sa evolucijom sistema), saturaciju zemljišta i nadizdanske zone kroz koju se voda infiltrira i putuje do nivoa podzemnih voda, dok značajan faktor može biti i stanje dinamičkih rezervi, budući da skoro svaki KHS u novu hidrološku godinu (ili svaki period u kome se vrši bilansiranje ili ocena režima isticanja za stohastičke modele), „ulazi“ sa određenim količinama akumulirane vode koje će posredno diktirati ponašanje sistema pri isticanju podzemnih voda, kako u periodu prihranjivanja, tako i u recesionom periodu.

Budući da su procesi koji se dešavaju u KHS pri formiranju isticanja i dinamičkih rezervi na račun prihranjivanja izuzetno kompleksni, njihovo opisivanje matematičkim funkcijama predstavlja težak zadatak, što je generalni slučaj pri matematičkom opisivanju prirodnih fenomena i karaktera prirode. Stoga, pri opisivanju KHS koriste se konceptualni modeli, fizički modeli, kao i modeli crne kutije. Fizički modeli integrišu prostorne informacije u trodimenzionalnom prostoru, dok se uz dodavanje vremenske komponente, tj. povezivanjem

modela sa vremenskim serijama kvaliteta i kvantiteta, fizički modeli zapravo transformišu u 4D modele (Milanović S., 2010). Formiranje simulacionih modela isticanja KHS moguće je na osnovu konvolucije i kompozitnih transfer funkcija sistema (Denić-Jukić & Jukić, 2003). Modeli padavine – isticanje KHS (engl. *rainfall – runoff models*) bazirani na konceptu crne kutije simuliraju isticanje KHS primenom linearne forme integrala konvolucije, za šta je neophodno uspostaviti dve hipoteze: transfer funkcije sistema su nepromenljive u vremenu; i važe zakoni linearnosti sistema, proporcionalnosti ulaznih i izlaznih signala i princip superpozicije isticanja (Denić-Jukić & Jukić, 2003).

Matematičko opisivanje transformacije padavina u izdašnost moguće je ukoliko se npr. isticanje podzemnih voda razmatra kao promenljiva veličina zavisna od padavina (nezavisna promenljiva veličina). Takav postupak naziva se regresija (Krešić, 1991) i podrazumeva formiranje linearne ili nelinearne zavisnosti zavisno od nezavisno promenljive. Regresione jednačine mogu biti *linearne* ili *nelinearne*, kada se polinomnim, hiperboličnim i drugim funkcijama uspostavlja zavisnost, tj. *jednostavne* kada se radi samo o dve promenljive, odnosno *višestruke* kada je regresiona jednačina uključuje više nezavisno promenljivih. Jednostavnom linearnom regresionom jednačinom opisuje se zavisnost podataka dve veličine primenom standardne linearne jednačine (4.46):

$$y = ax + b \quad (4.46)$$

Koeficijenti a i b iz standardne linearne jednačine (4.46) nazivaju se parametri jednačine i određuju se preko sistema jednačina (Krešić, 1991). Kao direktni indikator čvrstine veze između zavisne i nezavisne promenljive (vremenske serije) figuriše koeficijent korelacije r , dat jednačinom (4.47):

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \text{ ili } r = \frac{\sum(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4.47)$$

gde su:

σ_x ; σ_y – standardne devijacije nezavisno (x) i zavisno (y) promenljive;

σ_{xy} – kovarijansa nezavisno i zavisno promenljivih;

x_i ; y_i – i -ti član niza nezavisno i zavisno promenljive;

\bar{X} ; \bar{Y} – aritmetička sredina nezavisno i zavisno promenljive;

Koeficijent korelacije može imati vrednosti od +1 do -1, što pokazuje jačinu veze dve promenljive. Ukoliko je korelacija +1 to znači da sa povećanjem nezavisne promenljive raste i zavisna (npr. povećanjem padavina raste vrednost isticanja na vrelu), dok ukoliko je koeficijent korelacije -1, to znači da sa porastom nezavisne promenljive opada zavisna (npr. sa povećanjem nadmorske visine smanjuje se temperatura vazduha). Odlična veza između promenljivih, tj. kada je $r = \pm 1$ retko se postiže, dok dobra veza označava korelaciju veću od $\pm 0,6$. Vrednosti koje se približavaju nuli impliciraju slabiju korelaciju između promenljivih, dok vrednost koeficijenta $r = 0$ označavaju odsustvo bilo kakve korelacije.

Određivanje zavisnosti i formiranje prognostičkih modela na osnovu korelacionih analiza zavisnih i nezavisnih promenljivih (vremenskih serija) spada u stohastičko modeliranje isticanja KHS. Termin *stohastika* nastao je od grčke reči *stohos* (grč. *Στόχος*) što znači meta ili cilj (*target*). Inicijalno shvatanje termina podrazumevalo bi – *posedovanje veštine pogađanja onoga što je tačno*. Međutim, moderna nauka generalno prepoznaje termin stohastika kao proces koji uključuje verovatnoću i slučajnost, a omogućava prognozu (ili procenu) konkretnih varijabli u periodu kada ne postoje osmatranja (u budućnosti) ili prostoru na kome nema

osmatranja istih podataka (Sivakumar, 2017). Razvoj stohastičke analize u inženjerstvu i prirodnim nauka datira od sredine prošlog veka (Lévy, 1948), da bi svoju ekspanziju doživela sedamdesetih godina 20. veka, kada Box & Jenkins (1970) daju sintetizovan prikaz metoda stohastičke analize vremenskih serija. Poslednjih godina, sa razvojem kompjuterskih softvera dolazi takođe do napredovanja postojećih stohastičkih metoda i njihovog olakšanog korišćenja i interpretacije rezultata (Shumway & Stoffer, 2017). Analiza vremenskih serija ima veliku primenu u hidrologiji i hidrogeologiji, gde se korišćenjem tehnika stohastičke analize i modeliranja uspešno objašnjavaju prirodni fenomeni i slučajne promenljive kao što su veličine padavina, rečnih proticaja, nivoa podzemnih voda u intergranularnim sredinama ili isticanje karstnih podzemnih voda (Yevjevich, 1972; Klemeš, 1978; Mangin, 1982; Prohaska, 1974, 1981; Salas et al., 1985; Bonacci, 1987; Krešić, 1991, 1997, 2013; Salas, 1993; Bras & Rodriguez-Iturbe, 1994, Prohaska & Ristić, 1996).

Stohastička analiza ili analiza slučajnih (randomnih) promenljivih podrazumeva interpretaciju stohastičkog procesa, predstavljenog nizom slučajnih promenljivih nekog sistema, koji nasumično variraju. Utvrđivanje zakonitosti slučajne varijacije zavisnih promenljivih vremenskih serija u nekom sistemu bazira se na stohastičkoj analizi pomenutih vremenskih serija. Stohastički proces podrazumeva proces opisan statističkim parametrima, pri čemu takav opis predstavlja verovatnoću pojave jednog od mogućih stanja procesa (Krešić, 1991). Njegova osnovna odlika jeste što je stohastički model određen sa verovatnoćom pojave u vremenu t na osnovu poznavanja prethodnog stanja u vremenu $t_0 < t$. Kako Krešić (1991) navodi, stohastička analiza podrazumeva članove hidrološkog niza kao elemente slučajnog procesa koji se razvija u vremenu, odnosno da se jedan stohastički proces ponavlja sa sličnim karakteristikama u sukcesivnim vremenskim serijama po određenim zakonima verovatnoće. Metode stohastičke analize i modeliranja vremenskih serija mogu se generalno podeliti u dve velike grupe: *parametarske* – kod kojih je struktura sistema definisana *a priori*, a priroda i broj varijabli i parametara je unapred određena; i *neparametarske* kod kojih je struktura sistema definisana na osnovu podataka vremenske serije (Sivakumar, 2017). Suština stohastičkog modeliranja i analize podrazumeva analizu slučajno promenljivih komponenti jednog hidrološkog ciklusa. Pored ove komponente, hidrološki proces sastoji se iz determinističke i periodične komponente, koje u principu pri stohastičkoj analizi treba detektovati (kao trend, nehomogenost i sl.) i matematički opisati, a zatim ukloniti iz serije, tako da se razmatra samo slučajna komponenta hidrološkog procesa, tzv. *beli šum* (engl. *white noise*). Upravo ove veličine, kao slučajno vrednosti normalne raspodele, predstavljaju konverziju ulaznog signala u sistem u izlazni (Krešić, 1991). Primena stohastičkih modela obuhvata (Božić, 1977):

- Predviđanje učestalosti pojave određene vremenske serije;
- Proračun kratkoročnih prognoza ponašanja određene vremenske serije uz formiranje intervala sigurnosti;
- Ekstrapolaciju kraćih vremenskih serija pomoću formirane korelacione zavisnosti;
- Formiranje sintetičkih serija ulaznog signala u sistem (vremenska serija padavina) u cilju dobijanja transformisane sintetičke serije izlaznog signala (vremenska serija isticanja);
- Ekstrapolaciju kratkog niza vremenske serije izlaznog signala (isticanje) transformacijom dugog niza ulaznog signala (padavina) u cilju procene isticanja u dugom periodu.

Odabir stohastičkog modela za simulaciju isticanja karstnih podzemnih voda i njihovu prognozu vrši se nakon utvrđivanja stohastičkih osobina vremenskih serija koje će ući u prognostički model. Modeli koji su najčešće primenjivani u hidrogeologiji karsta jesu autoregresivni modeli koji uključuju prognozu isticanja podzemnih voda na osnovu prethodnih

vrednosti isticanja, zatim krosregresioni modeli koji se zasnivaju na istom principu kao i autoregresioni uz uključivanje ulazne vremenske serije kao nezavisne varijable, dok najbolje rezultate daje kombinacija prethodno navedenih modela formiranjem autoregresivno-krosregresivnog modela.

Autoregresioni modeli (AR modeli) koriste se za generisanje sintetičkih nizova nezavisnih vremenskih serija, a u izvesnim slučajevima mogu služiti i za izdavanje kratkoročnih (1-2 dana) prognoza (Krešić, 1991). Pomoću ovih modela uspostavlja se linearna regresiona zavisnost između članova niza iste vremenske serije, te se ne mogu samostalno koristiti za npr. modeliranje izdašnosti vrela, budući da ne uključuju ulaz u sistem, tj. padavine. Parametri AR modela određuju se metodom najmanjih kvadrata, dok su koeficijenti višestruke korelacije kod AR modela obično visoki i posledica su dugačke memorije dobro razvijenog KHS.

Korišćenje AR modela za prognozu veličina isticanja u budućem periodu opravdano je samo u slučaju kada KHS nije pod direktnim uticajem padavina, a to je u recesionim uslovima. U svim ostalim periodima godine, simulacija isticanja samo na osnovu izlaznog signala iz sistema neće dati zadovoljavajuće rezultate. Stoga, važno je formirati *krosregresivni (CR) model* koji će uključivati padavine kao ulazni signal u sistem i na osnovu koga će biti moguće prognozirati isticanje podzemnih karstnih voda kao izlazni signal. Formiranje CR modela zasniva se na uvođenju nezavisno promenljiva vremenske serije Y_t (vremenska serija padavina), i to za 1, 2, ... n prethodnih dana, tj. $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-n}$ pored zavisno promenljive X_t (vremenska serija isticanja).

Pri analizi i formiranju CR modela, treba napomenuti da ovaj model uzima ukupne bruto, a ne efektivne padavine, što dodatno utiče na nepouzdanost modela, budući da u vremenskim serijama padavina ostaju nulte vrednosti (dani bez padavina) koje značajno smanjuju koeficijent višestruke regresije. Mnogo bolje rezultate primene CR modela dobili bi se ukoliko bi se umesto nefiltriranih vrednosti padavina koristile transformisane vrednosti ili vrednosti efektivnih padavina. Generalno gledano, koeficijenti višestruke regresije kod CR modela su niski, praktično na pragu statističke značajnosti, u čemu mnogo udela imaju bruto padavine, dok sa povećanjem reda modela, tj. broja prethodnih vrednosti nezavisno promenljive koje se uključuju u model, povećava se i koeficijent višestruke linearne regresije. Samostalni CR modeli nisu opravdani za simulaciju isticanja podzemnih voda u karstu, imajući u vidu relativno niske vrednosti koeficijenata višestruke regresije. Mnogo bolje rezultate, tj. poklapanja izmerenih i simuliranih vrednosti dobijaju se kombinovanjem autoregresivnog i krosregresivnog modela u jedinstveni *autoregresivno-krosregresivni (ARCR) model*.

ARCR modeli pripadaju grupi multivarijantnih modela vremenskih serija (Krešić, 2010) i svode se na višestruku linearnu regresiju. Opšta jednačina ARCR modela (4.48) podrazumeva kombinaciju AR i CR modela:

$$Q_t = a + b_1 Q_{t-1} + \dots + b_p Q_{t-p} + c_1 P_{t-1} + \dots + c_q P_{t-q} \quad (4.48)$$

gde su:

Q_t – prognozna vrednost vremenske serije (npr. isticanje karstnog vrela) u vremenu t ;

Q_{t-1}, \dots, Q_{t-p} – merena vrednost isticanja p dana pre izdavanja prognoze;

$a, b_1, \dots, b_p, c_1, \dots, c_q$ – parametri modela (koeficijenti regresije);

P_{t-1}, \dots, P_{t-q} – očitana vrednost padavina q dana pre izdavanja prognoze.

Parametri p i q odnose se na broj dana, odnosno koraka (lag-a) autoregresivnog i krosregresivnog dela modela, koji se odnose na vremensku seriju isticanja karstnih podzemnih voda i proračun memorije sistema i definisanju zavisnosti između vremenskih serija padavina i isticanja, respektivno. Određivanje ovih parametara je moguće preko rezultata

autokorelacione i kroskorelacione analize, koji ukazuju na memoriju sistema, odnosno vreme potrebno za reakciju sliva na padavine.

Analiza boniteta prilagođavanja zasniva se na proveru da li izabrane regresione jednačine zaista imaju zadovoljavajuće prilagođavanje stvarnim uslovima u prirodi, tj. da li na zadovoljavajućem nivou preslikavaju i simuliraju realne i prirodne uslove. Analiza boniteta modela zasniva se na oceni koeficijenata korelacije regresionog modela i oceni parametara modela, odnosno na oceni boniteta regresionog modela u celini. Ocene koeficijenata korelacije i parametara regresionog modela baziraju se na Studentovom t -testu, na osnovu koga se proverava da li koeficijenti korelacije statistički razlikuju od nule, tj. da li su posledica slučajnih događaja ili ne (Krešić, 1991; Prohaska & Ristić, 1996). Analiza boniteta prilagođavanja modela u celini najčešće se obavlja preko tzv. ANOVA tabele (engl. *Analysis of Variance*) koja podrazumeva analizu varijansi regresionog modela i reziduala.

Konačna potvrda boniteta modela zasniva se odnosu kvadratnih korena srednje sume kvadrata modela i reziduala preko f statistike koja sledi Fišerovu raspodelu sa dva broja stepeni slobode. Ovaj koeficijent f statistike iskazan je relacijom (4.49):

$$f = \frac{\frac{1}{v_1} \sqrt{\sum (y_{rač} - \bar{y})^2}}{\frac{1}{v_2} \sqrt{\sum (y_i - y_{rač})^2}} \quad (4.49)$$

gde su:

v_1 – broj stepeni slobode modela koji predstavlja broj nezavisno promenljivih u regresionoj jednačini

v_2 – broj stepeni slobode reziduala dat relacijom $N - 1 - m$, gde je N ukupan obim niza, a m broj nezavisno promenljivih u regresionoj jednačini

Suština testiranja bazira se na komparaciji proračunatog f koeficijenta prema Fišerovoj raspodeli i vrednosti f koeficijenta iz statističkih tablica za odabrani interval poverenja (obično se uzima interval poverenja α od 0,05, tj. 95% poverenje). Što je proračunata vrednost f koeficijenta veća od tablične, model je pouzdaniji. Takođe, veća vrednost srednje sume kvadrata modela od srednje sume kvadrata reziduala ukazuje na veću pouzdanost i kvalitet regresionog modela.

Čest je slučaj da se kod ARCR modela maksimalne vrednosti reziduala javljaju u recesionom periodu usled nemogućnosti modela da priguši intenzitet izolovanih kišnih epizoda, što se na simulacionom modelu pokazuje kao šum izlaznog signala (isticanja podzemnih voda). Takođe, veliki uticaj na transformaciju padavina u isticanje imaju i nulte vrednosti padavina, tj. razmatranje bruto, a ne efektivnih padavina. Sa druge strane, KHS ima mogućnost interne amortizacije izolovanih kiša i nultih vrednosti padavina (odnosno dana bez kiše), koje je jako teško (praktično nemoguće) opisati stohastičkim matematičkim metodama. To su uostalom i glavni razlozi zbog kojih se KHS smatra za model crne kutije kod koga su nepoznati interni fizički procesi transformacije ulaznog impulsa u izlazni signal. Iz tih razloga, u praksi se koriste funkcije transfera, kako bi se amortizovali ili odstranili trendovi ili ciklusi iz konkretnih vremenskih serija.

Transfer funkcije (ili tranzitne komponente) mogu biti aproksimirane odgovarajućim matematičkim funkcijama koja može biti određena aritmetička sredina (klizajuća, pokretna sredina (engl. *moving average*)), polinom određenog stepena ili neka složenija matematička funkcija. Jedna od najprimenljivijih transfer funkcija za ublažavanje vremenskih serija jeste upravo tehnika pokretnog proseka, koja u suštini nalazi prosečne vrednosti iz više prethodnih

i narednih vrednosti vremenske serije za određeni vremenski korak, odnosno *prozor pokretnog proseka*. Primenom ove tehnike uspešno se mogu eliminisati nulte vrednosti padavina, odnosno dani bez kiše koji umnogome smanjuju koeficijent višestruke regresije kod ARCR modela. Takođe, pokretnim prosekom je moguće prigušiti ulazni signal u sistem, čime se dobija pouzdaniji simulacioni model isticanja. Prozor pokretnog proseka konkretno zavisi od frekvencije osmatranja vremenske serije i uočenih trendova koji se žele ublažiti ili odstraniti iz niza. Budući da se vremenske serije padavina koje ulaze u model obično osmatraju na dnevnom nivou, prozor pokretnog proseka se izražava u danima. Određivanje prozora pokretnog proseka zavisice i od npr. broja dana bez kiše, koje bi trebalo potpuno odstraniti iz vremenske serije, radi poboljšanja simulacionog regresionog modela.

U cilju poboljšanja ARCR simulacionog modela, primena transfer funkcija pokretnog proseka može dati zadovoljavajuće rezultate. Naime, ARCR simulacioni model daje isti težinski faktor svim vrednostima padavina, odnosno izjednačava uticaj dužih kiša i letnjih pljuskova jakog intenziteta. Sa druge strane, model nije u mogućnosti da procesira evapotranspiraciju i deficit vlage u nesaturisanoj zoni tokom recesionog perioda, kao i druge faktore koji u tom periodu dodatno utiču na efektivnu infiltraciju karstnog hidrogeološkog sistema (Krešić, 1991, 2010). Primenom transfer funkcije pokretnog proseka ovi nedostaci modela mogu se donekle amortizovati.

Pokretni prosek se, osim kao transfer funkcija, može koristiti i samostalno kao prognostički model. Međutim, ovaj model daje pouzdanije rezultate ukoliko mu se priključi i autoregresivni (AR) model u jedinstveni ARMA model. Na ovaj način formira se autoregresivni model pokretnih sredina ARMA, dok sa druge strane, nestacionarnost vremenskih serija koje se simuliraju stohastičkim regresionim modelima mogu se svesti na stacionarne formiranjem priraštaja vremenskih serija (Stojković, 2015). Ovakve nestacionarne vremenske serije čine autoregresivne integrisane modele pokretnih proseka, tzv. ARIMA modele. Krešić (1991) takođe navodi ARMA(X) modele koji se oslanjaju na autoregresivne modele pokretnog proseka uz dodatak tzv. eksternog ulaza, koji podrazumeva formiranje praga koji predstavlja kišu neophodnu za formiranje oticaja i koja se oduzima od vrednosti padavina za svaki vremenski korak, pri čemu ona mora biti veća od nule. Sličnu tehniku simulacije navode Mohammadi & Mali (2016) predstavljajući ARX model koji podrazumeva autoregresivni model sa eksternim ulazom. Simulacija se zasniva na pretpostavci da je isticanje karstnih voda zavisno od prethodnih vrednosti isticanja i padavina kao ulazom (Mohammadi & Mali, 2016). Pored navedenih modela, Sivakumar (2017) navodi i postojanje modifikovanih AR i ARMA modela koji uključuju periodičnu komponentu razmatrane vremenske serije, pa tako se modifikovani modeli nazivaju PAR, odnosno PARMA.

4.4.3 Teorijske osnove logističke regresione analize

Logistička regresiona (LR) analiza predstavlja metodu nadgledanog mašinskog učenja kojom se opisuje veza prediktorâ (tj. jedne ili više promenljivih) i zavisne (binarne) varijable (Bewick et al. 2005). Zavisne varijable mogu biti binarne, neprekidne, kategoričke i kategoričke zavisne, tako da će one definisati tip logističke regresije koja može biti (Kostić, 2018):

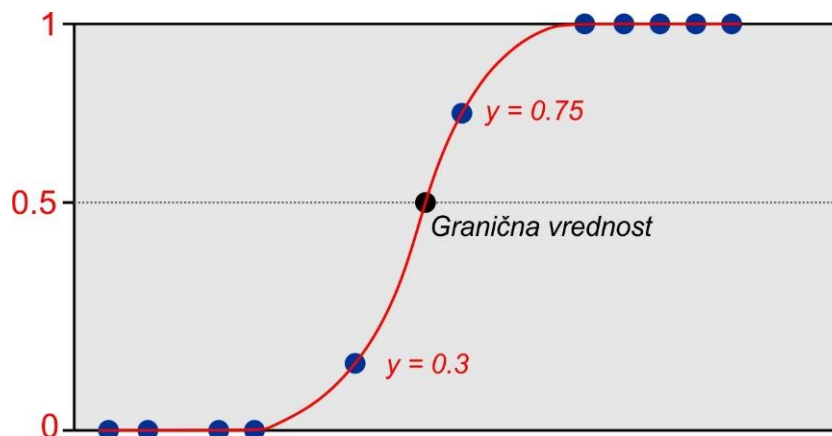
- **Binarna logistička regresija**, što znači da će ishod LR analize biti u binarnom (dihotomnom) obliku 0 ili 1, što će kao rezultat dati npr. sledeće: položen ispit ili ne, pacijent će imati visok ili nizak krvni pritisak u zavisnosti od prijavljenih simptoma ili izdašnost vrela je iznad ili ispod prosečne vrednosti i sl;
- **Nominalna logistička regresija** – zavisna promenljiva ima 3 ili više kategorija koje nisu međusobno komparativne po svojim vrednostima, npr. boje (crna, crvena, plava,...), internet pretraživač (Google, Bing, Yahoo!,...) itd;

- **Ordinalna logistička regresija** – zavisna promenljiva ima 3 ili više međusobno uporedivih kategorija, ali nejednakim „rastojanjem“ pri rangiranju: npr. ocena (5-10), zdravstveno stanje (dobro, stabilno, ozbiljno, kritično) itd.

Shodno tome, binarna LR prema karakteru predstavlja *metričku* regresiju, sa precizno utvrđenim međusobnim poretkom i intervalima, dok su nominalna i ordinalna LR prema karakteru *nemetričke*, čije su razlike na nivou imena ili meta-kategorija, tj. prema odnosu razlika magnitude i jedinice magnitude, sa nejednakim intervalima (Cox, 1958; Ćuk, 2017).

Logistička regresija koristi logističku funkciju za predviđanje rezultata modeliranja i prognoze verovatnoće pojave u dihotomnom obliku. To znači da će rezultat LR modela biti u binarnom zapisu pokazujući *uspeh* ili *neuspeh*, odnosno daće odgovor na pitanje za koje se vrši predikcija. Recimo, LR modelom može se dobiti odgovor u binarnom obliku *da* ili *ne*, na sledeća pitanja: „Da li se u podzemnoj vodi mogu očekivati povišene koncentracije nekog elementa (parametra, promenljive) u odnosu na određenu referentnu vrednost poznatog parametra?“ (Tesoriero et al. 1998; Ćuk, 2017) ili „Da li se na karstnom vrelu može očekivati veća izdašnost u odnosu na srednjegodišnju vrednost isticanja podzemnih voda?“

Logistička funkcija se naziva i sigmoidna ili S- funkcija, budući da ima oblik položen latiničnog slova S, koja pretvara bilo koju stvarnu vrednost u binarni zapis 0 ili 1. Drugim rečima, ako je npr. rezultat logističke regresije 0.75, tj. da tu vrednost pokazuje sigmoidna funkcija, to podrazumeva da je 75% šansa da se određeni događaj koji se modelira i dogodi, a sama funkcija pretvara ovu vrednost u dihotomni oblik i klasu 1, budući da je iznad praga 0.5 koji deli binarne klase 0 i 1, dok bi u slučaju vrednosti 0.3, verovatnoća iznosila 30%, a pripadajuća klasa je 0. Prikaz teorijske S-funkcije dat je na sl. 4.14.



Sl. 4.14. Teorijski prikaz sigmoidne funkcije logističkog regresionog modela (izvor: <https://www.javatpoint.com/logistic-regression-in-machine-learning>, modifikovano)

Matematički zapis sigmoidne funkcije ima sledeći oblik (4.50):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.50)$$

gde je e baza prirodnog logaritma, a broj (u ovom slučaju 1) je numerička vrednost koja se transformiše. Za transformaciju sigmoidne funkcije u pravu liniju i promenu opsega iz binarnog u opseg $-\infty$ do $+\infty$, koristi se logistička ili logit funkcija, koja predstavlja prirodni logaritam verovatnoće rezultata, a data je relacijom (4.51) (Bewick et al. 2005):

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (4.51)$$

gde parametar p predstavlja verovatnoću pozitivnog ishoda događaja.

Ključne karakteristike LR analize podrazumevaju sledeće (Kanade, 2022):

- Zavisne varijable logističkog modela prilagođavaju se Bernulijevoj distribuciji;
- Procena i predikcija događaja se zasniva na principu maksimalne verovatnoće (engl. *maximum likelihood*);
- Logistički model se ne evaluira preko koeficijenta determinacije (R^2) kao kod linearne regresije, već se bonitet modela ogleda kroz podudarnost seta treniranih i testiranih setova podataka.

Logistički regresioni model, prema broju ulaznih nezavisnih varijabli (prediktora) može biti univarijantna ili višestruka logistička regresija (Bewack et al. 2005; Ćuk, 2017; Wang et al. 2017). Univarijantna logistička regresija podrazumeva predikciju verovatnoće pozitivnog ili negativnog ishoda na osnovu jednog prediktora, dok višestruka logistička regresija uključuje više prediktora pri određivanju verovatnoće ishoda. Pri višestrukoj logističkoj regresiji najčešće se primenjuje tzv. *stepwise* metoda koja podrazumeva inicijalno uključivanje svih varijabli za koje se smatra da mogu uticati na krajnji ishod, da bi se u narednim koracima vršilo isključivanje onih prediktora koji nemaju dovoljnu statističku značajnost u modelu (Ćuk, 2017).

Finalni korak pri LR analizi predstavlja provera tačnosti višestrukih LR modela, koja se najčešće vrši preko *matrice zabune* ili *konfuzije* (engl. *Confusion Matrix*). Matrica konfuzije predstavlja tehniku merenja performansi za klasifikaciju nadgledanih algoritama mašinskog učenja i predstavlja vizuelizaciju tačnosti modela komparacijom realnih i predviđenih ishoda. Ova matrica predstavlja binarni kvadrat sa 4 moguća ishoda:

- *Tačno pozitivno* – model je predvideo pozitivan ishod i bio je u pravu;
- *Tačno negativno* – model je predvideo negativan ishod i bio je u pravu;
- *Lažno pozitivno* – model je predvideo pozitivan ishod i pogrešio je;
- *Lažno negativno* – model je predvideo negativan ishod i pogrešio je.

Na osnovu kreiranog LR modela i pripadajuće jednačine, provera se njegova tačnost tako što se odnos tačnih i netačnih predviđanja sa ukupnim brojem podataka izražava procentualno.

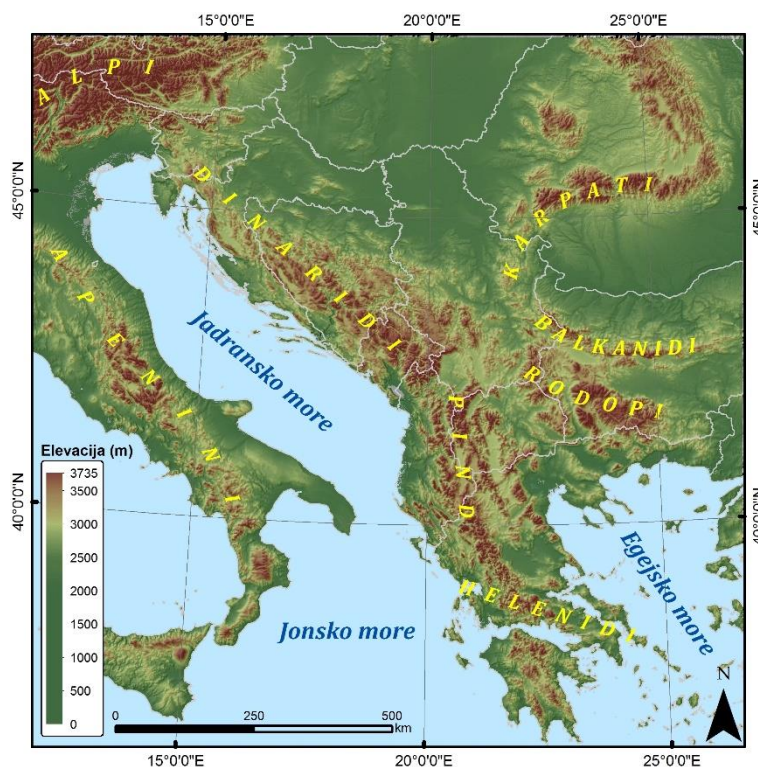
5 OSNOVNE KARAKTERISTIKE ŠIREG ISTRAŽNOG TERENA I ODABRANIH PILOT PODRUČJA

5.1 Osnovne fizičko-geografske karakteristike dela centralnog Balkana

Balkansko poluostrvo je kroz istoriju često menjalo svoje nazive – od Grčkog i Rimskog do Vizantijskog poluostrva, da bi sadašnji naziv bio uspostavljen u 19. veku. Naziv poluostrva potiče od Balkanskih planina, koje se protežu od Vrške Čuke (istočna granica Srbije), kroz Bugarsku do Crnog Mora. Površina celokupnog poluostrva procenjuje se na oko 550 000 km². Klimatske karakteristike Balkanskog poluostrva određene su njegovim geografskim položajem, te je tako poluostrvo zaštićeno planinskim vencima sa zapadne, južne i istočne strane od uticaja sa mora, naročito tokom zime. Sa druge strane, poluostrvo je otvoreno prema severu, te je na taj način omogućeno strujanje snažnih vetrova (košava i bura). Kontinentalni deo poluostrva odlikuje se umereno-kontinentalnom klimom, dok je u ostalim delovima dominantna mediteranska klima.

Hydrografija poluostrva odlikuje se razvodima i slivovima četiri mora: Jadransko, Crno, Egejsko i Jonsko more. Glavne reke predstavljaju Dunav, Sava, Kupa, Una, Bosna, Drina, Velika Morava, Vardar, Marica i dr. Odsustvo rečne mreže karakteristično je za Dinarski planinski sistem, usled velikog rasprostranjenja karstnih stena. Najznačajnija jezera koja se nalaze na ovom prostoru su: Skadarsko, Ohridsko, Prespansko i Dojransko jezero.

Reljef terena odlikuje se velikim planinskim sistemima (Sl. 5.1), heterogene geološke građe. Najstariji planinski sistem predstavljaju Rodopske planine, koje su paleozojske starosti kada je došlo do nabiranja, dok je tokom tercijara ovaj sistem bio izložen uticaju intenzivne tektonike (Cvijić, 1924). Na prostoru Balkanskog poluostrva dominiraju Dinarski, Karpato-balkanski, Pindski (ili Šarsko – pindski) sistemi i Helenidi koji su svi delovi Alpskog orogena i mlađi od Rodopa, a nastali su kao rezultat nabiranja u tercijarnom periodu.



Sl. 5.1. Prostorna distribucija velikih planinskih sistema jugoistočne Evrope

Sa aspekta tektonike, Balkansko poluostrvo je sačinjeno od glavnih tektonskih jedinica izgrađenih od kontinentalne kore, koje pripadaju prakontinentima Lauraziji i Godvani: Mezijske mikroploče koja je činila južni obod Laurazije; Jadranske (Apulijske) mikroploče koja je činila rt Godvane; i ostataka Tetisa i okolnih morskih oblasti koji su izgrađeni od okeanske kore (Karamata, 2006).

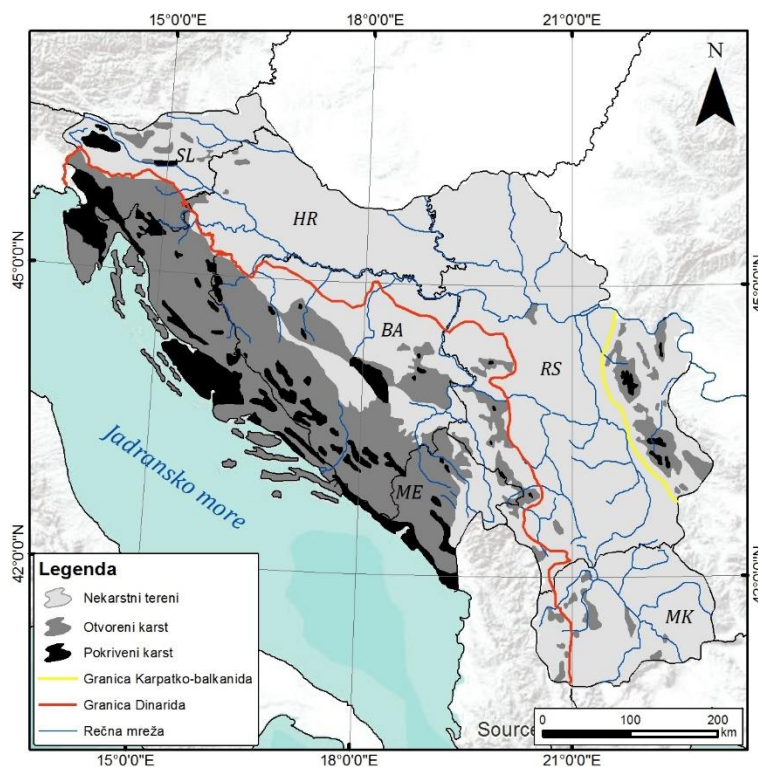
5.2 Rasprostranjenje karsta na prostoru dela centralnog Balkana

Geološka građa planinskih sistema, predstavljenih na sl. 5.1, uslovljena je i periodima u kojima su nastajali. Rodopski sistem, kao najstariji pretežno je izgrađen od stena vulkanskog porekla, zatim granita, gnajseva i škriljaca, dok mlađi sistemi kao što su Dinarski i Pindski, odnosno Helenidi, izgrađeni su pretežno od mezozojskih karbonata. Karpato – balkanski sistem odlikuje se značajnim rasprostranjenjem karbonatnih sedimenata i slabopropusnih vulkanskih stena i flišnih formacija (Stevanović, 2010c).

Dinarski i Karpato – balkanski sistemi najznačajniji su za centralni deo Balkana sa aspekta formiranja karbonatnih stena na prostoru Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine (Sl. 5.2).

Dinarski sistem proteže se pravcem severozapad – jugoistok kroz Sloveniju (Sl. 5.3), Hrvatsku, Bosnu i Hercegovinu, Crnu Goru, Srbiju i Severnu Makedoniju da bi se završio u Albanskim Alpima (Stevanović et al. 2016).

Dinarski sistem izgrađen je pretežno od karbonata u vidu krečnjaka i dolomita, mezozojske starosti. Debljina karbonata prosečno može biti od 350 do 400 m, a može dostići i preko 1 000 m (Milanović P. 2005; Stevanović et al. 2016). Sedimentacija karbonatnih stena vezuje se za Tetis i njegove sedimentacione basene, koji su na prelazu iz trijasa u donju juru bili izloženi uticaju površinskih voda. Nakon toga, krajem gornje jure, tokom paleocena, eocena i oligocena dolazi do dve faze intenzivnih tektonskih aktivnosti koje su uzrokovala izdizanje, nabiranje i razlamanje karbonatnih sistema i flišnih formacija (Herak, 1972).



Sl. 5.2. Prostorni položaj karstnih terena u zemljama bivše Jugoslavije (prema Heraku, 1972)



Sl. 5.3. Primeri karsta Dinarida u Sloveniji: kanjon reke Soče usečen u krečnjake, prirodna granica Dinarida i Alpa (levo); prirodni prerast Rakov Škocjan u Sloveniji (desno)

Nakon formiranja Dinarskog sistema tektonskom aktivnošću ove oblasti, karbonatni sistemi Dinarida su od oligocena izloženi intenzivnom uticaju atmosferskih voda koje pomažu rastvaranje karbonata, čime se stiče uslov za formiranje površinskih i podzemnih karstnih oblika (Stevanović et al. 2016). Tako, usled različitog stepena rastvaranja karbonata, količine atmosferskih voda i drugih faktora, savremeni Dinarski sistem može biti raščlanjen na nekoliko tektonskih podsistema (Herak, 1972; Šarin, 1983; Mijatović, 1983; Stevanović et al. 2016):

- Spoljašnji Dinaridi (*ili Jadranska zona*);
- Centralni Dinaridi (*ili Zona visokog krša*); i
- Unutrašnji Dinaridi (*Zona izolovanog i fluviokarsta*).

Dinaridi predstavljaju oblast razvića svih površinskih i podzemnih karstnih oblika. Osim velikih reka (Krka, Cetina, Neretva, Zrmanja, Zeta), može se reći da drenažna mreža površinskih rečnih tokova praktično odsustvuje zbog velike površine koju pokrivaju otvoreni karstni tereni. Sa druge strane, podzemna hidrografija je veoma razvijena. Usled visokog stepena karstifikacije karbonata, karstni sistemi Dinarida mogu primiti, transferisati i izdati značajne količine podzemnih voda. Prihranjivanje karstnih sistema Dinarida vrši se infiltracijom atmosferskih padavina i poniranjem površinskih tokova. Procentualna efektivna infiltracija u holokarstu Dinarida može iznositi od 50 do 80%, izuzetno i preko 90% (npr. u slivu Trebišnjice u istočnoj Hercegovini) (Komatina, 1984; Krešić, 2013; Stevanović et al. 2016).

Pravci cirkulacije podzemnih voda Dinarida određivani su brojnim opitima trasiranja podzemnih tokova. Komatina (1983) navodi preko 650 opita trasiranja izvedenih u Dinarskom karstu, na osnovu čega su sračunate brzine cirkulacije podzemnih voda Dinarida: u 70% slučajeva brzina toka podzemnih voda iznosila je od 0 do 5 cm/s; u 20% slučajeva 5 do 10 cm/s; dok je u 10% slučajeva brzina cirkulacije podzemnih voda iznosila preko 10 cm/s. Ekstremne vrednosti brzine toka podzemnih voda u Dinaridima kreću se od 0,002 do 55,2 cm/s, dok je prosečna vrednost oko 5 cm/s (Milanović P., 2000).

Dinarski karst obiluje podzemnim vodama i predstavlja region koji je najbogatiji vodom u Evropi (Stevanović et al. 2016). Međutim, s obzirom na različite klimatske karakteristike pojedinih delova Dinarskog karsta i nejednakog stepena karstifikacije karstnih terena Dinarida, prisutna je neravnomerna distribucija podzemnih vodnih resursa u Dinarskom karstu (Bonacci, 1987). Stevanović et al. (2016) ističu da Dinarski karst u bivšoj Jugoslaviji sadrži preko 230 karstnih vrela minimalne izdašnosti iznad 100 l/s, odnosno preko 100 karstnih vrela minimalne izdašnosti preko 500 l/s, dok isti autori posebno naglašavaju Dinarski karst Bosne i

Hercegovine, kao svetskog rekordera u broju snažnih karstnih vrela prema jedinice površine – čak 8 vrela sa minimalnom izdašnošću preko 2 000 l/s.

Podzemne vode karstnih sistema Dinarida u velikoj meri se koriste za lokalno i regionalno vodosnabdevanje pijaćom vodom. Brojni gradovi u Bosni i Hercegovini, Hrvatskoj, Crnoj Gori i Srbiji koriste podzemne vode sa kaptiranih vrela Bosne. Primorski karst Crne Gore sadrži nekoliko snažnih karstnih vrela, kao što su Gurdić i Škudra u Kotoru, Spila u Risnu, Ljuta u Orahovcu, Glava Zete i dr., dok se karstna vrela značajne izdašnosti nalaze i u kontinentalnom delu Crne Gore, kao što su Oko Bijele, Šavnička glava, Bukovica, Dubrovska vrela u kanjonu Komarnice i dr. Crna Gora je poznata i po vruljama, odnosno potopljenim vrelima koja ističu podzemno u more ili jezera. Takav je slučaj sa vrelom Sopot u Risnu, koji u zavisnosti od hidrološkog stanja, tj. nivoa podzemnih voda ističe kao vrulja u Jadransko more ili kao gravitaciono vrelo, odnosno sa vruljom Bolje sestre koji ističe u Skadarsko jezero i koji je kaptiran za vodosnabdevanje Crnogorskog primorja.

Karstni tereni u Srbiji koji pripadaju Unutrašnjim Dinaridima takođe se odlikuju značajnom izdašnošću. Neki od najmarkantnijih karstnih vrela srpskog dela Dinarskog sistema su karstno vrelo Perućac kod Bajine Bašte prosečne izdašnosti 1,41 m³/s (Jemcov, 2008), Seljašnica kod Prijepolja, prosečne izdašnosti oko 1 000 l/s, Gradačka vrela i vrelo Paklje kod Valjeva, Taorska vrela kod Kosjerića i dr.

Sistem Karpato – balkanida predstavlja orogeni sistem koji se nalazi na prostoru centralne i jugoistočne Evrope, gde se proteže u dužini od preko 2 000 km. Ovaj sistem sačinjen je od krupnih tektonskih jedinica – Zapadni Karpati, Istočni Karpati (ili Transilvanijski Alpi) i Balkanidi (Grubić, 1994) (Sl. 5.4). Prostor Karpato – balkanida pokriva istočni deo Srbije, gde ima pravac pružanja sever – jug, tj. severozapad – jugoistok. Posmatrajući sa aspekta tektonike, ovaj sistem produžava se u Bugarsku do Crnog mora. Reljef Karpato – balkanida u Srbiji odlikuje se visokim planinskim vrhovima nadmorske visine od preko 1 000 m, odnosno depresija sa nadmorskim visinama oko 400 m. Nadmorske visine variraju od 2 170 m koliko iznosi najviši vrh srpskog dela Karpato – balkanida Midžor na Staroj planini, dok se najniža tačka nalazi na ušću Timoka u Dunav, na nadmorskoj visini od 35 m (Stevanović, 1991, 1994).



Sl. 5.4. Karpatski karst u Rumuniji – klisura Sohodol (levo); Karst Vračanskog Balkana u Bugarskoj (desno)

Geološka građa Karpato – balkanida istočne Srbije odlikuje se razvićem geoloških formacija od najstarijih do najmlađih geoloških perioda. Stevanović (1991) navodi da su najstarije, prekambrijumske stene predstavljene metamorfitima višeg stepena kristaliniteta, magmatskog ili sedimentnog porekla, dok se tokom trijasa i donje jure formiraju naslage terigenog i karbonatnog porekla. Transgresija mora tokom dogera (donja jura) uslovlila je formiranje

najvećeg dela karbonatnih naslaga Karpato – balkanida istočne Srbije. Sedimentacija pretežno karbonatnih naslaga traje sve do kraja donje krede (albski kat), da bi tokom gornje krede došlo do formiranja vulkanogeno – sedimentnog kompleksa stena u okviru Timočkog andezitskog masiva (Stevanović, 1991). Najmlađe tvorevine su kvartarne aluvijalne, deluvijalne, proluvijalne naslage.

Sa hidrogeološkog aspekta najznačajnije su karstne izdani, najvećim delom u krečnjacima. Karbonatni sedimentni počinju da se talože još tokom paleozoika (devon, karbon), da bi tokom mezozoika sedimentacija karbonatnih sedimenata bila najintenzivnija. Krečnjaci srednjeg trijasa, dogera, malma i donje krede grade otvorene ili poluzatvorene hidrogeološke strukture u kojima se akumuliraju podzemne vode. Stevanović (1991) navodi da otkrivene površine karsta obuhvataju oko 30% celokupne teritorije koja pripada Karpato – balkanidima istočne Srbije. Debljina karbonatnih sedimenata može varirati od nekoliko desetina do preko 1 000 m.

6 KONCEPTUALIZACIJA I KARAKTERIZACIJA ODABRANIH KARSTNIH SISTEMA

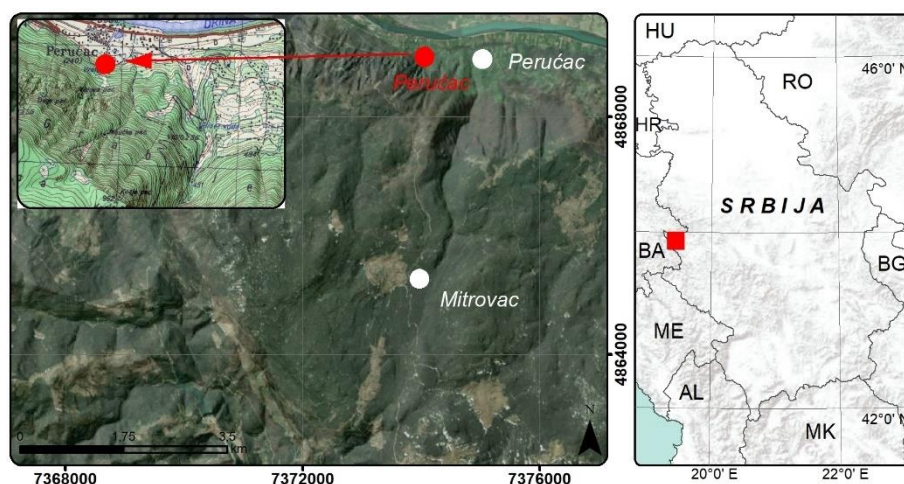
6.1 Karstni hidrogeološki sistem vrela Perućac

Karstni hidrogeološki sistem Perućac predstavljao je predmet istraživanja nekolicine istraživača tokom prethodnih decenija. Hidrogeološka istraživanja Perućca vršili su Krešić (1981; 1984; 1987), Milanović P. (1991), Milanović S. (1998), Jemcov (2008; 2014), Jemcov et al. (2007; 2010; 2011), Ristić Vakanjac et al. (2015) i Živanović (2011) i Živanović et al. (2022). Prethodno navedeni radovi delom su korišćeni kao ulazni podaci tokom hidrogeoloških istraživanja na prostoru sliva vrela Perućac za potrebe doktorske disertacije.

6.1.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Perućac nalazi se u jugozapadnom delu Srbije, u istoimenom naselju Perućac, oko 13 km zapadno od Bajine Bašte. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Unutrašnjim Dinaridima zapadne Srbije, a vrelo Perućac predstavlja najjače karstno vrelo koje drenira karstni masiv Tare (Sl. 6.1).

Najveće naseljeno mesto u ovom delu Srbije je Bajina Bašta. Ovaj grad je administrativni centar opštine koja prema popisu iz 2011. godine ima 26 022 stanovnika, dok samo gradsko jezgro ima 9 148 stanovnika (RZSS, 2012).



Sl. 6.1. Geografski položaj vrela Perućac (crvena boja) na karti Srbije i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Višegrad T527-2-2

Vrelo Perućac formira reku Vrelo koja je dužine svega 365 m, te je meštani nazivaju i *Godina*. Ovaj rečni tok se uliva u Drinu obrušavanjem preko vodopada visine 14 metara. Na desnoj obali reke izgrađena je 1927. god. mini hidro-centrala. U blizini vrela, idući uzvodno Drinom, nalazi se i hidroelektrana „Bajina Bašta“, izgrađena 60-ih godina prošlog veka. Slivno područje vrela Perućac nalazi se u okviru Nacionalnog parka „Tara“, uspostavljenog 1981. godine, dok se samo vrelo nalazi u II zoni zaštite nacionalnog parka. Među kulturno-istorijskim spomenicima ističu se manastir Rača iz 13. veka i nekropola stećaka „Mramorje“ u Perućcu. Osim njih, Tara je karakteristična po flori i fauni, odnosno po reliktnoj Pančičevoj omorici. Bajina Bašta i njena okolina, dobro su povezani asfaltnim saobraćajnicama sa susednim naseljima Srbije i Bosne i Hercegovine. Na širem istražnom terenu nalaze se saobraćajnice višeg reda ka Užicu i Mokroj Gori, odnosno putevi nižeg reda koji povezuju manja naseljena mesta. Do samog vrela je vrlo lako doći, budući da je udaljen oko 300 m hoda od glavne magistrale koja povezuje Bajinu Baštu i Mitrovac na Tari.

6.1.2 Klimatske karakteristike

Klimatske karakteristike slivnog područja vrela Perućac direktno su zavisne od planinskih masiva Tare i Zvijezde, kao i relativne blizine Jadranskog mora. Slivno područje vrela Perućac karakteristično je po mešanju planinske klime na nadmorskim visinama iznad 1000 m i kontinentalne klime na nižim nadmorskim visinama.

Klimatske karakteristike ovog područja obrađene su na osnovu podataka o padavinama, temperaturi vazduha, visini snežnog pokrivača i brzini i pravcima vetra sa najbliže klimatološke stanice Zlatibor za period 2015 – 2020 god. Ovaj period je razmatran, budući da korespondira sa periodom raspoloživosti podataka o izdašnosti vrela Perućac. Stanica Zlatibor može se smatrati reprezentativnom prema nadmorskoj visini, a jedina je u široj okolini na kojoj se prikuplja više klimatskih parametara, kao što su brzina i pravac vetra, vlažnost vazduha i dr.

U tabeli 6.1 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Zlatibor.

Tabela 6.1. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Zlatibor u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (RHMZ)

God	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	63,8	80,6	148,4	82,5	43,9	129,8	10	114,5	98,2	91,8	65,7	5	934,2
2016	85	54,9	220,9	64,7	162,7	127,1	111	162,4	54,2	116,4	111,9	21,1	1292,3
2017	47,3	46,4	49,9	127,6	102,1	80,4	83,2	38,2	81,2	98,5	58	103,6	916,4
2018	59	122,8	120,8	49,8	66,3	235,8	197	98,2	40,7	49	96,4	72,2	1208
2019	95,5	65,1	30,5	111,3	109,8	85,2	106,3	16,6	36,8	28	52,7	80,2	818
2020	33,4	89,6	76,2	46,5	79	237,2	90,5	138,7	16,7	81,7	29	74,5	993
Pr.	64	76,6	107,8	80,4	94,0	149,3	99,7	94,8	54,6	77,6	69,0	59,4	1027,0

Iz pomenute tabele može se uočiti da je mesec sa najvećom sumom padavina bio jun 2020. godine sa 237,2 mm pale kiše. U martu 2016. god. je zabeležena najveća dnevna vrednost kiše od 80,3 mm i to 7. marta 2016. godine. Sa druge strane, mesec sa minimalnom vrednošću pale kiše je decembar 2015. godine sa svega 5 mm kiše. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020. godina variraju od 818 mm 2019. godine do 1292,3 mm, koliko je ukupno palo 2016. godine. Prosečne mesečne sume padavine u periodu 2015 - 2020 variraju od 54,6 mm koje padnu u septembru do 149,3 mm koje su karakteristične za jun mesec, prosečna mesečna suma padavina iznosi 85,6 mm, dok je prosečna godišnja suma padavina 1027 mm/god.

U tabeli 6.2 dat je prikaz maksimalnih mesečnih, srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnja suma palog snega za period 2015 – 2020 godina sa stanice Zlatibor. Iz tabele 6.2 može se uočiti da je mesec sa maksimalnom visinom ukupnog snega bio mart 2015. godine sa 79 cm. Uočava se da na području Zlatibora, čak i u maju može doći do snežnih padavina, kao što je bio slučaj 2016. i 2019. godine, kada je zabeleženo 3 odnosno 7 cm snega. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom novembra i decembra, mada se sneg može javiti i ranije, u oktobru mesecu, kao što je bio slučaj 2017. i 2020. godine. Može se zaključiti da se snežne padavine javljaju u talasu od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u januaru. Srednjegodišnje vrednosti visine ukupnog snega za stanicu Zlatibor za period 2015 – 2020 godina variraju od 14,1 cm 2016. godine do 42,8 cm, koliko je bila visina ukupnog snežnog pokrivača 2015. godine, dok je prosečna srednjegodišnja vrednost za period 2015 – 2020. godina 27,4 cm ukupnog snega, uz napomenu da je proračun srednjegodišnjih vrednosti palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.2. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Zlatibor u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (RHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	48	44	79	30	0	0	0	0	0	0	34	22	42,8
2016	33	10	21	5	3	0	0	0	0	0	16	11	14,1
2017	35	29	15	27	0	0	0	0	0	1	6	40	21,8
2018	27	68	60	2	0	0	0	0	0	0	24	31	35,3
2019	53	37	18	0	7	0	0	0	0	0	0	37	30,4
2020	30	35	25	18	0	0	0	0	0	1	2	30	20,1
Pr.	37,7	37,2	36,3	13,7	1,7	0	0	0	0	0,3	13,7	28,5	27,4

U tabeli 6.3 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Zlatibor. Može se uočiti da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 20,7°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -7°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 8,6°C 2017. godine do 9,4°C 2019. godine, a srednjegodišnja temperatura vazduha za ceo period osmatranja iznosi 8,9°C.

Tabela 6.3. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Sjenica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (RHMZ)

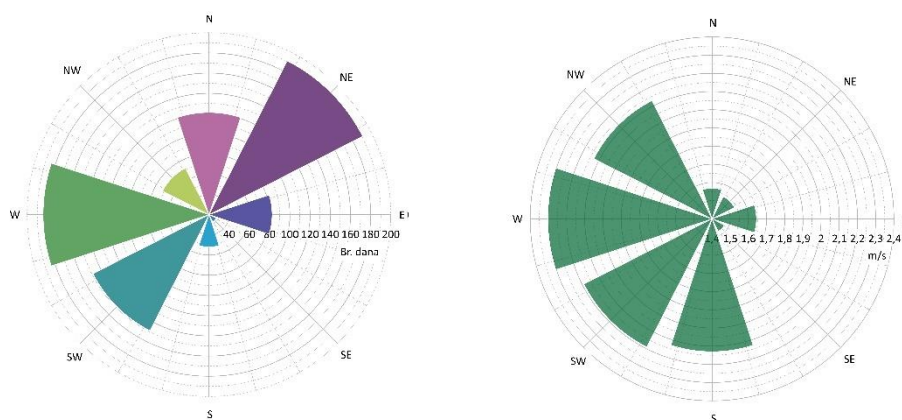
God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Pr.
2015	-0,8	-0,7	1,9	6,6	13,9	15,7	20,7	20,1	15,4	8,9	5,8	0,4	9,0
2016	-0,8	5,1	3,1	10,7	11,1	16,9	18,5	16,2	13,7	7,5	4,2	-1,6	8,7
2017	-7,0	1,9	6,0	6,5	12,5	18,1	19,5	20,3	13,3	9,0	3,6	-0,1	8,6
2018	1,2	-2,2	2,6	12,8	14,8	15,4	17,2	18,9	14,2	10,4	5,2	-1,3	9,1
2019	-3,7	0,1	5,0	8,6	9,7	18,5	18,0	20,2	14,7	12,1	8,3	1,5	9,4
2020	-1,2	2,1	3,0	8,3	11,5	14,9	17,5	18,4	15,1	10,0	4,0	2,5	8,8
Pr.	-2,1	1,1	3,6	8,9	12,3	16,6	18,6	19,0	14,4	9,7	5,2	0,2	8,9

Tabela 6.4 i sl. 6.2 prikazuje vrednosti čestine pravaca i brzine vetra u periodu 2015-2020. godine prikupljene sa klimatološke stanice Zlatibor, sa koje se vidi da je najučestaliji vetar pravca severozapad-jugoistok, dok sa jugozapada duva najintenzivniji vetar.

Tabela 6.4. Učestalost pravaca i brzine vetrova prema pravcima vetrova u (m/s) osmatranih na stanici Zlatibor u periodu 2015 – 2020. godina (RHMZ). Legenda: N - sever, NE - severoistok, E - istok, SE - jugoistok, SW - jugozapada, W - zapad, NW - severozapad, B – brzina vetra (u m/s), Č – čestina vetra

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B
2015	194	2	157	1	72	2	44	2	78	2	319	2	30	1	49	1
2016*	169	2	125	1	71	1	37	2	111	3	323	2	40	2	66	2
2017*	77	2	151	2	57	2	15	2	20	2	18	2	137	2	58	3
2018	106	1	293	2	117	2	39	2	37	2	69	3	301	3	96	2
2019*	86	2	215	2	96	2	19	1	36	2	91	3	293	3	69	2
2020*	94	1	203	2	82	2	12	1	30	2	73	2	304	3	91	3
Prosek	121	2	191	2	83	2	28	1	52	2	149	2	184	2	72	2

*Nekompletni podaci



Sl. 6.2. Ruža vetrova (levo) i brzine vazдушnih strujanja (desno) za područje meteorološke stanice Zlatibor u periodu 2015-2020 (prema podacima RHMZ)

6.1.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

Celokupni širi istražni prostor pripada Crnomorskom slivu, odnosno slivovima reke Drine koja predstavlja najveći rečni tok ovog područja, reke Đetinje i Belog Rzava. Područje oko Bajine Bašte i Perućca pripada srednjem toku Drine, dok prosečni proticaj ove reke na hidrološkoj stanici „Bajina Bašta“ u periodu 2015-2020. godina prema podacima RHMZ Srbije iznosi 297,5 m³/s. Šire istražno područje obuhvata i površinsku akumulaciju formiranu izgradnjom brane i hidroelektrane „Bajina Bašta“, koja je najveća na celokupnom toku Drine.

Generalno, hidrografske karakteristike šireg istražnog područja direktno su uslovljene geološkom građom i tektonskim karakteristikama terena. Rečna mreža, prikazana na sl. 6.3 ukazuje na skoro potpuno odsustvo stalnih površinskih rečnih tokova na slivnom području vrela Perućac koje je izgrađeno najviše od trijaskih krečnjaka, dok su formirani samo povremeni površinski rečni tokovi na području Dobrog i Ljutog polja, kao i Kaluđerskih bara.

Beli Rzav predstavlja površinski tok koji sa Crnim Rzavom čini veći rečni tok Rzav. Beli Rzav nastaje od Karaklijskog i Baturskog Rzava, a dolina ove reke je karakteristična po klisurama i kanjonima. Reka Rača nalazi se na severoistočnom delu istražnom područja i formira se spajanjem potoka Sovljak i Jeravica, koji primaju vodu sa platoa Kaluđerske bare. Odlikuje se pravouglim tipom drenaže (Jemcov, 2008), a karakteristična je po tome što u letnjim periodima presušuje.

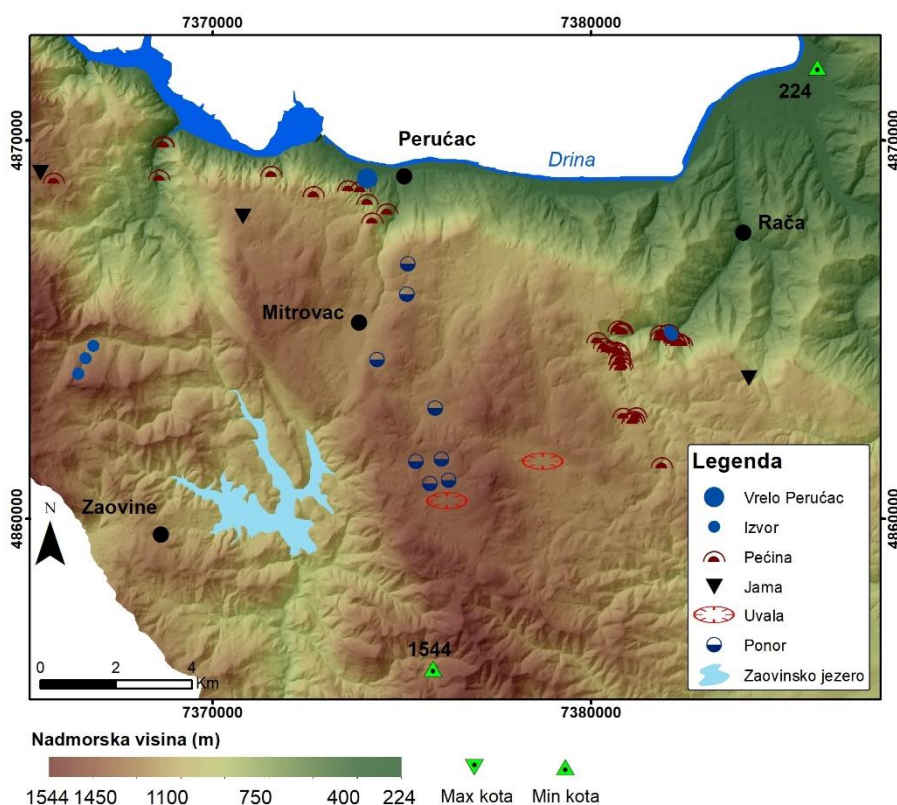
6.1.4 Geomorfološke karakteristike

Širi istražni prostor pripada severnim padinama Tare i Zvijezde i pada od juga ka severu, tj. ka Drini. Nadmorske visine variraju od 244 m koliko iznosi ušće reke Pilice u Drinu do 1544 m, koliko iznosi Zborište – najviši vrh Tare u neposrednoj blizini Kremana (Sl. 6.3). Planina Tara oivičena je rekom Drinom sa severne, kanjonom Dervente sa zapadne strane, dok je sa juga ograničava Kremanska kotlina, a sa istoka dolina Solotuše. Zvijezda se nalazi zapadno od Tare, prirodno odvojena od nje kanjonom Dervente. Planina se nastavlja i u istočnoj Bosni.

Geomorfološke karakteristike istražnog terena uslovljene su geologijom i tektonskim karakteristikama. Širi istražni prostor odlikuju planinska uzvišenja između kojih se nalaze površi ispresecane rečnim dolinama, koje su uglavnom predisponirane rasednim strukturama. Klisure i kanjoni predstavljaju najmarkantnije geomorfološke pojave ovog prostora. Neki od najkarakterističnijih su kanjon Drine, usečen u trijasko krečnjačke uzvodno od hidroelektrane „Bajina Bašta“, dubine i do 1000 m (Milanović S. 1998, Jemcov, 2008), kao i kanjon Selskog

potoka kod Jagoštice na planini Zvijezda koji je tek pre 10ak godina otkriven i koji za sada predstavlja najekstremniji kanjon u Srbiji sa više od 40 vodopada na svom toku. Među ostalima ističu se i klisure Dervente, Rače i Belog Rzava.

Na prostoru Tare i Zvijezde uočavaju se svi površinski i podzemni karstni oblici, osim karstnih polja. Tu su skaršćene rečne doline Branevski Do, Barski Do, Gorušica i Krnja Jela, ispod koje izvire podzemne vode Perućackog vrela, zatim suve doline, kao relikti nekadašnjih površinskih tokova, kao i vrtače, uvale i ponori. Vrtače na istražnom prostoru su različitih dimenzija i oblika. Među karstnim uvalama ističu se uvale Ljuto polje i Dobro polje, dok su najmarkantniji ponori Bulibanovačkog potoka, odnosno ponori u Mitrovcu i Krnjoj Jeli (Jemcov, 2008). Pećine i jame, kao podzemni karstni oblici takođe su razvijeni na širem istražnom području – Soviljačka, Vidova, Jabučka, Todosina i Kozja pećina nalaze se u zaleđu vrela Perućac, zatim u kanjonima Dervente, Rače i Solotuše; jame su razvijene u Mekotama, Velikoj Livadi, Mitrovcu i Čučkovini (Jemcov, 2008). Evolucija karstnog geomorfološkog procesa može se pratiti na primeru Perućackog vrela. Naime, uočavaju se tri nivoa pećinskih otvora iznad vrela, koja svedoče o nekadašnjim zonama isticanja podzemnih voda.



Sl. 6.3. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Perućac sa prikazanim karakterističnim površinskim i podzemnim karstnim geomorfološkim pojavama – ponorima i pećinama, dok su brojeve vrtače uočljive u vidu tačaka

6.1.5 Geološke karakteristike

Dominantne geološke jedinice na slivnom području Perućackog vrela čine sedimentne stene mezozojske starosti, dok se na širem istražnom terenu nalaze i magmatske i metamorfne stene stvarane od paleozoika do kvartara: paleozojski i verfenski škriljci, krečnjaci gornjeg i srednjeg trijasa, rožnaci i peščari, serpentinisani peridotiti, amfiboliti i deluvijalno-aluvijalne naslage (Mojsilović et al. 1978; Olujić & Karović, 1986).

Paleozojskim stenama pripadaju filitomikašisti (Sm), muskovitski (Qm) i sericitski kvarciti (Qse), i to na SI delovima istražnog terena koji pripadaju tzv. Drinskom paleozoiku. Mezozojske

stene predstavljene su trijaskim, jurskim i krednim sedimentima. Donji trijas (T_1) predstavljen je pešćarima, kvarcnim konglomeratima, brečama i alevrolitima sajske starosti koje leže transgresivno preko paleozojskih škriljaca na desnoj obali Drine. Donji trijas je takođe predstavljen kampilskim potkatom predstavljenim slojevitim krečnjacima i dolomitima. Srednji trijas (T_2) predstavljen je slojevitim, bankovitim i masivnim krečnjacima i dolomitičnim krečnjacima. Masivni krečnjaci sprudne i subsprudne facije, koji su intenzivno karstifikovani omogućili su formiranje karstne izdani Perućca i akumulaciju značajnijih količina vode. Gornji trijas (T_3) predstavljen je karbonatnom serijom u vidu slojevitih i bankovitih, dolomitičnih krečnjaka i dolomita. Nalazi se na području Zvijezde i južno od krečnjaka platoa Tare.

Jura je predstavljena sedimentnim, magmatskim i metamorfnim stenama, koje su nastajale kao rezultat taloženja u dubokomorskoj sredini početkom jure, odnosno nakon razlamanja okeanske kore i formiranjem dijabaz-rožnačke formacije (ofiolitskog kompleksa). Donjojurski sedimenti (J_1) predstavljeni su bankovitim i laporovitim krečnjacima, debljine do 100 m. Neraščlanjena jura ($J_{2,3}$) predstavljena je dijabaz-rožnačkom formacijom i zauzima delove terena po obodu Zlatiborskog peridotitskog masiva. Tokom jure i izlivanjem magme duž razloma okeanske kore, došlo je i do formiranja harchburgita (σ), gabra (v), dijabaza ($\beta\beta$), gabrodijabaza ($v\beta\beta$, $\beta\beta$), spilita ($\beta\beta ab$) i serpentinita (Se).

Kredni sedimentni predstavljeni su neraščlanjenim cenomansko-turonskim sedimentima ($K_2^{1,2}$), turonom (K_2^2) i senonom (K_2^3). Cenoman-turonski sedimenti locirani su u Mitrovačkom rovu i na prostoru Zvijezde, i predstavljeni su krečnjacima. Turonski sedimenti su predstavljeni slojevitim, peskovitim i laporovitim krečnjacima i laporcima u donjem delu, preko kojih leže bankoviti krečnjaci, koji prelaze u senonske rudistne krečnjake.

Tercijarni sedimentni razvijeni su na jugoistočnim delovima istražnog prostora i pripadaju miocenu. Donja serija miocena ($1M$) predstavljena je brečama, aglomeratima i peskovitim glinama, dok je gornja serija ($2M$) predstavljena dolomitičnim i laporovitim krečnjacima.

Kvartarni sedimenti predstavljeni su aluvijalnim, proluvijalnim, deluvijalnim i barskim sedimentima. Aluvijalni sedimenti (al) razvijeni su u dolinama Drine, Belog Rzava i Konjske reke, a izgrađeni su od peskova i krupnozrnih šljunkova. Proluvijalni sedimenti (pr) izgrađeni su od nesortiranog materijala u formi plavinskih lepeza izgrađenim od šljunkova i peskova. Sipari (s) nalaze se na strmim padinskim strana Tare, sačinjen je od nevezane i nezaobljene krečnjačke drobine. Deluvijum (d) je razvijen na dolinskim stranama glavnih vodenih tokova, dok se rečne terase (t) pružaju dolinom Drine, iznad Bajine Bašte, u vidu peskova i šljunkova debljine od 25-30 m. Organogeno-barski sedimenti (b) imaju vrlo malo rasprostranjenje i javljaju se samo na površima Tare, u vidu povlatnih slojeva miocenskih sedimenata ili ofiolitskog kompleksa.

Prema tektonskim karakteristikama, Jemcov (2008) deli širu oblast istraživanja na četiri zasebne strukturne celine:

- Jugozapadni obod antiklinalne strukture Jelove Gore izgrađen od paleozojskih škriljaca;
- Krečnjački plato Tare koji je mitrovačkim rasedom podeljen u dva strukturna bloka;
- Severozapadni obod Zlatiborskog peridotitskog masiva;
- Sinklinala Zvijezde i Belog Rzava (koja svoje produženje ima izvan granica istraživanog terena - brahisinklinala Mokre Gore).

Među rasednim strukturama ističu se regionalni rasedi Konjske reke, koji se protežu od Dervente do Zborišta i sadrže veći broj paralelnih zona smicanja i Mitrovački rased, koji deli Taru na dva bloka, od kojih je J_1 blok izdignut, i koji direktno utiče na mehanizam isticanja Perućčkog vrela (Jemcov, 2008).

6.1.6 Hidrogeološke karakteristike

Na širem istražnom terenu mogu se izdvojiti intergranularni, pukotinski i karstni tip izdani, uz postojanje uslovno-bezvodnih delova terena (Prilog 1).

Karstni tip izdani ima najveće rasprostranjenje na celom istražnom prostoru. Ovaj tip izdani formiran je u slojevitim i bankovitim krečnjacima i dolomitima donjeg trijasa (2T_1), crnim masivnim slojevitim krečnjacima srednjeg trijasa (T_2), krečnjacima i dolomitima gornjeg trijasa (T_3) i slojevitim i bankovitim krečnjacima cenomana i turona ($K_2^{1,2}$) (Jemcov, 2008). Dominacija karstnog tipa izdani ogleda se i u tome što se praktično celokupne podzemne vode Tare dreniraju preko karstnih vrela. Dubina do baze karstifikacije se procenjuje na 250 do 300 m (Krešić, 1981; Jemcov, 2008), imajući u vidu istražna bušenja vršena za potrebe izgradnje hidrotehničkih objekata na Tari.

Prihranjivanje karstne izdani vrši se infiltracijom atmosferskih voda u vidu kiše i snega, odnosno poniranjem povremenih i stalnih površinskih tokova koji se formiraju na nekarstnim delovima terena. Visoka vrednost padavina, koja u periodu 2015-2020 prosečno iznosi 1027 mm (tab. 6.1), kao i značajna debljina snežnog pokrivača uslovljavaju ravnomernu efektivnu infiltraciju atmosferskih voda i održavaju prihranjivanje karstnih podzemnih voda, koja je omogućena i znatnom karstifikovanošću karbonatnih sedimenata. Sa druge strane, značajna površina pod vegetacionim pokrivačem, pre svih šumska područja smanjuje efektivnu infiltraciju, budući da se značajan procenat padavina izgubi na račun intercepcije i evapotranspiracije. Osim difuznog prihranjivanja karstne izdani, infiltracija kišnih i snežnih padavina vrši se punktuono preko vrtača, uvala i ponora, među kojima se ističu ponori u Ljutom polju – Jaruga, Zaboj, ponor Bulibanovačkog potoka; odnosno ponori u Mitrovcu, Krnjoj Jeli i Jastrebov ponor (Jemcov, 2008).

Pravci kretanja podzemnih voda u karstu Tare generalno su orijentisani ka erozionom bazu – reci Drini, tako da je generalni pravac kretanja karstnih podzemnih voda od juga ka severu. Tokom prethodnih istraživanja nije vršeno mnogo opita obeležavanja izdanskih tokova. Marković (2017) navodi obeležavanje Vasića ponora na Tari 1975. god. sa 50 kg natrijum fluoresceina, a boja se pojavila na Perućaćkom vrelu nakon dva dana, na osnovu čega je proračunata virtuelna brzine od 3,2 cm/s. Jemcov (2008) navodi opit obeležavanja ponora u Ljutom polju 1992. godine, kada je 40 kg natrijum fluoresceina. Nakon jednomesečnog osmatranja, traser nije detektovan ni na jednom osmatračkom punktu, što može biti posledica ili zadržavanje trasera u tzv. „slepom“ kanalu ili značajne padavine i topljenje snega koje se desilo nakon ubacivanja trasera, a što je verovatno dovelo do razblaživanja trasera ispod praga detekcije (Milanović P. 1991; Jemcov, 2008).

Dreniranje karstne izdani masiva Tare najčešće se vrši u vidu izvora i vrela različite izdašnosti. Ove hidrogeološke pojave obično su locirane na kontaktu karstnih i nekarstnih delova terena, odnosno na pravcima pružanja ili ukrštanja rasednih struktura. Glavne zone dreniranja karstne izdani su vrela Perućac (Sl. 6.4), Solotuša, Lađevac, Rača, Omarsko i Jokića vrela.

Vrelo Perućac nastaje na kontaktu paleozojskih stena i trijaskih krečnjaka i peščara. Primarna zona isticanja je zamaskirana debelim naslagama krečnjačke drobine (do 70 m debljine), nakon čega se pojavljuje na površini terena na koti 254 mnm. Izdašnost vrela se kreće od 1,34 m³/s do 6,18 m³/s, sa srednje višegodišnjom vrednošću izdašnosti od 1,42 m³/s (Jemcov, 2008). Na osnovu prethodnih hidrogeoloških istraživanja, površina sliva vrela Perućac oscilira od 67 km² (Milanović, S. 1998), preko 75 km² (Jemcov, 2008) do 79,3 km² (Ristić Vakanjac et al. 2015). Ove razlike se javljaju kao posledica različitih hidroloških stanja u kojima je površina ocenjivana, dok je za analizu podataka izdašnosti vrela za period 2015-2020. godina, usvojena površina sliva od 75 km².

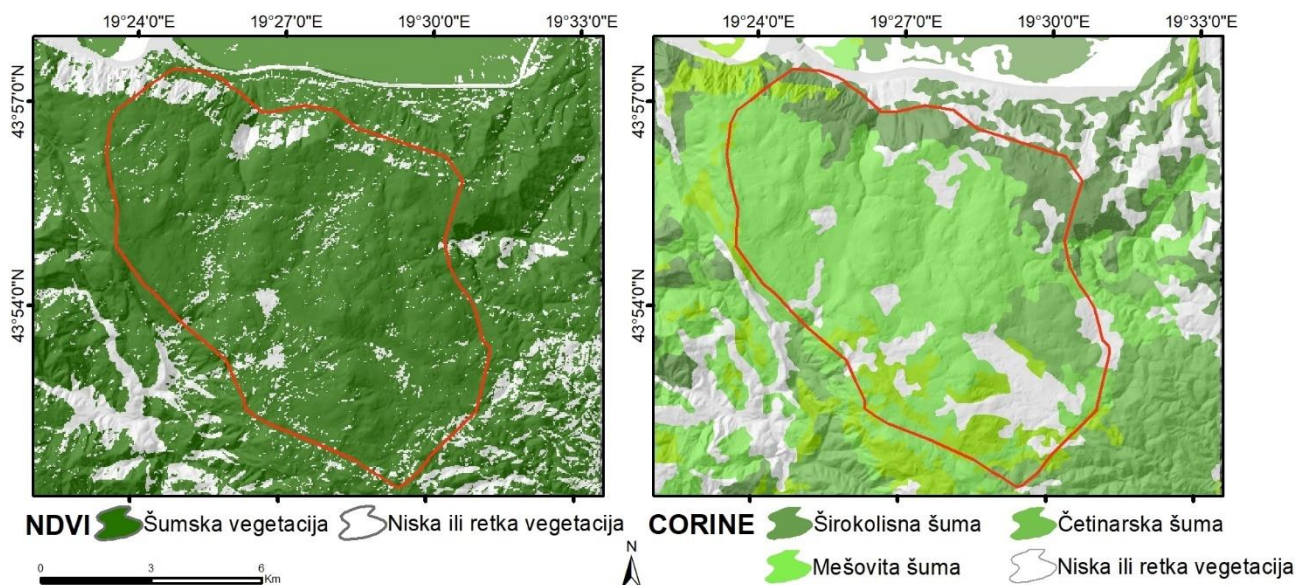


Sl. 6.4. Karstno vrelo Perućac u periodu malih (levo, jul, 2019) i velikih voda (desno, maj 2021)

6.1.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Perućac

6.1.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Za područje vrela Perućac, odnosno njegovog slivnog područja na platou Tare, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 90% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 85% sliva (Sl. 6.5). Stoga, za finalni vegetacioni indeks uzeta je u obzir aritmetička sredina ove dve vrednosti, te je indeks procenjen na 0,88, što bi značilo da je finalna vrednost efektivne infiltracije sačinjena od 88% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 12% viška vode dolazi sa otvorenih područja sa niskom ili retkom vegetacijom.



Sl. 6.5. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva Perućca (prema podacima USGS, snimak zabeležen 3. avgusta 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva Perućca (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Perućac prikazana je crvenom linijom

Određivanje deficita zemljišne vlage i proračuna efektivne infiltracije podrazumevalo je kalibraciju maksimalne količine zemljišne vlage koju nezasićena nadzidanska zona može da primi, tako da se ukupni višak vode, korišćenjem vegetacionog indeksa od 0,88 i zadate slivne površine od 75 km² što je više moguće približi ukupnoj količini istekle vode. Kroz iterativni postupak proračuna, zadavane su površine od 67 km² do 79 km², koje su rezultat istraživanja prethodnih autora, međutim, s obzirom na minimalne razlike u finalnom proračunu efektivne infiltracije, a i na činjenicu da površina od 75 km² praktično predstavlja aritmetičku sredinu

dijapazona vrednosti površine sliva, ova vrednost je usvojena kao relevantna. Ovaj postupak je pokazao da maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje Perućca iznosi 46 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Najveći deficit vlage u zemljištu je tokom letnjih meseci, dok se najmanji deficit ostvaruje tokom prolećnih meseci, kada dolazi do obilnih kiša i otapanja snežnog pokrivača.

Tabela 6.5 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tab. 6.1-6.4), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu. Takođe, date su i procentualne vrednosti parametara evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

*Tabela 6.5. Uporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Zlatibor, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Perućac za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Perućac*

	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	1205,4	905,7	1250,5	874,7	968,7	1041,0
PgSWE (mm)	1814,5	1274,0	1666,2	1215,5	1562,0	1506,4
PgiSWE (mm)	1567,6	1029,8	1356,5	920,1	1215,1	1217,8
PET (mm)	663,6	669,2	676,2	669,2	670,7	669,8
PET/Pbruto (%)	55,1	73,9	54,1	76,5	69,2	64,3
AETg (mm)	522,3	429,5	531,0	422,0	465,4	474,1
AETg/PgSWE (%)	28,8	33,7	31,9	34,7	29,8	31,5
AETveg (mm)	507,1	396,6	501,3	383,9	445,6	446,9
AETv/PgiSWE (%)	32,4	38,5	37,0	41,7	36,7	36,7
Wi (g) (mm)	1302,3	830,9	1139,4	809,8	1095,9	1035,6
Wi (g) / PgSWE (%)	71,8	65,2	68,4	66,6	70,2	68,7
Wi (š) (mm)	1075,1	617,0	864,5	551,6	768,2	775,3
Wi (š) / PgSWE (%)	68,6	59,9	63,7	59,9	63,2	63,7
Ief (mm)	1102,3	642,7	897,5	582,6	807,5	806,5
Ief/Pbruto (%)	91,4	71,0	71,8	66,6	83,4	77,5
Ief/PgSWE (%)	60,8	50,4	53,9	47,9	51,7	53,5
Ief/PgiSWE (%)	70,3	62,4	66,2	63,3	66,5	66,2
Qsr (m³/s)	1,85	1,68	2,08	2,04	1,73	1,88
Q (mm) (F = 75 km²)	780,2	708,1	875,7	857,8	731,1	790,6
Δ Ief-Q (mm)	322,2	-65,4	21,8	-275,2	76,4	16,0
Q / Ief (%)	70,78	110,18	97,57	147,23	90,54	98,02

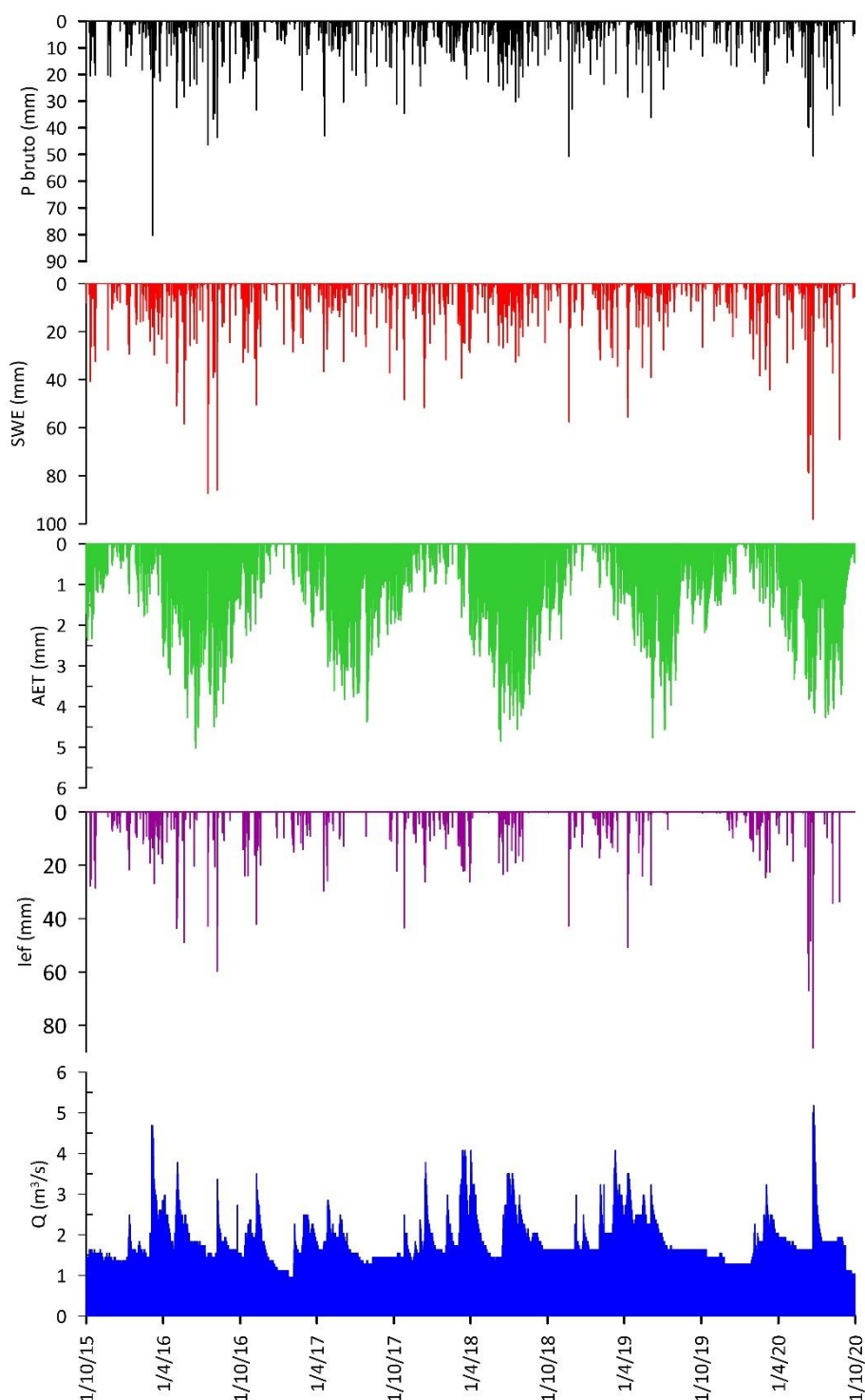
Iz tabele 6.5 može se videti da je vrednost korigovanih padavina i na otvorenim i na područjima pod vegetacijom veća u odnosu na izmerene na prostoru meteorološke stanice Zlatibor, tako da je prosečna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom veća za 465,4 mm od izmerenih vrednosti kiše, dok je na području sa vegetacijom ona veća za 176,8 mm. Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 663,6 mm do 670,7 mm godišnje, odnosno

procentualno od 54,1% do 76,5% izmerenih bruto padavina u pojedinim hidrološkim godinama. Dalje, vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa dodatim vodenim ekvivalentom snega su nešto manje i kreću se od 422 mm do 531 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 383,9 mm do 507,1 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent iznosilo od 28,8% do 34,7% za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom, odnosno od 32,4% do 41,7% za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **31,5%**, dok je za područja pod vegetacijom **36,7%**.

Ukupni višak vode u zemljištu iznosi od 830,9 mm do 1302,3 mm (ili 65,2% do 71,8% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 617 mm do 1075,1 mm (ili od 59,9% do 68,6% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **68,7%**, dok je za područja pod vegetacijom **63,7%**. Procentualne vrednosti se uklapaju sa vrednostima koje odlaze na stvarnu evapotranspiraciju, tako da se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan. Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 582,6 mm do 1102,3 mm, dok je prosečna vrednost efektivne infiltracije u periodu 2015-2020 godina 806,5 mm. Procentualni odnos efektivne infiltracije i padavina iznosi od 53,5% do 77,5% u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu, u zavisnosti da li se radi o izmerenim ili korigovanim vrednostima kiše i snega.

Površina sliva Perućca od 75 km² dovodi vrednosti efektivne infiltracije i količine istekle vode u periodu 2015-2020 godina u ekvilibrijum. Ispravnost ovakvog postupka ogleda se u razlici i procentualnom odnosu prosečnog sloja isticanja i efektivne infiltracije (što je pokazano u poslednja dva reda tabele 6.5) koja za celokupni period oktobar 2015 – septembar 2020 iznosi svega 1,98%. Takođe, uočava se da je tokom hidroloških godina 2016-2017 i 2018-2019 isticalo od 10% do 47% više vode nego što je infiltrirano, dok je 2015-2016 isticalo 71% infiltrirane vode. Uzrok tome što je tokom 2018-2019 godine isticalo skoro 50% više vode nego što je ušlo u sistem, može biti činjenica da ova hidrološka godina predstavlja sušnu godinu, sa najmanjom količinom padavina tokom osmatračkog perioda, i da je verovatno došlo do „prenošenja“ viška vode iz prethodne hidrološke godine. Tokom 2017-2018 i 2019-2020 skoro sve infiltrirane vode su istekle na vrelu Perućac.

Grafički prikaz dnevnih vrednosti izmerenih količina padavina za meteorološku stanicu Zlatibor, vrednosti vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Perućac dat je na uporednom dijagramu 6.6. Na pomenutom dijagramu prikazane su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja pod vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja, ali i identičan trend i zanemarljive razlike u vrednostima za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom.



Sl. 6.6. Uporedni prikaz dnevnih vrednosti izmerenih padavina sa stanice Zlatibor, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Perućac za 2015 – 2020. god

Sa pomenutog dijagram može se uočiti značajno povećanje vrednosti padavina, nakon korekcije i preračunavanja snega u vodeni ekvivalent. Takođe, uočljiva je ciklična promena stvarne evapotranspiracije koja je veća u prolećnim, vegetativnim periodima godine od perioda zimskih meseci, kada je temperatura značajno niža. Vrednosti efektivne infiltracije su male ili čak odsustvuju u periodima visokih vrednosti stvarne evapotranspiracije, što ukazuje na ispravnost postupka bilansiranja zemljišne vlage. Uočljivo je da vrednosti izdašnosti vrela Perućac generalno prate povećanje ili smanjenje vrednosti efektivne infiltracije, što je posebno važno u

periodima velikih voda kada se uočavaju maksimalni intenzitet efektivne infiltracije, ali i maksimumi izdašnosti, odnosno u recesionom periodu kada je izdašnost na minimumu, a efektivna infiltracija izostaje. Poklapanja pikova isticanja i efektivne infiltracije su najčešća tokom jesenjih i prolećnih meseci, mada se mogu desiti i tokom letnjih meseci kada su očigledno intenzivni letnji pljuskovi uzrokovali reakciju vrela, što je bio slučaj leta 2016, 2018 i 2020. godine. Takođe, uočavaju se i periodi kada odsustvuje efektivna infiltracija, najčešće tokom letnjih meseci, kada nastupa recesioni period, dok se može primetiti i da određena količina infiltrirane vode nakon recesionog perioda biva utrošena na popunu dinamičkih rezervi koje su istekle u vidu baznog oticaja tokom recesije.

6.1.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Tabela 6.6 prikazuje osnovne statističke parametre za svaku pojedinačnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020 godine.

Tabela 6.6. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Perućac za period 2015 - 2020. godine. Legenda: **N** - ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} - srednja vrednost serije; **Mdn** - medijana; **M** - mod; **Min** - minimalna vrednost serije; **Max** - maksimalna vrednost serije; **VAR** - varijansa serije; σ - standardna devijacija; **Cv** - koeficijent varijacije; **Cs** - koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
m ³ /s										
2015-2016	366	1,85	1,64	1,45	1,28	4,69	0,31	0,56	30,21	2,16
2016-2017	365	1,68	1,54	1,45	0,96	3,50	0,19	0,44	26,13	0,79
2017-2018	365	2,08	1,83	1,45	1,36	4,07	0,44	0,66	31,67	1,21
2018-2019	365	2,04	1,73	1,64	1,64	4,07	0,28	0,53	25,86	1,32
2019-2020	366	1,73	1,64	1,83	1,03	5,17	0,30	0,54	31,41	2,98
2015-2020	1827	1,88	1,64	1,64	0,96	5,17	0,33	0,57	30,50	1,70

Iz Tabele 6.6 može se uočiti da je izdašnost karstnog vrela Perućac u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,96 m³/s do 5,17 m³/s, tako da je srednja vrednost 1,88 m³/s, medijalna i modalna 1,64 m³/s. Takođe, uočava se da su minimalne vrednosti oscilirale od 0,96 do 1,64 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 3,5 do 5,17 m³/s. Vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju centralnu tendenciju vremenske serije isticanja vrela Perućac, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno. Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini i dinamici karstnog sistema, tako da sistem Perućac pripada klasi *Nisko razvijenih sistema*, budući da je koeficijent varijacije niži od 49 (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020).

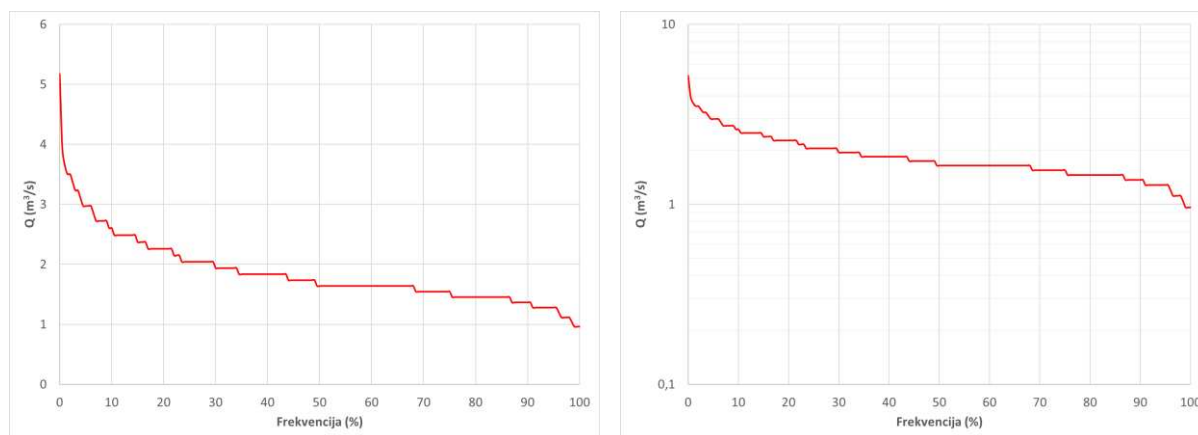
6.1.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

Analiza krivih trajanja dnevnih vrednosti protoka vrela Perućac izvršena je za celokupni period osmatranja 2015 -2020. godine. Proračunati podaci prikazani su u tabeli 6.7, kao i grafički na sl. 6.7 u vidu dijagrama normalne i log-normalne raspodele, kako bi se bolje istakle maksimalne i minimalne vrednosti isticanja, tj. bolje analizirali periodi malih i velikih voda.

Tabela 6.7. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Perućac na nivou od 1 do 99% za period 2015 - 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m³/s

Period	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₃₀	Q ₄₀	Q ₅₀	Q ₆₀	Q ₇₀	Q ₈₀	Q ₉₀	Q ₉₅	Q ₉₉
2015-2020	3,64	2,97	2,60	2,26	1,94	1,83	1,64	1,64	1,54	1,45	1,36	1,28	0,96

Iz tabele 6.7 može se uočiti da vrednost je u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) isticanje na vrelu iznosila $1,64 \text{ m}^3/\text{s}$, što u potpunosti korespondira sa medijalnom i modalnom vrednošću. Za analizu sušnih i poplavnih perioda bitne su vrednosti $Q_{95} - Q_{100}$ i $Q_0 - Q_1$, te se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Perućac mogu očekivati vrednosti isticanja od $0,96 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{99}) do $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{95}). Sa druge strane, poplavni talasa koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose $3,64 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_1) na vrelu Perućac. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{10}) do $3,64 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_1), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{95}) do $1,54 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{70}).



Sl. 6.7. Krive trajanja protoka vrela Perućac za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Analizirajući dijagrame učestalosti protoka na vrelu Perućac, jasno se uočava strmi nagib krive za vrednosti frekvencije od 1 do 5%, što ukazuje na dominantan pravac kretanja podzemnih voda, verovatno kroz veći karstni kanal. Na dijagramu log-normalne raspodele nije uočljiva tačka infleksije koja bi ukazivala na frekvenciju isticanja podzemnih voda kroz matriks stene ili karstne kanala u uslovima slabog pritiska i laminarnog režima tečenja. Ovo može ukazivati na relativno stabilan režim isticanja vrela Perućac.

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) u slučaju vrela Perućac iznosi $1,28$, ukazujući na nisku varijabilnost isticanja. Recipročan odnos ove dve vrednosti ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema, koju u slučaju karstnog sistema Perućac iznosi $0,78$ što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela 78% vode dolazi na račun baznog oticaja.

Koeficijent varijabilnosti vrela, koji podrazumeva odnos Q_{10} / Q_{90} (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Perućac iznosi $1,91$ što ga svrstava u klasu vrela sa stabilnim režimom isticanja karstnih podzemnih voda, dok bi u slučaju razmatranja samo odnosa ekstremnih vrednosti, koeficijent varijabilnosti (u ovom slučaju hidrodinamičke neravnomernosti) iznosio $5,38$, što je skoro 3 puta veća vrednost od realne.

6.1.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Recesiona analiza karstnih podzemnih voda karstnog sistema Perućac izvršena je za svaku hidrološku godinu zasebno, prema eksponencijalnoj jednačini Majea. Prvi korak u recesionoj analizi bilo je definisanje perioda isticanja podzemnih voda bez aktivnog prihranjivanja sistema, što je urađeno na osnovu komparativne analize hidrograma vrela Perućac i dijagrama efektivnih padavina, prikazanih na sl. 6.6, na kome se uočavaju vremenski periodi bez efektivne infiltracije. Stoga, može se smatrati da je definisanjem perioda sa nultom efektivnom

infiltracijom zadovoljen teorijski pristup da je recesija onaj period hidrološke godine bez aktivnog prihranjivanja karstnog sistema kada na vrelu ističe samo bazni oticaj, formiran na račun prethodno akumuliranih količina podzemnih voda u sistemu.

Tabela 6.8 prikazuje rezultate proračunate u okviru analize recesivnih krivih vrela Perućac za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.8. Rezultati recesivne analize karstnog vrela Perućac za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesivnog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesivnog perioda

Godina	Recesivni period	Koeficijent recesivije			$V_0 \times 10^6$ (m ³)	$V^* \times 10^6$ (m ³)	$V_{total} \times 10^6$ (m ³)	t (dani)
2015-2016	8.8. - 23.9.2016	1	α_1	0,101	V_1	46,313	9,046	3
					V_2			7
					V_3			37
					ΣV_0			55,358
2016-2017	12.6. - 27.7.2017	1	α_1	0,0732	V_1	23,682	5,5277	3
					V_2			29
					V_3			14
					ΣV_0			29,209
2017-2018	26.7. - 30.9.2018	1	α_1	0,0306	V_1	52,571	15,4	9
					V_2			16
					V_3			42
					ΣV_0			67,972
2018-2019	4.6. - 19.7.2019	1	α_1	0,057	V_1	163,16	13,686	3
					V_2			36
					V_3			7
					ΣV_0			176,85
2019-2020	24.6. - 19.8.2020	1	α_1	0,0733	V_1	661,56	11,968	10
					V_2			10
					V_3			37
					ΣV_0			673,53

Ukoliko se posmatra celokupni period osmatranja od 2015. do 2020. godine, može se zaključiti da je karstni sistem Perućac dobro razvijen, s obzirom na postojanje 3 mikrorežima pražnjenja, što je generalno odlika dobro razvijenog i karstifikovanog sistema. Takođe, prvi mikrorežim pražnjenja skoro po pravilu se odnosi na brzo pražnjenje sistema pod uticajem turbulentnog režima tečenja (te se stoga, često ne prilagođava eksponencijalnoj jednačini Majea, već se odnosi na tzv. β režim), što ukazuje na dominantni karstni kanal i predisponirane pravce cirkulacije podzemnih voda ovim kanalima. Na to ukazuje i red veličine koeficijenta recesivije od 10^{-1} do 10^{-2} , tako da vrednosti koeficijenta recesivije prvih mikrorežima isticanja osciliraju od 0,0306 do 0,101. Sa druge strane, treći mikrorežimi pražnjenja funkcionišu u laminarnom režimu cirkulacije podzemnih voda i odlikuje se koeficijentima recesivije reda veličine 10^{-3} i 10^{-4} , koji osciliraju u dijapazonu od 0,0002 do 0,0046. Zapremina istekle vode varira od 5,5277 m³ tokom 2016-2017 godine, do 15,4 m³ 2017-2018 godine, tako da prosečna zapremina istekle vode tokom svih recesivnih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine iznosi $11,12 \times 10^6$ m³.

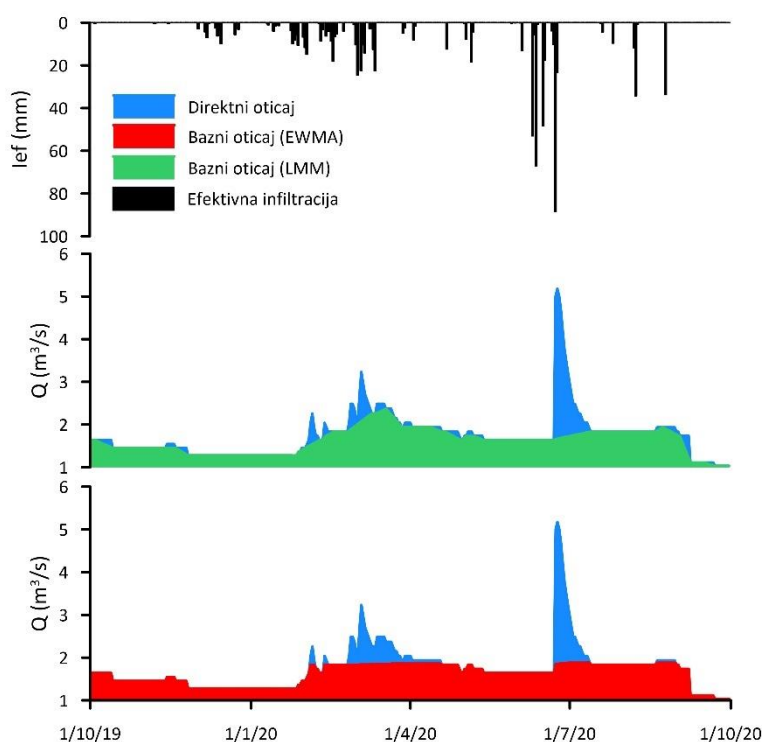
6.1.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

Za određivanje parametra N iskorišćena je komparacija promene indeksa baznog oticaja za vrednosti N od 1 do 10, tako da je u slučaju vrela Perućac vrednost $N=6$. Primenom LMM,

proračunate su dnevne vrednosti baznog oticaja za period 2015 – 2020. godina, kao i vrednosti indeksa baznog oticaja u vidu relacije Q_{bazno} / Q_{ukupno} . Analizom je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Perućca 2,97 m³/s, minimalna 0,96 m³/s, a srednja vrednost 1,69 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,32 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,927 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema vrela Perućac prosečno čini 92,7% ukupnog oticaja ovog sistema, prema metodi lokalnog minimuma.

Primena rekurzivnog digitalnog filtera EWMA uključila je srednju vrednost koeficijenta recesije trećih mikrorožima karstnog sistema vrela Perućac za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.8, budući da je ocenjeno da se treći mikrorožimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena vrednost koeficijenta recesije trećih mikrorožima iznosi $\alpha_{3av} = 0,0023$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera sračunata je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Perućac od 1,98 m³/s, minimalna 0,95 m³/s, a srednja vrednost 1,59 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,3 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,893 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Perućac prosečno čini 89,3% ukupnog oticaja ovog sistema. Ova vrednost je sličnog reda veličine kao vrednost dobijena primenom LMM metode.

Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Perućac dati su na sl. 6.8 i to za hidrološku godinu 2019-2020, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 968,7 mm.



Sl. 6.8. Uporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Perućac za 2019-2020 god.

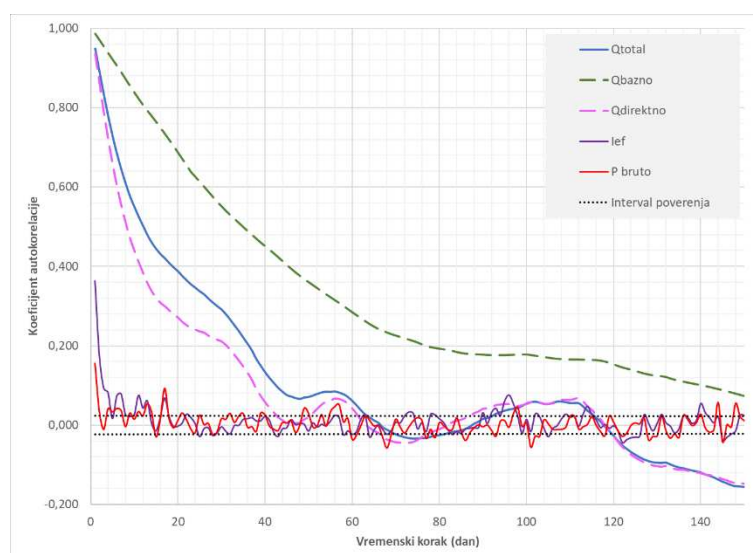
Obe primenjene metode daju zadovoljavajuće rezultate, koji su i približno jednaki. Ipak, s obzirom na to da rekurzivni digitalni filter EWMA uključuje u proračun i koeficijent recesije, ova metoda je iskorišćena pri finalnom razdvajanju hidrograma i proračunu baznog oticaja, što je razmatrano pri analizi vremenskih serija direktnog i baznog oticaja i efektivne infiltracije. Analizom baznog oticaja vrela Perućac primenom obe metode ustanovljeno je da bazni oticaj čini skoro 90% hidrograma vrela, što znači da je karstni sistem vrela Perućac dobro strukturiran i razvijen, tako da se akumulira značajna količina vode, tj. da su rezerve podzemnih

voda znatne. Preostalih 10% odnosi se na direktni oticaj koji nastaje pod uticajem efektivne infiltracije.

6.1.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza autokorelacione funkcije izvršena je za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), kao i zasebno za sušnu (2018-2019) i vlažnu (2017-2018) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 150 dana za ukupni period razmatranja, odnosno 100 dana za sušnu i vlažnu godinu.

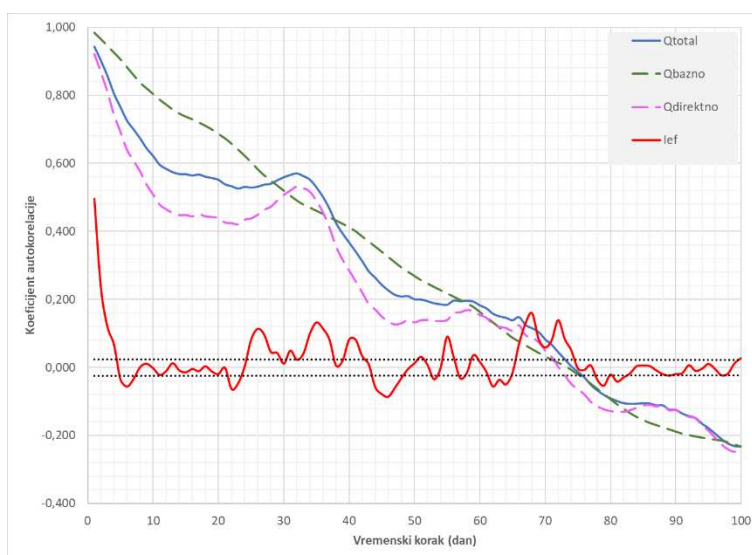
Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog sistema vrela Perućac, bruto izmerene padavine i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazana je na sl. 6.9. Sa sl. 6.9 se može uočiti visoka autokorelisanost baznog oticaja, koji gubi statističku značajnost tek posle 150. dana, ukoliko se posmatraju intervali poverenja, dok ukoliko se kao granica razmatra vrednost 0,2, koeficijenti autokorelacije baznog oticaja postaju statistički beznačajni posle 77 dana. Ovo ukazuje na veliku memoriju sistema, odnosno na veliku akumulativnu sposobnost karstnog sistema vrela Perućac. Slične rezultate pokazuju i analize Jemcova (2008). Autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja su sinhroni, što ukazuje na značajan uticaj efektivne infiltracije na formiranje isticanja karstnog sistema Perućca. Koeficijenti autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja su visoki. Ukoliko se posmatraju intervali poverenja, tek nakon 43 dana autokorelacija direktnog oticaja dostiže prag značajnosti, da bi potom koeficijenti autokorelacije nekoliko puta rasli iznad praga značajnosti. Granicu od 0,2 pomenute vremenske serije dostižu 32. (direktni oticaj) i 37. dana (ukupni oticaj). Na osnovu ovih vrednosti, može se zaključiti da je karstni sistem vrela Perućac dobro strukturiran i da ima sposobnost akumulacije značajne količine vode koja utiče na formiranje oticaja na vrelu. Strmi nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja koji traje prvih 11 dana jasno ukazuje na brzo pražnjenje sistema kroz predisponirane kanale i pukotine koje dopremaju vodu do vrela, dok blagi nagib autokorelograma baznog oticaja ukazuje na sporije pražnjenje sistema u laminarnom režimu tečenja kroz matriks krečnjaka i manje pukotine. Indikativno je i to da, generalno gledano, nagib autokorelograma direktnog i baznog oticaja ima isti trend, što ukazuje na povezanost ove dve komponente hidrograma i uticaj na ukupni oticaj.



Sl. 6.9. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Perućac, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

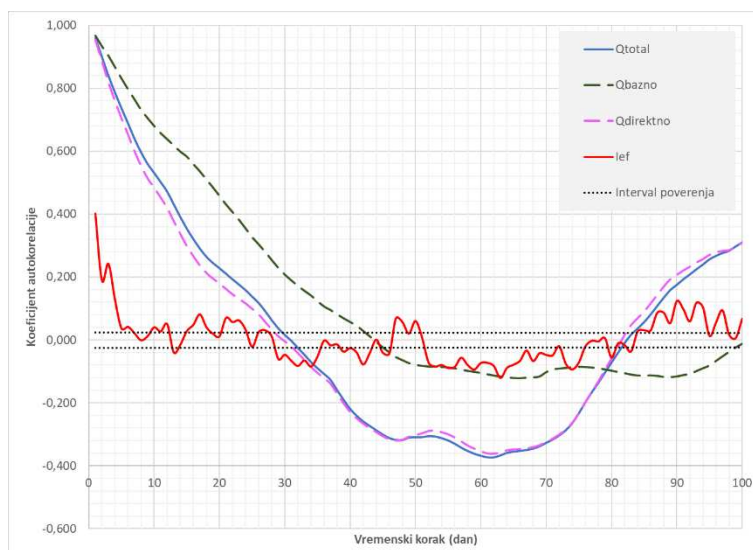
Autokorelacija izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije pokazuje slučajnu prirodu ove promenljive, tako da statistička značajnost ove komponente prestaje nakon samo dva dana, uz napomenu da su koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije nešto viši.

Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Perućac, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2018 – 2019, koja je ocenjena kao sušna godina prikazan je na Sl. 6.10. Može se uočiti uticaj efektivne infiltracije na direktan oticaj, imajući u vidu jasno poklapanje pikova između 27. i 35. dana. Upravo to je razlog za naknadnu pojavu pika autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja, čime se može potvrditi veliki uticaj prihranjivanja na direktnu komponentu hidrograma. Manji pik koji je javlja 55. dana takođe potvrđuje prethodnu tezu, dok pik efektivne infiltracije 68. i 72. dana ima slučajni karakter, budući da nema uticaja na autokorelogram hidrograma. Interesantan podatak predstavlja memorija sistema sve tri komponente hidrograma. Naime, ukoliko se razmatraju intervali poverenja, uočava se da 72. dana i direktni i bazni oticaj gube statističku značajnost, dok 74. dana se prekida memorija ukupnog oticaja. To je još jedan indikator povezanosti direktnog, baznog i ukupnog oticaja vrela Perućac. Nešto drugačiji rezultati se dobijaju ukoliko se posmatra prag od 0.2, na osnovu koga je memorija sistema direktnog oticaja 42, ukupnog 50, a baznog 58. dana.



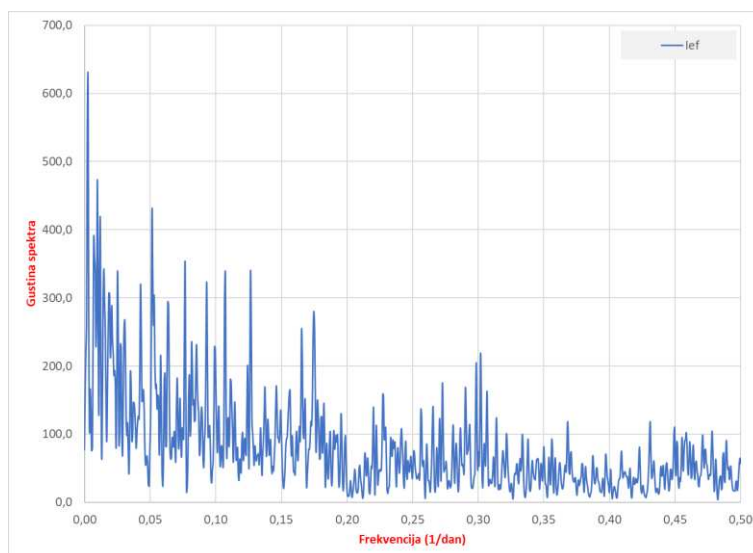
Sl. 6.10. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Perućac i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2018 – 2019)

Sl. 6.11 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Perućac, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2017 – 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina. Sa sl. 6.11 uočava se takođe sinhroni nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja, dok autokorelogram baznog oticaja prati prethodna dva do 62. dana, nakon čega direktni i ukupni oticaj sinhrono reaguju na efektivnu infiltraciju. Porast koeficijenta autokorelacije kod direktnog i ukupnog oticaja nakon 62. dana u vlažnoj godini ukazuje na zasićenje sistema vodom i isticanje novoinfiltrirane vode. Sličan primer može se videti i kod autokorelograma baznog oticaja, koji reaguje sa zakašnjenjem, tj. nakon prolaska inicijalnog impulsa. Memorija sistema tokom vlažne hidrološke godine iznosi 18 dana za direktan i 21 dan za ukupni oticaj, tj. 30 dana za bazni oticaj, ukoliko se posmatra prag $r_k < 0.2$, dok ukoliko se razmatraju intervali poverenja, memorija sistema je nešto duža i iznosi 29 dana za direktni i 30 za ukupni, tj. 43 dana za bazni oticaj.



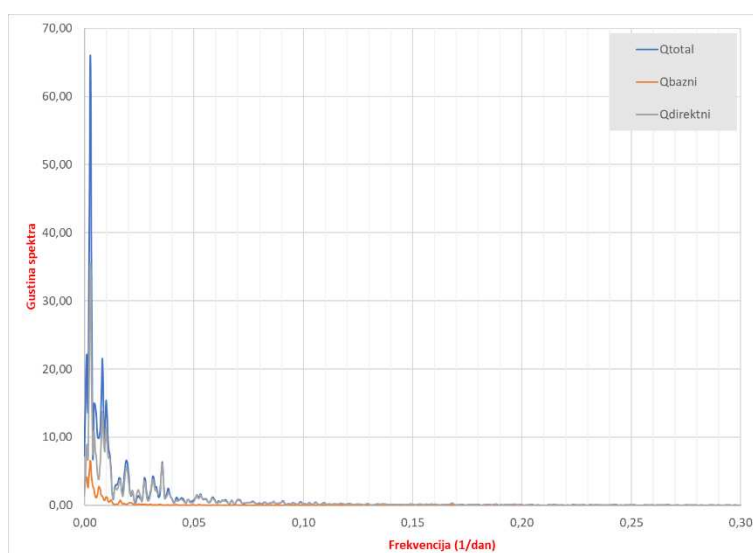
Sl. 6.11. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Perućac i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Perućac prikazana je na sl. 6.12, sa koje se mogu uočiti 5 najfrekventnijih pikova koji pokazuju cikličnost vremenske serije. To su vrednosti 0.002738, 0.007119, 0.009858, 0.012048 i 0.051479 dan⁻¹, koji odgovaraju vremenskim periodima od 365 dana, 140 dana, 101 dan, 83 dana i 19 dana. Prvi pik 0.002738 odgovara vremenskom periodu od 365 dana i pokazuje godišnju cikličnost efektivne infiltracije. Drugi (0.007119) ukazuje na polugodišnju cikličnost, dok treći i četvrti pik (0.009858 i 0.012048) odgovaraju kvartalnom ciklusu. Peti pik (0.051479) odgovara periodu od 19 dana, pokazujući mesečni ciklus efektivne infiltracije.



Sl. 6.12. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Perućac za period 2015 – 2020

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu EWMA filtera za ceo period osmatranja (2015 – 2020) i prikazana je na sl. 6.13.

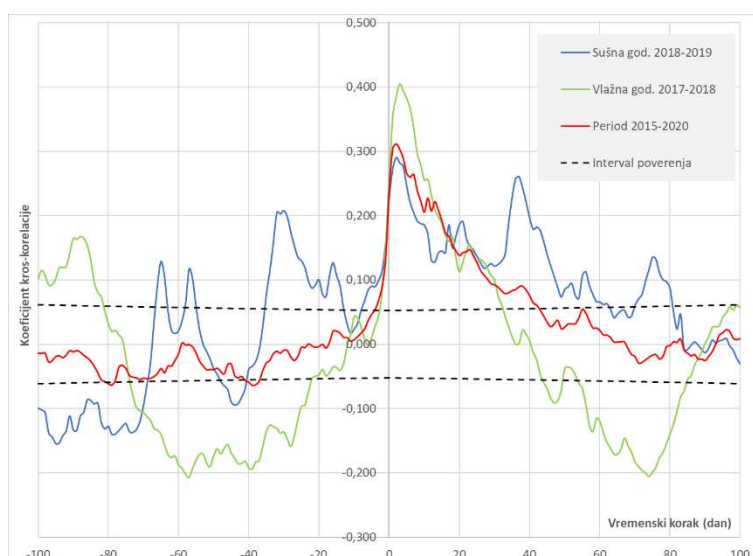


Sl. 6.13. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema Perućac u periodu 2015 – 2020 godina

Sa dijagrama 6.13 može se videti da se pikovi direktnog i ukupnog oticaja javljaju pri frekvencijama nižim od 0.09 dan^{-1} (11 dana), dok se bazni oticaj nalazi na frekvencijama nižim od 0.02 dan^{-1} (50 dana). Karakteristični pikovi za ukupni oticaj su 0.001095, 0.002738, 0.004381, 0.008215 i 0.009858 za odgovarajuće periode od 913, 365, 228, 121 i 101 dana. Ove vrednosti i periodi ukazuju na dvoipogodišnji, godišnji, polugodišnji, četvoromesečni i kvartalni ciklus ukupnog oticaja. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine baznog oticaja pokazuje niže frekvencije (0.000548, 0.001095, 0.002191, 0.002738 i 0.003834) koje odgovaraju broju dana od 1826, 913, 456, 365 i 260. Tako, vrednosti baznog oticaja javljaju se u dužim ciklusima koji odgovaraju petogodišnjim, dvoipogodišnjim, godišnjim i polugodišnjim ciklusima. Spektralna funkcija gustine direktnog oticaja pokazuje identične cikluse kao što je slučaj sa ukupnim oticajem – 0.001905, 0.002738, 0.004381, 0.008215 i 0.009858 što odgovara periodima od 913, 365, 228, 121 i 101 dan. Na taj način jasna je dominantna uloga direktnog oticaja u formiranju ukupnog hidrograma. Sl. 6.13 pokazuje da se pri frekvencijama višim od 0.02, kada spektar baznog oticaja postaje beznačajan, spektar ukupnog i direktnog oticaja značajno raste sve do frekvencije 0.09 dan^{-1} što odgovara periodu od 11 dana.

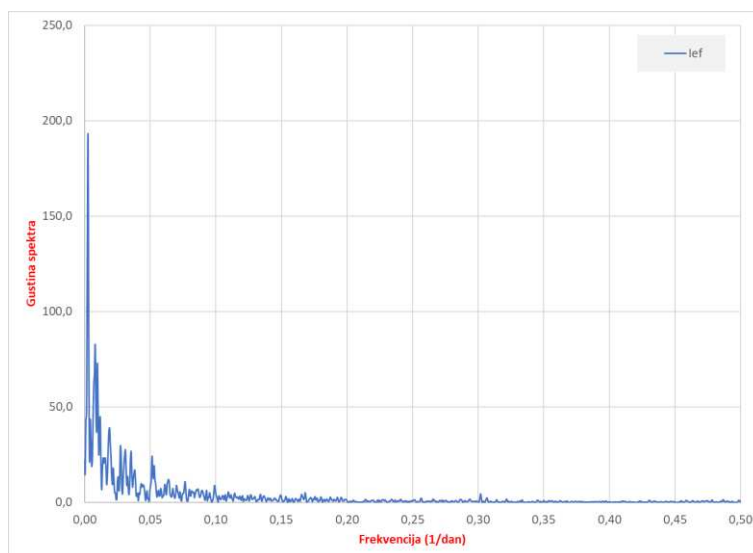
Sl. 6.14 pokazuje kros-korelaciju efektivne infiltracije i isticanja karstnog vrela Perućac za sušnu i vlažnu godinu, kao i za celokupni period osmatranja. Kros-korelogram pokazuje pozitivnu asimetriju korelacije u svim slučajevima, što ukazuje na očigledan uticaj efektivne infiltracije na izdašnost vrela. Zakašnjenje reakcije vrela u odnosu na prihranjivanje je 2 dana za sušnu, odnosno 3 dana za vlažnu godinu. Brža reakcija sistema u sušnoj godini najverovatnije je posledica ispražnjenosti sistema, tako da se voda brže infiltrira kroz kanale, dok u vlažnoj godini reakcija kasni dodatni dan kao posledica tzv. *buffer* efekta, kada veća količina vode koja je već u sistemu amortizuje nailazak novoinfiltrirane vode, najverovatnije kroz epikarstnu zonu. Posmatrajući celokupni period, reakcija sistema je 2 dana.

Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0.2 (Mangin, 1984; Ristić Vakanjac, 2015), statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 8 dana, u vlažnoj 14 dana, tj. 15 dana za ceo period osmatranja, što pokazuje na vreme reakcije slivnog područja na intenzivnu kišnu epizodu.



Sl. 6.14. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Perućac za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

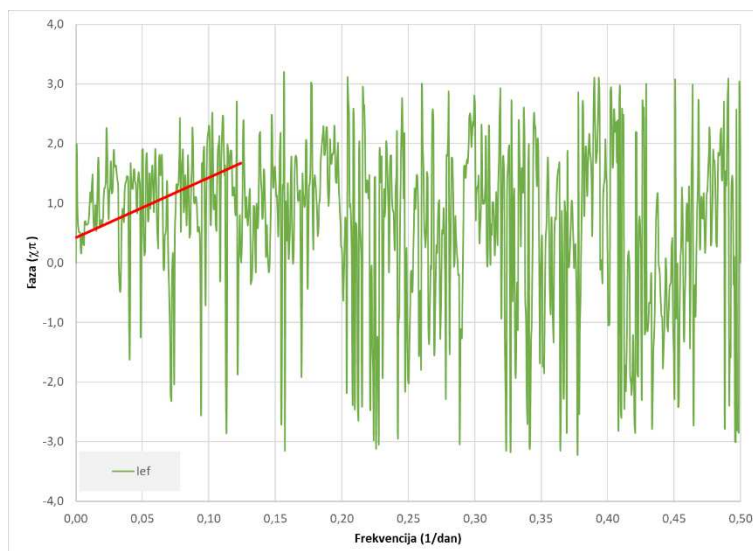
Kros-amplitudna funkcija (Sl. 6.15) pokazuje stepen filtriranja impulsnog signala od strane karstnog sistema Perućac, što se na dijagramu može videti u zoni srednjih frekvencija. Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,20 \text{ dan}^{-1}$ (5 dana), što ukazuje na mogućnost amortizacije efektivnih infiltracija i njihovu akumulaciju u sistemu kao rezerve. Pik koji se javlja u srednjefrekventnom opsegu i koji odgovara direktnom oticaju iznosi 0,099124, što ukazuje na period od 10,08 dana. Ovaj broj dana ukazuje na reakciju direktnog oticaja na efektivnu infiltraciju i skoro je identičan broju dana koji je pokazala spektralna funkcija gustine direktnog oticaja, odnosno kros-korelacija.



Sl. 6.15. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Perućac za period 2015 – 2020. godina

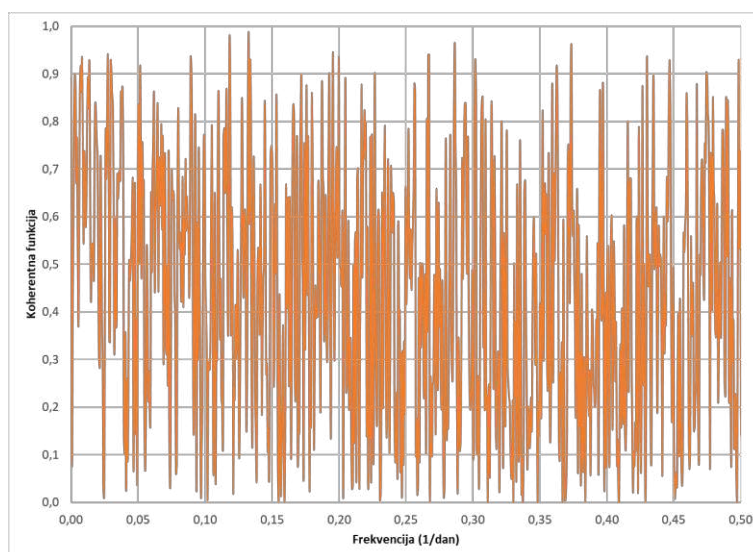
Sa druge strane, pikovi u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, tako da se mogu uočiti pikovi od 0,002738, 0,008215, 0,009858, 0,019168 i 0,051479 koje odgovaraju periodima od 365 dana (godišnji ciklus), 121 dana (4-mesečni ciklus), 104 dan (tromesečni ciklus), 52 dana (dvomesečni) i 19 dana (mesečni ciklus). Slične vrednosti se mogu uočiti i pri spektralnoj analizi efektivne infiltracije (Sl. 6.15), što ukazuje na to da karstni sistem Perućac ima značajnu moć transformacije ulaznog signala u izlazni.

Fazna funkcija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Perućac prikazana je na sl. 6.16, koja pokazuje nesortiranost i nekoherentnost pri srednjim i visokim frekvencijama, dok se izvestan pozitivan linearni trend javlja pri niskim frekvencijama. Pozitivni trend aproksimiran je crvenom linijom, tako da obuhvata frekventni opseg od 0 do 0.125411, što odgovara periodu od 7.97 dana. Drugim rečima, period od 7.97 (tj. 8) dana odgovara periodu kašnjenja odziva sistema na impulsni signal, što se slaže sa rezultatima dobijenim kros-korelacionom analizom.



Sl. 6.16. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Perućac za period 2015-2020

Koherentna funkcija isticanja karstnog sistema vrela Perućac, prikazana na sl. 6.17, ukazuje na izrazito nelinearan karakter karstnog sistema, tako da je srednja koherentna vrednost 0.44, što ukazuje na značajnu akumulativnu sposobnost i dobro strukturiran i karstifikovan karstni sistem Perućca. S tim u vidu, može se zaključiti da sistem sadrži značajne rezerve vode, koje velikim delom na vrelu ističu u vidu baznog oticaja, što takođe potvrđuje i visok indeks baznog oticaja (0,893) sračunat primenom EWMA filtera. Takođe, uočava se i značajan pad koherentnih vrednosti u frekventnom opsegu od 0,11 dan⁻¹ (tj. 9 dana), što odgovara uticaju direktnog oticaja na ukupni sistem, a što je takođe saglasno sa rezultatima prethodnih analiza.

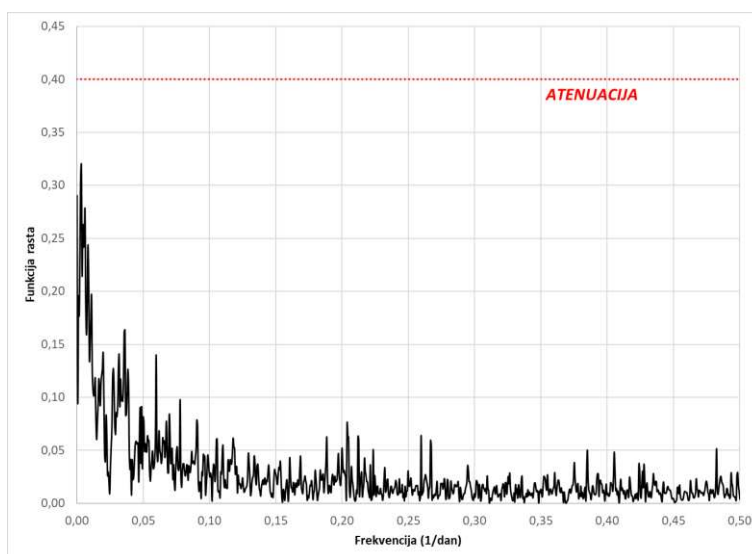


Sl. 6.17. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Perućac za period 2015-2020

Koherentna funkcija ističe dominantnu ulogu baznog oticaja, što na prvi pogled može delovati kontradiktorno sa dominacijom direktnog oticaja koji je rezultat spektralnih analiza. Međutim,

koherentna funkcija ukazuje na dominaciju baznog oticaja u rezervama podzemnih voda, što je svakako slučaj sa vrelom Perućac, dok spektralne funkcije iskazuju dominaciju direktnog oticaja na pikove izdašnosti i izgled hidrograma vrela.

Sl. 6.18 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Perućac, pokazujući da su sve vrednosti funkcije ispod 1, i potvrđujući dominantnu ulogu baznog oticaja, što je posledica dobrog akumulativnog kapaciteta karstnog sistema vrela Perućac. Dijagram takođe pokazuje vrednosti funkcije rasta ispod 0,4, što je prag koji definiše uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, nakon čega karstni sistem u potpunosti vrši atenuaciju ulaznog signala i formira bazni oticaj (Padilla & Pulido-Bosch 1995). Naime, sa dijagrama funkcije rasta jasno je da karstni sistem vrela Perućac vrši potpunu atenuaciju efektivne infiltracije, formirajući značajne rezerve u sistemu.



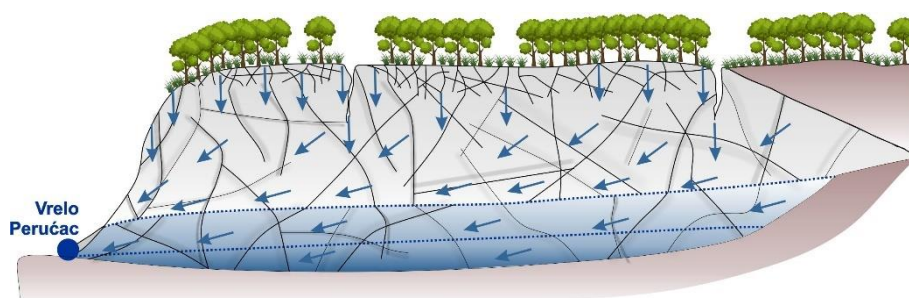
Sl. 6.18. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema Perućac za period 2015-2020

Na osnovu izvršenih analiza, može se zaključiti da je karstni sistem vrela Perućac dobro hijerarhijski strukturiran. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 1217,8 mm na područjima sa vegetacijom, do 1506,4 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 806,5 mm. Potencijalna evapotranspiracija iznosi 669,8 mm prosečno za isti period osmatranja, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 446,9 mm do 474,1 mm na prostoru bez vegetacije. Drugim rečima, prosečna vrednost stvarne evapotranspiracije izražena u procentima u odnosu na korigovanu kišu i sneg iznosi 31,5% na području bez vegetacije, tj. 36,7% na prostoru sa vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,88, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 36%, što znači da efektivna infiltracija iznosi prosečno 64% (68,7% na prostoru vez vegetacije, tj. 63,7% na prostoru sa vegetacijom).

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 0,96 m³/s do 5,17 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 1,64 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 3,64 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 0,96 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti tri mikrorežima pražnjenja, od kojih se prvi najčešće dešava u turbulentnom (β) režimu, dok se ostali mikrorežimi javljaju u laminarnom (α) režimu. Prosečna zapremina istekle vode iznosi nešto više od 11 x 10⁶ x m³/s. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema EWMA filteru iznosi 1,59 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 89,3% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Rezultati korelacionih i (kros)spektralnih funkcija u potpunosti su u saglasnosti sa rezultatima prethodnih analiza vremenskih serija karstnog sistema vrela Perućac (Jemcov, 2008). Na osnovu rezultata analize vremenskih serija mogu se izvući zaključci o mehanizmu funkcionisanja karstnog sistema vrela Perućac, koji se može vizuelno predstaviti konceptualnim modelom na sl. 6.19. Naime, jasan je uticaj efektivne infiltracije na karstni sistem u smislu da se novoinfiltrirana voda ne javlja momentalno na vrelu, već izaziva povećanje hidrostatičkog pritiska nakon 2, odnosno 3 dana u zavisnosti od trenutnog hidrološkog stanja, tako da se povećava izdašnost vrela na račun vode koja je već bila u sistemu (piston efekat), a novoinfiltrirana voda biva „utrošena“ na popunjavanje rezervi sistema. Takođe, uticaj epikarsta može uzrokovati amortizaciju, tj. zakašnjenje reakcije sistema na intenzivnu kišnu epizodu. Dominacija baznog oticaja u formiranju rezervi podzemnih voda i ukupnog oticaja je očigledna, budući da indeks baznog oticaja je veoma visok (0,893). Ipak, ulazni impuls u vidu efektivne infiltracije ima značajan udeo u formiranju izgleda hidrograma vrela.

Na osnovu recesione analize, može se zaključiti da sistem vrela Perućac ima predisponirane pravce kretanja i isticanja podzemnih voda krupnim karstnim kanalima, budući da se prvi mikrorežimi pražnjenja najčešće dešavaju u turbulentnom režimu tečenja, te zapravo predstavljaju β režim. Analizom kritične vrednosti efektivne infiltracije koja nakon recesije izaziva povećanje izdašnosti, ustanovljeno je da svega 0,6% infiltrirane vode nakon recesije ističe na vrelu u istom periodu, a da se ostatak zapremine novoinfiltrirane vode utroši na formiranje rezervi podzemnih voda u sistemu.



Slika 6.23 Konceptualni model karstnog sistema vrela Perućac (prema Jemcovu, 2008, modifikovano)

Laminarni režim isticanja baznog oticaja dešava se pri vrednostima izdašnosti koje su generalno manje od $1,83 \text{ m}^3/\text{s}$, što predstavlja vrednost Q_{40} . Pri vrednostima većim od pomenute, može se očekivati promena hidrauličkog režima tečenja, odnosno promena cirkulacije podzemnih voda iz laminarnog u turbulentni režim. Period koji je potreban sistemu da se napuni nakon recesionog perioda može se videti na autokorelacionom dijagramu vlažne godine i ukupnog perioda razmatranja. Na dijagramu 6.9 i 6.11 uočava se povećanje koeficijenta autokorelacije nakon 60 dana, tako da koeficijenti ponovo dobijaju statističku značajnost, što može ukazivati na popunjavanje rezervi sistema.

6.1.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac izvršena je uzorkovanjem i kompletnim hemijskim analizama karstnih podzemnih voda vrela Perućac u periodu 2016 – 2017. godina (prema podacima I. Jemcova). Podzemna voda na vrelu je uzorkovana aprila, juna i oktobra 2016. godine i februara 2017. godine, čime su pokrivena sva 4 godišnja doba, tj. hidrološka stanja.

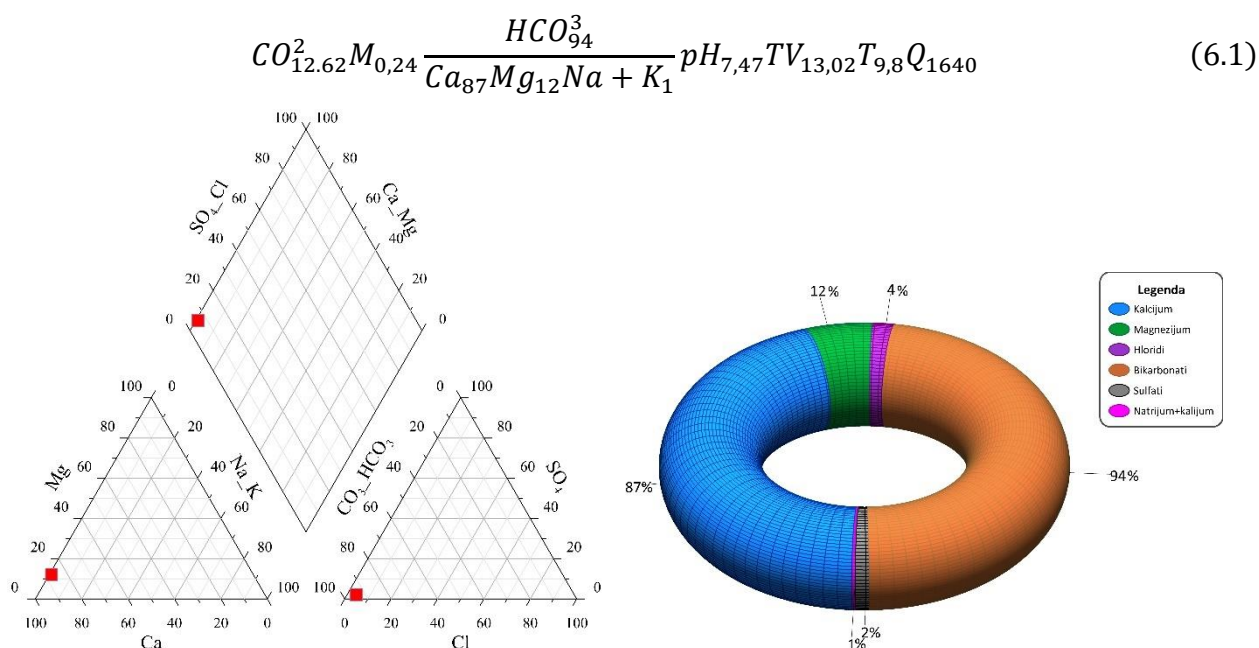
Na osnovu hemijskih analiza može se videti da su podzemne vode karstnog sistema vrela Perućac izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, budući da su svi hemijski parametri u svim

kompletnim analizama ispod maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK). Čak i mutnoća je u tri analize ispod praga detekcije, iako ovaj hemijski parametar najčešće prelazi MDK, i to u uslovima naglog povećanja izdašnosti vrela, kada se pokreće suspendovani materijal nataložen na dnu karstnih kanala. Vrlo verovatno je povećanje mutnoće u ovim uslovima prisutno i na vrelu Perućac, ali nije detektovano sezonskim analizama. Jedini parametar koji se približio MDK je utrošak $KMnO_4$ u analizi iz juna 2016. god, kada je vrednost bila 7,59 mg/l (MDK = 8 mg/l).

Mikrobiološke analize ukazuju na čestu bakteriološku neispravnost vode, budući da je u tri analize (prolećna, letnja i jesenja) zabeležen povećan broj mezofilnih, ukupnih koliformnih i koliformnih bakterija fekalnog porekla, što može ukazivati na antropogeno zagađenje sa površine terena (Stevanović, 2015a) ili na neadekvatan odabir lokacije uzorkovanja (Vasić et al. 2013; 2015; Milanović et al. 2012).

Režim hemijskih parametara podzemnih voda vrela Perućac ne oscilira mnogo tokom godine, te se može zaključiti da je kvalitet podzemnih voda ovog sistema postojan. Tako, temperatura vode oscilira od 8,1 do 10,6°C, specifična provodljivost od 412 do 583 $\mu S/cm$, pH vrednost od 7,34 do 7,72, a tvrdoća od 11,54 do 14,41°dH. Mineralizaciju podzemnih voda Perućca varira od 235,05 mg/l do 242,51 mg/l, što ukazuje na srednju vrednost mineralizacije u periodu osmatranja od 239,92 mg/l.

Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (251,13 – 270,66 mg/l ili prosečno 94%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 75,07 do 87,2 mg/l, tj. prosečno 87%ekv. Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Perućac, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2016-2017, dat je na Pajperovom dijagramu i kružnom dijagramu hemijskog sastava (sl. 6.24), kao i formulom Kurlova (6.6).



Sl. 6.20. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (prema I. Jemcov)

Na osnovu kompletnih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac, koje su izvršene u periodu 2016-2017 godine, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim dosta tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom neispravnošću usled pojave mezofilnih i koliformnih fekalnih bakterija.

Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu vrela Perućac, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 2.

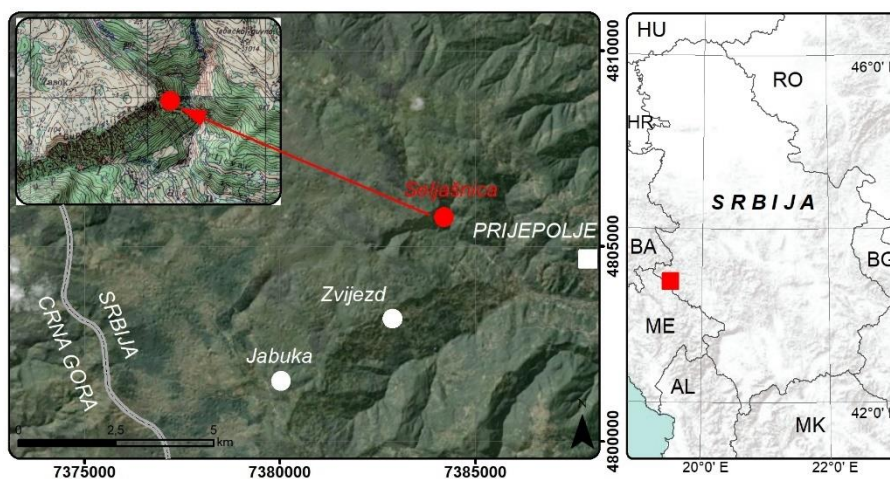
6.2 Karstni hidrogeološki sistem vrela Seljašnica

Karstni hidrogeološki sistem vrela Seljašnica bio je predmet regionalnih hidrogeoloških istraživanja u nekoliko navrata, ali tek poslednjih godina intenzivirana su detaljna hidrogeološka istraživanja ovog sistema, iako je vrelo Seljašnice kaptirano za vodosnabdevanje Prijepolja pre nešto više od 30 godina. Tokom regionalnih istraživanja, Komatina et al. (1977), Krešić (1982; 1984; 1987), Stevanović (1995) i Filipović et al. (2005) daju generalni prikaz hidrogeoloških karakteristika ovog sistema i karstnog platoa Babine. Hidrogeološka istraživanja lokalnog karaktera izvode Krmpotić & Dragišić (2006), Stevanović et al. (2018; 2020a), Marinović & Petrović (2018a; 2018b), Marinović et al. (2019), Petrović et al. (2021). Podaci svih prethodnih istraživanja iskorišćeni su kao polazna osnova analiza koje su izvršene u okviru doktorske disertacije.

6.2.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Seljašnice nalazi se u jugozapadnom delu Srbije, oko 6,5 km jugozapadno od Prijepolja. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Unutrašnjim Dinaridima zapadne Srbije, a vrelo Seljašnice predstavlja i najistočniju lokaciju isticanja podzemnih voda koje se generišu u okviru karstnog platoa Babine (Sl. 6.21).

Najveće naseljeno mesto u ovom delu Srbije je Prijepolje, za čije stanovništvo je kaptirano vrelo Seljašnice. Prijepolje je administrativni centar opštine koja prema popisu iz 2011. godine ima oko 37 059 stanovnika (RZSS, 2012). Za šire područje, izvan sliva sistema Seljašnice, vezan je veliki broj zaštićenih prirodnih dobara i kulturno-istorijskih spomenika – Manastir Mileševa, slapovi Sopotnice, Kamena gora i dr.



Sl. 6.21. Geografski položaj vrela Seljašnice (crvena boja) na karti Srbije i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Prijepolje T578-1-1

Prijepolje i njegova okolina, dobro su povezani asfaltnim saobraćajnicama sa susednim naseljima Srbije i Crne Gore. Neposredno preko istražnog područja, zapadno od Prijepolja vodi asfaltni put dolinom reke Seljašnice, preko planinske zaravni Babine (Jabuke) prema Pljevljima u Crnoj Gori. U blizini istražnog područja nalazi se i pruga Beograd-Bar. Do samog vrela moguće je stići polučasovnim hodom od manastira Seljani, posvećenom Uspenju Presvete Bogorodice, do koga se stiže asfaltnim putem od naselja Kolovrat ka selu Babine, preko planine Zvijezd.

Stanovništvo ovog područja tradicionalno se, pored poljoprivrede bavi i preradom drveta i proizvodnjom građevinskog materijala.

6.2.2 Klimatske karakteristike

Klimatske karakteristike slivnog područja vrela Seljašnice direktno su zavisne od planinskih masiva koji okružuju sliv vrela, kao i relativne blizine Jadranskog mora. Slivno područje karakteristično je po mešanju tipične planinske i alpske klime, koja je česta na nadmorskim visinama iznad 1000 i 1800 m, i kontinentalne i župske klime na nižim nadmorskim visinama.

Klimatski režim ovog područja analiziran je na osnovu podataka o padavinama, temperaturi vazduha, visini snežnog pokrivača i brzini i pravcima vetra sa klimatološke stanice Sjenica za period 2015 – 2020 god, budući da se za ovaj period raspoložuje podacima o isticanju podzemnih voda na vrelu Seljašnice. Ova stanica prema svojoj nadmorskoj visini odgovara nadmorskoj visini karstnog platoa Babine, odnosno oblasti prihranjivanja karstnog sistema.

U tabeli 6.9 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Sjenica.

Tabela 6.9. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Sjenica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (RHMZ, prikupljeno sa meteomanz.com)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	59,6	77,4	79,9	65,2	41,4	78,1	28,8	75,1	43,7	108,5	73,4	3,4	734,5
2016	62,8	62,2	142,3	31,6	118,2	90,4	58,2	139,7	91,1	96,6	121,7	15,5	1030,3
2017	34	45,2	34,6	53,7	64,4	62,3	70,8	19,3	31,9	97,1	35,6	105	653,7
2018	42,5	103	125,5	28,5	110	165,6	195,6	54,1	18,8	25,5	75,9	48,9	993,8
2019	66,4	37,7	31,8	57,7	84,4	126,8	89,1	9,3	52,6	24,8	85,1	48	713,7
2020	19,4	37,1	54	42,1	67,4	112,9	74,4	265	52,8	80,6	7,5	94,3	907,5
Pr.	47,5	60,4	78,0	46,5	81,0	106,0	86,2	93,8	48,5	72,2	66,5	52,5	838,9

Iz tabele 6.9 može se uočiti da je mesec sa najvećom sumom padavina bio avgust 2020. godine sa 265 mm pale kiše, dok je mesec sa minimalnom vrednošću pale kiše decembar 2015. godine sa svega 3,4 mm kiše, što je donekle i logično uzimajući u obzir snežne padavine koje su dominantne na području Sjenice u zimskom periodu. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 653,7 mm 2017. godine do 1030,3 mm, koliko je ukupno palo 2016. godine. Prosečna suma padavina koja u periodu 2015 – 2020 mesečno padne na prostor stanice Sjenica iznosi 69,9 mm, dok je prosečna godišnja suma padavina 838,9 mm/god.

U tabeli 6.10 dat je prikaz maksimalnih mesečnih, srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnja suma palog snega za period 2015 – 2020 godina sa stanice Sjenica. Iz tabele 6.10 može se uočiti da je mesec sa maksimalnom visinom ukupnog snega bio mart 2015. godine sa 46 cm. Može se primetiti da na području Sjenice, čak i u maju može doći do snežnih padavina, kao što je bio slučaj 2016. i 2019. god, kada je zabeleženo 1, tj. 2 cm snega. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom novembra i decembra, mada se sneg može javiti i ranije, u oktobru, kao što je bio slučaj 2017. godine.

Može se zaključiti da se snežne padavine javljaju u talasu od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u januaru. Srednjegodišnje vrednosti visine ukupnog snega za stanicu Sjenica za period 2015 – 2020 godina variraju od 9,1 cm 2016. godine do 31,3 cm, koliko je iznosila visina ukupnog snežnog pokrivača 2019. godine, dok je prosečna srednjegodišnja

vrednost za period 2015 – 2020. godina 19,7 cm ukupnog snega, uz napomenu da je proračun srednjegodišnjih vrednosti palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.10. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Sjenica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (prema podacima RHMZ, prikupljeno sa meteomanz.com)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	38	30	46	19	0	0	0	0	0	0	19	14	27,7
2016	18	8	14	1	1	0	0	0	0	0	5	17	9,1
2017	27	22	6	9	0	0	0	0	0	8	9	19	14,3
2018	18	21	31	1	0	0	0	0	0	0	12	23	17,7
2019	42	29	28	0	2	0	0	0	0	0	0	26	31,3
2020	23	24	16	10	0	0	0	0	0	0	7	30	18,3
Prosek	27,7	22,3	23,5	6,7	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	21,5	19,7

Tabela 6.11 prikazuje mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Sjenica. Uočava se da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 18,5°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -10,1°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 7,5°C 2015. godine do 8,7°C, koliko je bilo 2018. godine, da bi prosečna višegodišnja vrednost temperature vazduha iznosila 8,2°C.

Tabela 6.11. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Sjenica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (RHMZ, prikupljeno sa meteomanz.com)

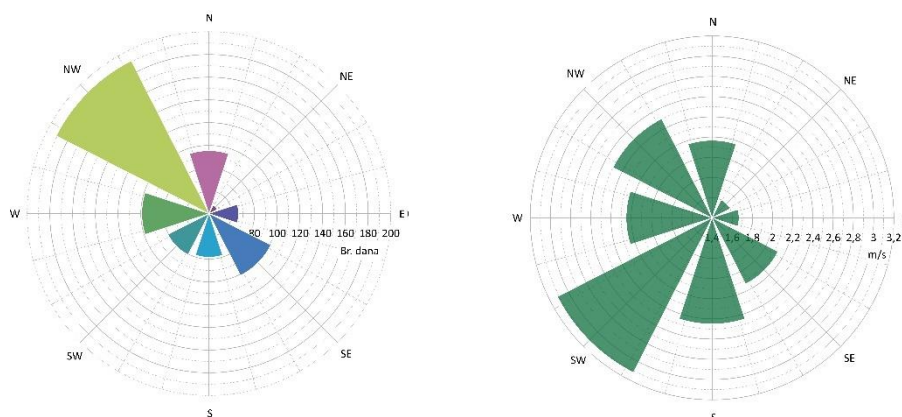
God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Pr.
2015	-7,6	-2,4	1,8	5,5	12,5	14,3	18,5	18,2	15,1	9,3	4,9	-0,4	7,5
2016	-2,3	4,9	3,3	10,1	10,2	16,3	17,7	16,3	13,4	8,8	4,3	-2,6	8,4
2017	-10,1	1,9	5,1	6,3	11,4	16,6	17,5	18,2	13,7	8,3	3,0	0,2	7,7
2018	-0,3	-0,2	2,9	11,2	13,5	15,4	17,3	18,1	13,7	10,0	5,5	-2,3	8,7
2019	-4,5	-0,9	4,4	8,1	9,7	17,1	16,8	18,1	13,9	10,5	8,0	1,4	8,6
2020	-4,6	1,6	3,3	6,3	11,6	14,2	16,7	17,8	15,1	9,5	5,2	2,3	8,3
Prosek	-4,9	0,8	3,5	7,9	0,0	15,6	17,4	17,8	14,1	0,0	5,1	-0,2	8,2

Tabela 6.12 i sl. 6.22 prikazuju vrednosti čestine pravaca i brzine vetra u periodu 2015-2020. godine prikupljene sa klimatološke stanice Sjenica, sa koje se vidi da je najučestaliji vetar pravac severozapad-jugoistok, dok sa jugozapada duva najintenzivniji vetar.

Tabela 6.12. Učestalost pravaca i brzine vetrova prema pravcima vetrova u (m/s) osmatranih na stanici Sjenica u periodu 2015 – 2020. godina (RHMZ). Legenda: N - sever, NE - severoistok, E - istok, SE - jugoistok, SW - jugozapada, W - zapad, NW - severozapad, B – brzina vetra (u m/s), Č – čestina vetra

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B
2015	89	2	56	1,6	65	1,8	83	2,1	54	2,1	78	3,2	104	2,2	191	2,5
2016	99	2,2	34	1,4	61	1,7	97	2	91	2,2	108	3,2	125	2,1	186	2,4

2017	86	2	41	1,6	55	1,5	87	2	82	2,7	88	3,3	111	2,2	222	2,6
2018	94	2,2	49	1,8	71	1,7	108	2,2	72	2,5	75	3	77	2,6	178	2,4
2019	103	2,5	68	1,7	82	1,8	110	2,2	79	2,6	64	2,8	87	2,2	175	2,5
2020	101	2,1	40	1,5	62	1,5	121	2,3	92	2,6	70	3,2	91	2,2	193	2,6
Prosek	95,3	2,2	48,0	1,6	66,0	1,7	101,0	2,1	78,3	2,5	80,5	3,1	99,2	2,3	190,8	2,5



Sl. 6.22. Ruža vetrova (levo) i brzine vazdušnih strujanja (desno) za područje meteorološke stanice Sjenica u periodu 2015-2020 (prema podacima RHMZ)

6.2.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

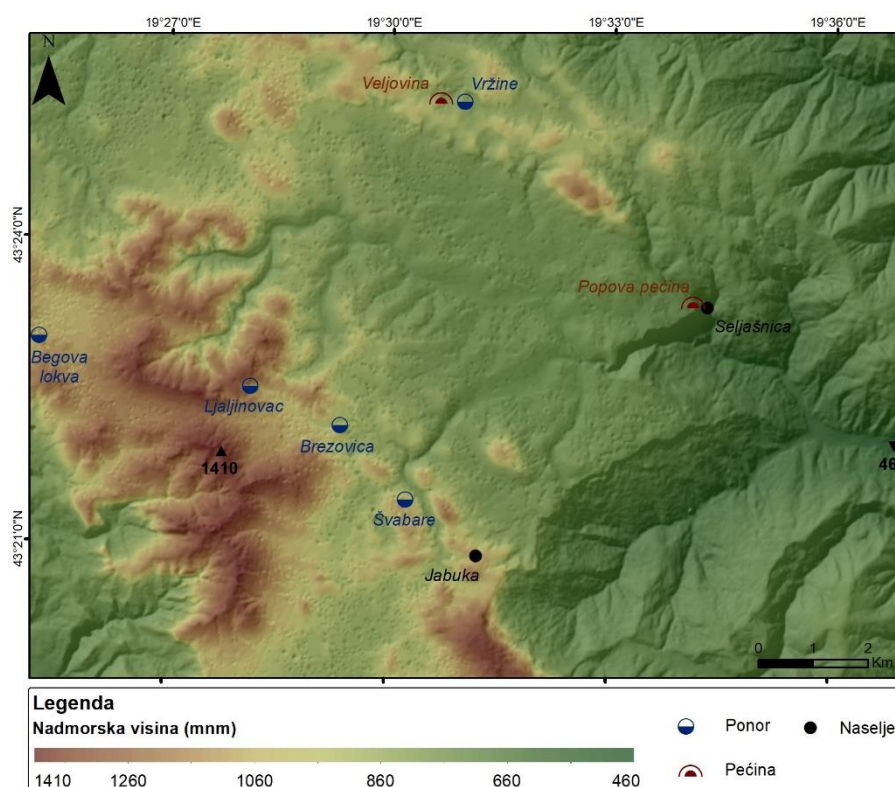
Karstni plato Babine, na kome se nalazi najveći deo slivne površine karstnog vrela Seljašnice odlikuje se odsustvom rečne mreže, što ukazuje na dobru razvijenost karstnog geomorfološkog procesa. Analiza obuhvata i nekarstne delove terena koji potencijalno mogu kontribuirati bilansu karstnog sistema Seljašnice u vidu alogenih delova sliva. Površinski rečni tokovi se najvećim delom nalaze na istočnom delu istražnog područja, na kome su rasprostranjene paleozojske geološke formacije, jurski ofiolitski melanž i magmatske i metarmorfne stene. Dakle, reč je o drenažnoj mreži formiranoj na nekarstnim delovima terena, koji su van slivnog područja vrela Seljašnice. Jedini površinski tok koji se nalazi u slivnom području je Švabare, koji ponire na platou i čija je veza sa vrelom Seljašnice potvrđena opitom trasiranja (Stevanović et al. 2018; 2020a). Severni delovi terena izgrađeni su od andezita čije južne padine ulaze u slivno područje. Seljašnice kao alogeni deo sliva. Na ovom terenu formirani su povremeni površinski tokovi Dubljanska reka i potok Županjac. Na zapadnom delu karstnog platoa nalazi se tok Tmuša koji pripada slivu vrela Bučje, budući da je takođe potvrđena veza ove dve lokacije opitom trasiranja (Krešić, 1984).

6.2.4 Geomorfološke karakteristike

Šire istražno područje, u morfološkom pogledu, pripada središnjem delu donjeg Polimlja koga uokviruju planinski vrhovi Kamene Gore (1842 mnm) na zapadu i Zlatara (1627 mnm) na istoku. Neposredno područje istraživanja karakterišu dve izražene morfološke celine – karstna površ Babine i dolina Lima, što se može uočiti na digitalnom elevacionom modelu šireg istražnog područja (Sl. 6.23).

Najveći deo slivnog područja karstnog vrela Seljašnice pripada karstnom platou ili površi Babine. Karstna površ Babine, koja je geomorfološki paleofluvijalnog porekla, ima rasprostranjenje zapadno od vrela Seljašnice, te se stoga, osim u Srbiji, produžava i u Crnoj Gori, što ukazuje na međugranični karakter izdani formirane u okviru ovog platoa (Stevanović, 1995; Stevanović et al. 2020a). Među površinskim pojavama zapažaju se dobro skaršćene i dezintegrisane rečne doline, predisponirane rasednim strukturama koje su znatno ubrzale

proces karstifikacije. Dve najveće skaršćene karstne doline su iznad vrela Seljašnice i dugačka suva dolina u zaleđu vrela Bezdan u Crnoj Gori u neposrednoj blizini Pljevalja. Neposredno iznad vrela Seljašnice nalazi se i Popova pećina, koja je u prethodnom evolutivnom ciklusu karstnog sistema vrela Seljašnice bila vrlo verovatno tačka isticanja i koja se sada aktivira samo u slučaju podizanja nivoa karstnih podzemnih voda. Među površinskim karstnim oblicima ističu se brojne vrtače i uvale na karstnom platou Babine, koje mogu imati ulogu u prihranjivanju karstnog sistema Seljašnice. Gustina vrtača na slivnom području vrela Seljašnica je $18,17/\text{km}^2$ (Sl. 6.23), ukazujući na visok stepen skaršćenosti terena. Na slivnom području locirana je i pećina Veljovina, kao i nekoliko ponora od kojih je najznačajniji ponor Švabare. Na širem istražnom prostoru nalazi se ponor Begova lokva sa direktnom vezom sa vrelom Bezdan u Crnoj Gori (Radulović M. 1996), ponori Ljaljinovac, Brezovica, Vržine i Tmuša u selu Krnjača.



Sl. 6.23. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Seljašnice sa prikazanim karakterističnim površinskim i podzemnim karstnim geomorfološkim pojavama – ponorima i pećinama, dok su brojne vrtače uočljive u vidu sivih tačaka

6.2.5 Geološke karakteristike

Na širem istražnom području nalaze se magmatske, metamorfne i sedimentne stene stvarane od paleozoika do kvartara. Najstarije stene predstavljene su slabometamorfisanom serijom devona i karbona, izgrađenim od filitičnih škriljaca, liskunovitih i kvarcnih peščara sa proslojcima peskovitih krečnjaka i konglomerata. Na nekoliko lokacija, stene karbonske starosti su probijene mlađim andezitima trijaskne starosti (Čadinje, Babine, Seljane). Prelaz ka mezozoiku je postepen, tako da postoji neraščlanjeni kompleks permotrijasa, izgrađen od peščara, škriljaca i alevrolita (Mirković et al. 1980).

Mezozojske (trijaskne i jurske) stene zauzimaju najveću površinu na istražnom području. Na širem istražnom području srednji trijas (T_2) je predstavljen karstifikovanim bankovitim i masivnim krečnjacima, debljine oko 400 m (Mirković et al. 1980). Gornji trijas (T_3) je

predstavljen karstifikovanim sprudnim krečnjacima, debljine oko 400 m. U srednjem trijasu je bila značajna vulkanska aktivnost, koja je rezultirala izlivanjem dacita ($\alpha\alpha q$), andezita (α) i keratofira (η). Jurske tvorevine predstavljene su lijaskim (J_1) slojevitim krečnjacima, dogermalmskim ($J_{2,3}$) ofiolitskim melanžom izgrađenim pretežno od dijabaza ($\beta\beta$) i ređe serpentinita (Se) (Mirković et al. 1980), odnosno gornjojurskim (J_3) peščarima, rožnacima i glincima.

Miocenski sedimenti (M) locirani su u okolini Pljevalja, a sačinjeni su od gline, laporaca i uglja (lignita), gradeći Pljevaljski ugljonosni basen. Kao najmlađe tvorevine figurišu kvartarni (Q) sedimenti u vidu tankih aluvijalnih sedimenata u dolini Seljašničke reke i Lima, dok se na krečnjačkim liticama mogu formirati siparskih sedimenti male debljine.

Prema tektonskim karakteristikama, Krešić (1984) navodi nagib karstne površi Babina ka vrelu Seljašnice, gde zapravo blok Seljašnice predstavlja erozioni bazis za najveći deo podzemnih voda površi.

6.2.6 Hidrogeološke karakteristike

Prema hidrogeološkim karakteristikama, na širem istražnom prostoru mogu se izdvojiti zbijeni tip izdani, formiran u aluvijalnim nanosima Seljašničke reke i Lima, pukotinski tip izdani formiran u vulkanitima srednjetrijaske starosti i karstni tip izdani, formiran u karbonatima srednje- i gornjotrijaske starosti (Prilog 3).

Karstni tip izdani je najznačajniji na širem istražnom prostoru, budući da akumulira najveće količine podzemnih voda. Karstna površ Babine drenira se na zapadnim, severnim i istočnim delovima na vrelima Breznica (Crna Gora), Bučje i Seljašnica (Srbija).

Najsnažnije vrelo karstne površi Babine predstavljaju vrela Seljašnice (Sl. 6.24). Karstni sistem vrela Seljašnice formiran je u okviru trijaskih krečnjaka, čija debljina varira od 150 do 750 m (Stevanović et al. 2018; 2020a; Marinović et al. 2019). Mehanizam isticanja vrela uslovio je proboj andezita trijaske starosti, dok podinu krečnjaka čine karbonske formacije u vidu peščara i argilofilita. Zonu isticanja zapravo čine dve pojave na različitim hipsometrijskim visinama, koje dreniraju pripadajuće dominantne karstne kanale, koji su na različitim kotama. Stoga, pretpostavka je da hidraulički mehanizam isticanja obuhvata dva ciklusa pražnjenja u recesionim uslovima, u zavisnosti od toga da li je i viši ili samo niži kanal aktivan (Marinović & Petrović, 2018a; 2018b; Stevanović et al. 2020a).



Sl. 6.24. Vrelo Seljašnice – kaptaza donjeg vrela (levo); Isticanje podzemnih voda na gornjem vrelu u maksimumu (desno)

Prihranjivanje karstnog sistema vrela Seljašnice najvećim delom se vrši direktno difuzno preko otvorenih krečnjačkih stena na karstnom platou Babina i koncentrisano (punktuelno) poniranjem površinskih voda, dok se u manjem procentu prihranjivanje vrši alogeno doticajem sa terena izgrađenih od jurskih ofiolita i trijaskih andezita. Generalni pravac cirkulacije je od

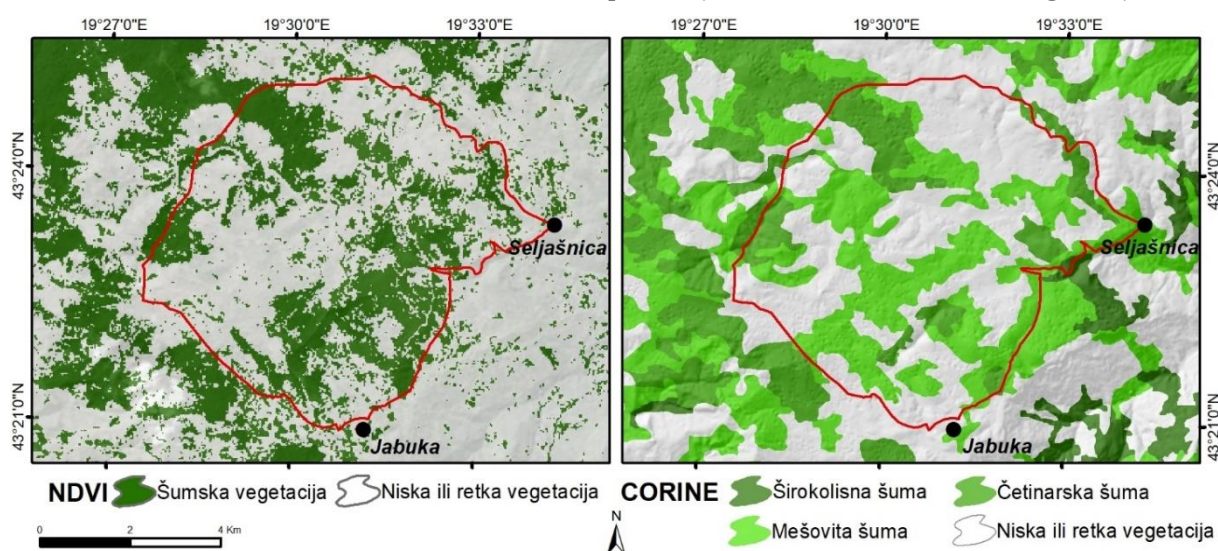
zapada ka istoku, tako da voda gravitira ka vrelu Seljašnice, što je potvrđeno opitom obeležavanja izdanskog toga, kojim je dokazana veza ponora Švabare sa vrelom Seljašnica, uz proračun fiktivne brzine od $v_f = 3.14 \text{ cm/s}$ (Stevanović et al. 2018; 2020a).

Vrelo Seljašnice je kaptirano za vodosnabdevanje Prijepolja, sa prosečnim godišnjim zahvatanjem voda $Q_{\text{expl}} = 156,68 \text{ l/s}$ (Stevanović et al. 2020a). Prethodna istraživanja su pokazala da ukupna izdašnost vrela Seljašnice varira od $0,145 \text{ m}^3/\text{s}$ do $7,0 \text{ m}^3/\text{s}$, sa prosečnom godišnjom izdašnošću od $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Marinović et al. 2019). Površina sliva vrela Seljašnice ocenjena je na 57 km^2 , dok je vrednost efektivne infiltracije procenjena na 40%, a gubitaka na evapotranspiraciju 60% (Stevanović et al. 2020a). Bilansiranjem padavina u vidu kiše i snega sa vrednostima istekle vode u periodu 2015-2020 godina, dobijene su skoro iste vrednosti gubitaka (45%) i efektivne infiltracije (55%), uz nešto manju površinu sliva, koja iznosi 42 km^2 . Manja površina sliva rezultat je veće količine vode koja je korišćena pri proračunu efektivne infiltracije. Veća količina vode, kao ulaza u sistem, dobijena je korekcijom kiše i preračunavanjem snega u vodeni ekvivalent za prostor Sjenice. Područje Sjenice i Pešterske visoravni je poznato u Srbiji kao mesto sa najnižom temperaturom vazduha, veoma hladnim zimama i visokim snežnim pokrivačem. Vrlo je verovatno da bi podaci sa klimatološke stanice koja bi bila locirana na platou Babine dali reprezentativnije klimatske podatke, a samim tim bi i rezultati efektivne infiltracije i površine slive bili reprezentativniji. S tim u vezi, proračunatu površinu sliva vrela Seljašnice od 42 km^2 treba ipak shvatiti uslovno, tj. da se ona odnosi na prosečnu vrednost tokom perioda osmatranja 2015-2020. godine, dobijenu na osnovu podataka sa klimatološke stanice Sjenica i da površina sliva oscilira tokom hidrološke godine.

6.2.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Seljašnica

6.2.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Za područje vrela Seljašnice, odnosno njenog slivnog područja na karstnom platou Babine, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 40% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 50% sliva (Sl. 6.25). Stoga, za finalni vegetacioni indeks uzeta je u obzir aritmetička sredina ove dve vrednosti, te je indeks procenjen na 0,45, što bi značilo da je finalna vrednost efektivne infiltracije sačinjena od 45% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 55% viška vode dolazi sa otvorenih područja sa niskom ili retkom vegetacijom.



Sl. 6.25. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju (prema podacima USGS, snimak zabeležen 3. avgusta 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Seljašnica prikazana je crvenom linijom

Kalibracijom je ustanovljeno da, uz korišćenje vegetacionog indeksa od 0,45 i površine sliva od 42 km², maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje Seljašnice iznosi 175 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Najveći deficit vlage u zemljištu tokom letnjih meseci, dok se najmanji deficit ostvaruje tokom prolećnih meseci, kada dolazi do obilnih kišnih padavina i otapanja snežnog pokrivača.

Tabela 6.13 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabela 6.9-6.12), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu. Takođe, date su i procentualne vrednosti parametara evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

*Tabela 6.13. Uporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Sjenica, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Seljašnice za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrele Seljašnice*

Parametar	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	981,8	650,0	1081,0	706,1	883,0	860,4
PgSWE (mm)	1376,1	991,0	1448,6	984,1	1418,7	1243,7
PgiSWE (mm)	1199,6	770,4	1219,4	778,1	1225,6	1038,6
PET (mm)	634,5	619,9	646,9	622,0	629,1	630,5
PET/Pbruto (%)	64,6	95,4	59,8	88,1	71,2	73,3
AETg (mm)	562,0	476,3	567,1	490,7	546,6	528,5
AETg/PgSWE (%)	40,8	48,1	39,1	49,9	38,5	42,5
AETveg (mm)	552,3	432,6	551,0	460,9	532,4	505,9
AETv/PgiSWE (%)	46,0	56,2	45,2	59,2	43,4	48,7
Wi (g) (mm)	833,9	589,4	863,1	491,6	835,4	722,7
Wi (g) / PgSWE (%)	60,6	59,5	59,6	50,0	58,9	58,1
Wi (š) (mm)	670,5	425,3	645,1	319,8	650,6	542,3
Wi (š) / PgSWE (%)	55,9	55,2	52,9	41,1	53,1	52,2
Ief (mm)	760,4	515,6	765,0	414,3	752,3	641,5
Ief/Pbruto (%)	77,4	79,3	70,8	58,7	85,2	74,6
Ief/PgSWE (%)	55,3	52,0	52,8	42,1	53,0	51,6
Ief/PgiSWE (%)	63,4	66,9	62,7	53,2	61,4	61,8
Qsr (m³/s)	1,07	0,67	1,15	0,62	0,60	0,82
Q (mm) (F = 42 km²)	809,4	505,1	863,5	465,4	448,0	618,3
Δ Ief-Q (mm)	-49,1	10,4	-98,5	-51,0	304,2	23,2
Q / Ief (%)	106,45	97,97	112,87	112,32	59,56	96,38

Iz tabele 6.13 može se videti da je vrednost korigovanih padavina i na otvorenim i na područjima pod vegetacijom značajno veća u odnosu na izmerene na prostoru meteorološke stanice Sjenica, tako da je ukupna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom prosečno veća za 383,3 mm od izmerenih vrednosti kiše, dok je na području sa vegetacijom ona prosečno veća za 178,2 mm. Potencijalna evapotranspiracija

iznosi od 619,9 mm do 646,9 mm, odnosno procentualno od 59,8% do 95,4% izmerenih bruto padavina u pojedinim hidrološkim godinama, što ukazuje na činjenicu da je vrednost potencijalne evapotranspiracije veća u sušnoj nego u vlažnoj hidrološkoj godini. Dalje, vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa dodatim vodenim ekvivalentom snega su nešto manje i kreću se od 476,3 mm do 567,1 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 432,6 mm do 532,4 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent iznosilo od 38,5% do 49,9% za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom, odnosno od 43,4% do 59,2% za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **42,5%**, dok je za područja pod vegetacijom **48,7%**.

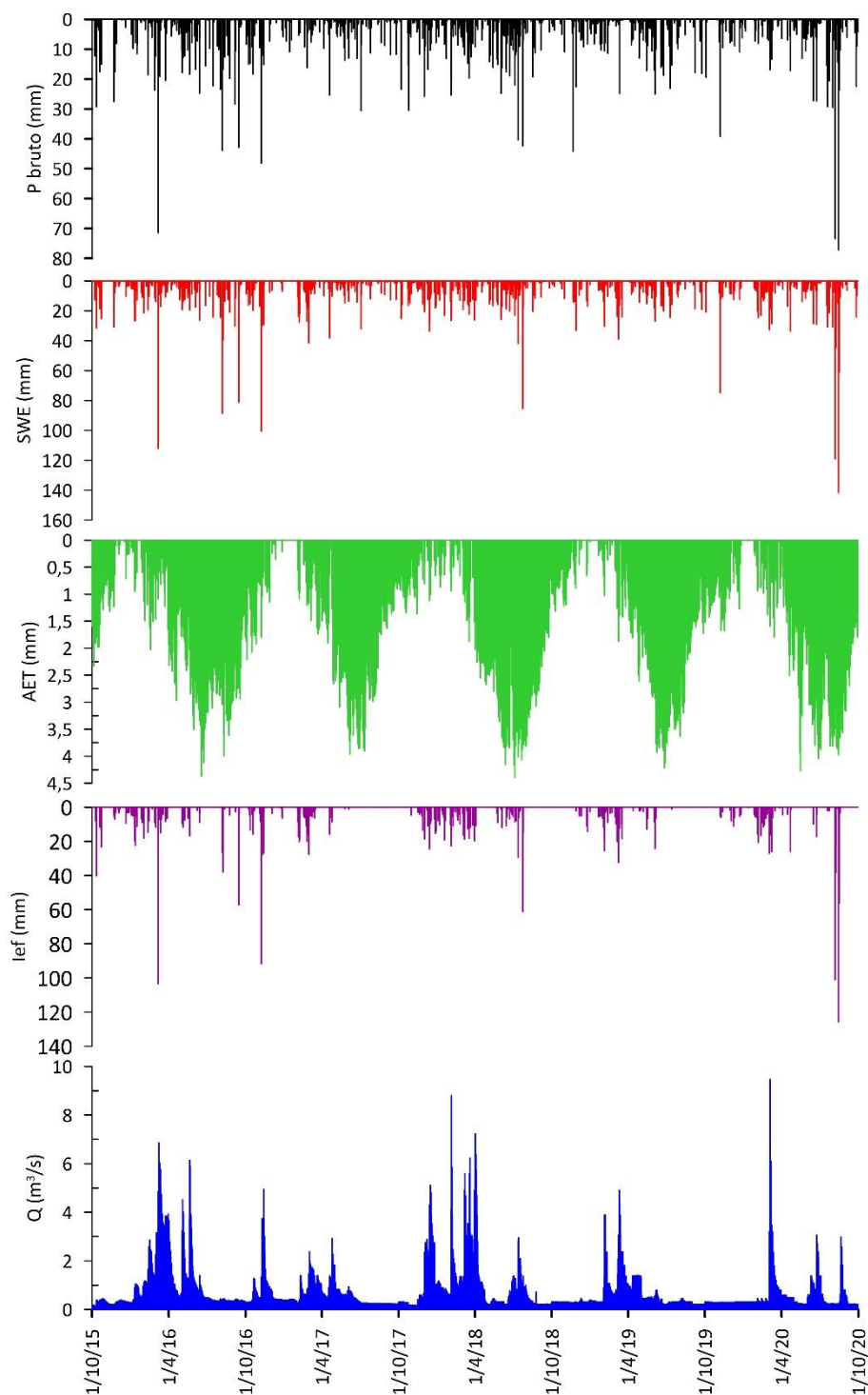
Ukupni višak vode u zemljištu iznosi od 491,6 mm do 863,1 mm (ili 50% do 60,6% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 319,8 mm do 670,5 mm (ili od 41,1% do 55,9% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **58,1%**, dok je za područja pod vegetacijom **52,2%**. Procentualne vrednosti se uklapaju sa vrednostima koje odlaze na stvarnu evapotranspiraciju, tako da se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan. Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 414,3 mm do 765 mm, dok je prosečna vrednost efektivne infiltracije u periodu 2015-2020 godina 641,5 mm. Procentualni odnos efektivne infiltracije i padavina iznosi od 51,6% do 74,6% u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu, u zavisnosti da li se radi o izmerenim ili korigovanim vrednostima kiše i snega.

Površina sliva Seljašnice od 42 km² dovodi vrednosti efektivne infiltracije i količine istekle vode u periodu 2015-2020 godina u ravnotežno stanje. Ispravnost ovakvog postupka oglada se u razlici i procentualnom odnosu sloja isticanja i efektivne infiltracije (što je pokazano u poslednja dva reda tabele 6.13) koja za celokupni period oktobar 2015 – septembar 2020 iznosi svega 23,2 mm ili 3,62%. Takođe, uočava se da je tokom hidroloških godina 2015-2016, 2017-2018 i 2018-2019 isticalo od 6% do 13% više vode nego što je infiltrirano. Na kraju osmatračkog perioda, isteklo je svega 59,56% infiltrirane vode, a to je verovatno posledica ispražnjenosti sistema tokom prethodnih hidroloških godina, kada je isticalo više vode nego što je infiltrirano u sistem. Drugim rečima, razlika od 40% koje nije isteklo tokom hidrološke 2019-2020, najverovatnije je utrošeno na popunjavanje rezervi karstnog sistema vrela Seljašnice.

Grafički prikaz dnevnih vrednosti izmerenih količina padavina za meteorološku stanicu Sjenica, vrednosti vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Seljašnice dat je na uporednom dijagramu 6.26. Na pomenutom dijagramu prikazane su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja pod vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja, ali i identičan trend i zanemarljive razlike u vrednostima za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom.

Sa pomenutog dijagram može se uočiti značajno povećanje vrednosti padavina, nakon korekcije i preračunavanja snega u vodeni ekvivalent. Takođe, uočljiva je ciklična promena stvarne evapotranspiracije koja je veća u prolećnim, vegetativnim periodima godine od perioda zimskih meseci, kada je temperatura značajno niža. Vrednosti efektivne infiltracije su male ili čak odsustvuju u periodima visokih vrednosti stvarne evapotranspiracije, što ukazuje na ispravnost postupka bilansiranja zemljišne vlage.

Uočljivo je da vrednosti izdašnosti vrela Seljašnice generalno prate povećanje ili smanjenje vrednosti efektivne infiltracije, što je posebno važno u periodima visokih voda kada se uočavaju maksimalni intenzitet efektivne infiltracije, ali i maksimumi izdašnosti, odnosno u recesionom periodu kada je izdašnost na minimumu, a efektivna infiltracija izostaje. Ipak, u određenim periodima godine (npr. april – septembar 2020), vrednosti efektivne infiltracije i izdašnosti Seljašnice nisu sinhronizovane, što može biti posledica stanja rezervi u sistemu, ali i grešaka pri merenju preliva Seljašnice i proračunu ukupne izdašnosti vrela.



Sl. 6.26. Uporedni prikaz dnevnih vrednosti izmerenih padavina sa stanice Sjenica, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Seljašnice u periodu 2015 – 2020. godina

Komparacijom dijagrama isticanja vrela Seljašnice i efektivne infiltracije uočava se poklapanje visokih vrednosti efektivne infiltracije i pikova isticanja karstnih podzemnih voda generalno tokom zimskih i prolećnih meseci. Izuzetak je 2020. godina tokom koje očigledno postoje greške pri merenju preliva, te reakcija sistema na efektivnu infiltraciju nije uočljiva. Takođe, može se uočiti i da duži period trajanja efektivne infiltracije ukazuje na akumuliranje vode u sistemu što uzrokuje duže periode veoma visokih vrednosti isticanja podzemnih voda na vrelu Seljašnice, kakav je slučaj bio tokom perioda oktobar 2017 – april 2018. Suprotno tome, jasno se mogu uočiti periodi kada odsustvuje aktivno prihranjivanje karstnog sistema, najčešće tokom letnjih meseci (jun – septembar), što ukazuje na period recesije sistema, da bi nakon toga se efektivna infiltracija ponovo aktivirala, ali bez reakcije na vrelu, budući da se u tom periodu vrši popuna rezervi voda u sistemu, koje su istekla u recesionom periodu.

6.2.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Tabela 6.14 prikazuje osnovne statističke parametre za svaku pojedinačnu hidrološku godinu, kao i za celokupni period osmatranja.

Tabela 6.14. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Seljašnica za period 2015 – 2020. godine. Legenda: **N** – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{X} – srednja vrednost serije; **Mdn** – medijana; **M** – mod; **Min** – minimalna vrednost serije; **Max** – maksimalna vrednost serije; **VAR** – varijansa serije; σ – standardna devijacija; **Cv** – koeficijent varijacije; **Cs** – koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{X}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
				m ³ /s						
2015-2016	366	1,08	0,43	0,36	0,14	6,85	1,61	1,27	118,01	2,16
2016-2017	365	0,67	0,45	0,32	0,23	4,95	0,37	0,61	90,68	3,02
2017-2018	365	1,15	0,63	0,85	0,13	8,80	1,87	1,37	118,82	2,33
2018-2019	365	0,62	0,31	0,31	0,22	4,91	0,45	0,67	108,80	3,18
2019-2020	366	0,60	0,31	0,30	0,18	9,47	0,77	0,88	147,19	5,59
2015-2020	1827	0,9	0,39	0,36	0,13	9,47	1,07	1,03	125,72	3,21

Iz tabele 6.14 može se uočiti da je izdašnost karstnog vrela Seljašnica u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,13 m³/s do 9,47 m³/s, tako da je srednja vrednost 0,9 m³/s, medijalna 0,39 m³/s, odnosno modalna vrednost 0,36 m³/s, što bi predstavljala najfrekventniju vrednost vremenske serije. Takođe, uočava se da se minimalne vrednosti oscilirale od 0,13 do 0,23 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 4,95 do 9,47 m³/s. Vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju centralnu tendenciju vremenske serije isticanja vrela Seljašnice, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno. Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini i dinamici karstnog sistema (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020), tako da vrelo Seljašnice pripada klasi *Visoko razvijenih* sistema, u smislu površine koji zauzima, odnosno veličine karstifikacije.

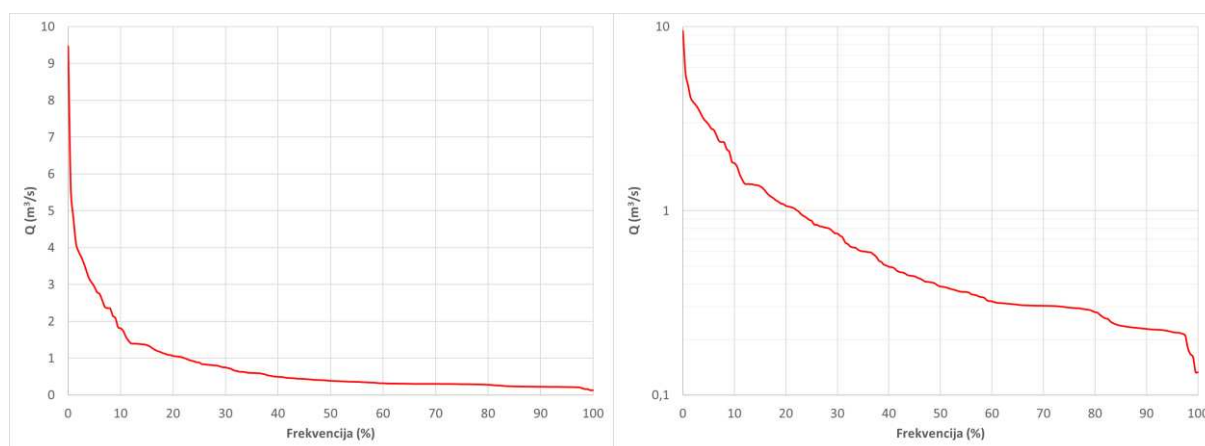
6.2.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

Analiza krivih trajanja dnevnih vrednosti protoka vrela Seljašnica izvršena je za celokupni period osmatranja 2015-2020. godine. Proračunati podaci prikazani su u tabeli 6.15, kao i grafički na sl. 6.27 u vidu dijagrama normalne i log-normalne raspodele, kako bi se bolje istakli maksimalne i minimalne vrednosti isticanja, tj. bolje analizirali periodi malih i velikih voda.

Tabela 6.15. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Seljašnica na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m^3/s

Period	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₃₀	Q ₄₀	Q ₅₀	Q ₆₀	Q ₇₀	Q ₈₀	Q ₉₀	Q ₉₅	Q ₉₉
2015-2020	4,80	2,94	1,81	1,06	0,75	0,50	0,39	0,32	0,31	0,28	0,23	0,22	0,16

Iz tabele 6.15 može se uočiti da je vrednost u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) isticanje na vrelu iznosila $0,39 m^3/s$, što u potpunosti korespondira sa medijalnom i donekle modalnom vrednošću. Za analizu sušnih i poplavnih perioda bitne su vrednosti $Q_{95} - Q_{100}$ i $Q_0 - Q_1$. Tako, tabela 6.15 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Seljašnice mogu očekivati vrednosti isticanja od $0,16 m^3/s$ (Q_{99}) do $0,22 m^3/s$ (Q_{95}), što ne bi ugrozilo vodosnabdevanje stanovnika Prijepolja, za koje je vrelo Seljašnice kaptirano, budući da je prosečno zahvatanje oko $150 l/s$. Sa druge strane, poplavni talasa koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose $4,8 m^3/s$ (Q_1) na vrelu Seljašnica. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od $1,8 m^3/s$ (Q_1) do $4,8 m^3/s$ (Q_{10}), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od $0,23 m^3/s$ (Q_{95}) do $0,31 m^3/s$ (Q_{70}).



Sl. 6.27. Krive trajanja protoka vrela Seljašnice za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Analizirajući dijagrame učestalosti protoka na vrelu Seljašnice, jasno se uočava strmi nagib krive za vrednosti frekvencije od 1 do 10%, što ukazuje na dominantne veće karstne kanale kojima voda dotiče do vrela u periodu visokih voda i pri turbulentnom režimu tečenja. Takođe, tačka infleksije koja se javlja u sušnim periodima godine pri frekvencijama od Q_{95} do Q_{99} , vidljiva na log-normalnoj raspodeli, može ukazivati na početak isticanja voda kroz matričnu poroznost krečnjaka ili na opadanje gradijenta i pritiska u velikim karstnim kanalima, kada se formira laminarni tok i usporeno dreniranje podzemnih karstnih voda, što se obično događa u malovodnim i ekstremno sušnim uslovima.

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) ukazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Seljašnice iznosi 1,69, ukazujući na nisku varijabilnost isticanja. Recipročan odnos ove dve vrednosti (Q_{90} / Q_{50}) ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema Seljašnice, ovaj odnos iznosi 0,59 što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela skoro 60% vode dolazi na račun baznog oticaja.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Seljašnice iznosi 7,87 što ga svrstava u klasu vrela sa disbalansiranim vrednostima isticanja karstnih podzemnih voda, dok koeficijent hidrodinamičke neravnomernosti (odnos ekstremnih vrednosti) iznosi 72,85, što je skoro 10 puta veća vrednost od realne.

6.2.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Definisanje perioda isticanja podzemnih voda bez aktivnog prihranjivanja sistema urađeno je na osnovu komparativne analize hidrograma vrela Seljašnice i dijagrama efektivnih padavina (Sl. 6.26). Uporedni dijagram pokazuje da, iako je tokom definisanog recesionog perioda bilo padavina, one su verovatno „potrošene“ na zasićenje zemljišne vlage (nije bilo reakcije sistema) tako da se nisu infiltrirale u podzemlje, tj. nisu dostigle nivo podzemnih voda i nisu aktivno učestvovala u formiranju isticanja na vrelu. Stoga, može se smatrati da je definisanjem perioda sa nultom efektivnom infiltracijom zadovoljen teorijski pristup da je recesija onaj period hidrološke godine bez aktivnog prihranjivanja karstnog sistema kada na vrelu ističe samo bazni oticaj, formiran na račun prethodno akumuliranih količina podzemnih voda u sistemu.

Tabela 6.16 prikazuje rezultate proračunate u okviru analize recesionih krivih vrela Seljašnice za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.16. Rezultati recesione analize karstnog vrela Seljašnice za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

Godina	Recesioni period	Koeficijent recesije			$V_0 \times 10^6$ (m ³)	$V^* \times 10^6$ (m ³)	$V_{total} \times 10^6$ (m ³)	t (dani)
2015-2016	14.6. - 31.7.2016	1	α_1	0,337	V_1	2,65	2,551	1
					V_2			13
					V_3			34
					$S V_0$			S = 48
2016-2017	4.6. - 30.9.2017	1	α_1	0,054	V_1	17,61	4,81	14
					V_2			20
					V_3			85
					$S V_0$			S = 119
2017-2018	14.7. - 29.9.2018	1	α_1	0,098	V_1	15,63	22,31	13
					V_2			30
					V_3			35
					$S V_0$			S = 78
2018-2019	8.6. - 4.7.2019	1	α_1	0,103	V_1	3,67	0,48	9
					V_2			9
					V_3			9
					$S V_0$			S = 27
2019-2020	24.6. - 16.8.2020	1	α_1	0,079	V_1	17,92	5,63	10
					V_2			12
					V_3			32
					$S V_0$			S = 54

Ukoliko se posmatra celokupni period osmatranja od 2015. do 2020. godine, može se zaključiti da je karstni sistem Seljašnice veoma dobro razvijen, s obzirom na postojanje 3 mikrorežima pražnjenja, što je generalno odlika dobro razvijenog i karstifikovanog sistema. Stoga, u svakoj hidrološkoj godini su izdvojena 3 mikrorežima, čak i ako traju po jedan dan (kao što je slučaj u 2015-2016 godini). Takođe, prvi mikrorežim pražnjenja najčešće podrazumeva brzo

pražnjenje sistema pod uticajem turbulentnog režima tečenja (te se stoga, često ne prilagođava eksponencijalnoj jednačini Majea, već se odnosi na tzv. β režim), što ukazuje na dominantni karstni kanal i predisponirane pravce cirkulacije podzemnih voda ovim kanalima. Na to ukazuje i red veličine koeficijenta recesije od 10^{-1} do 10^{-2} , tako da prvi mikrorežim pražnjenja tokom perioda 2015-2020 oscilira od 0,054 do 0,337. Sa druge strane, treći mikrorežim pražnjenja funkcioniše u laminarnom režimu cirkulacije podzemnih voda i najčešće se odlikuje koeficijentima recesije reda veličine 10^{-3} , oscilirajući u dijapazonu od 0,011 do 0,011. Zapremina istekle vode tokom svih recesivnih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine varira od $0,48 \text{ m}^3$ do $22,3 \text{ m}^3$, tako da prosečna vrednost zapremine istekle vode iznosi $7,16 \times 10^6 \text{ m}^3$, što je u skladu sa rezultatima recesivne analize izvršene i u nekim ranijim istraživanjima (Stevanović et al. 2020a).

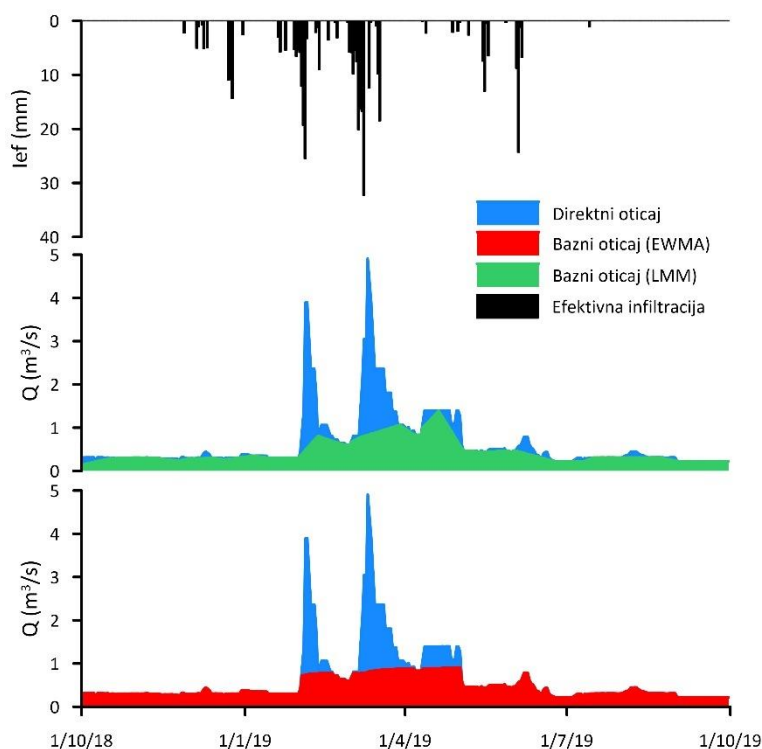
6.2.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

U slučaju sistema vrela Seljašnica zaključeno je da nakon vrednosti $N=4$ nagib krive opada, tj. poprima praktično linearni karakter, te je ova vrednost uzeta pri razdvajanju baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom LMM metode je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Seljašnice $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,03 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,835 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema vrela Seljašnice prosečno čini 83,5% ukupnog oticaja ovog sistema, prema metodi lokalnog minimuma.

Primena digitalnog rekurzivnog EWMA filtera uključila je srednju vrednost koeficijenta recesije trećih mikrorežima karstnog sistema vrela Seljašnice za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.16, budući da je ocenjeno da se treći mikrorežimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena vrednosti koeficijenta recesije trećih mikrorežima iznosi $\alpha_{3av} = 0,00394$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera sračunata je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Seljašnice od $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,807 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Seljašnice prosečno čini 80,7% ukupnog oticaja ovog sistema. Ova vrednost je sličnog reda veličine kao vrednost dobijena primenom metode lokalnog minimuma.

Obe primenjene metode daju zadovoljavajuće rezultate, koji su i približno jednaki. Ipak, s obzirom na to da rekurzivni digitalni filter EWMA uključuje u proračun koeficijent recesije, čime je ipak smanjena subjektivnost, EWMA filter je iskorišćen pri finalnom razdvajanju hidrograma i proračunu baznog oticaja, što je razmatrano pri analizi vremenskih serija direktnog i baznog oticaja i efektivne infiltracije. Analizom baznog oticaja vrela Seljašnice primenom obe metode ustanovljeno je da bazni oticaj čini nešto više od 80% hidrograma vrela, što znači da je karstni sistem vrela Seljašnice dobro strukturiran i razvijen, tako da se akumulira značajna količina vode, tj. da su rezerve podzemnih voda znatne. Preostalih 20% odnosi se na direktni oticaj koji nastaje pod uticajem efektivne infiltracije.

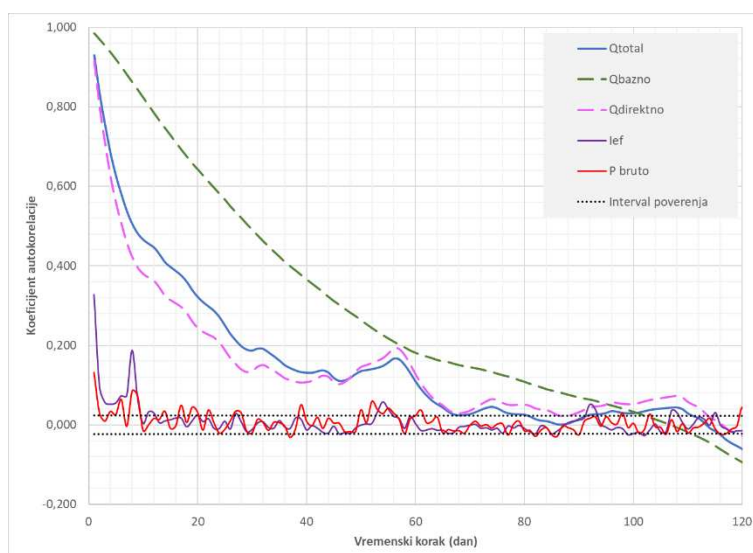
Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Seljašnica dati su na sl. 6.28 i to za hidrološku godinu 2018-2019, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 706,1 mm.



Sl. 6.28. Uporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema Seljašnica za 2018-2019 god.

6.2.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza autokorelacione funkcije izvršena je za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), kao i zasebno za sušnu (2016-2017) i vlažnu (2017-2018) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 120 dana za ukupni period razmatranja, odnosno 100 dana za sušnu i vlažnu godinu.



Sl. 6.29. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Seljašnice, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

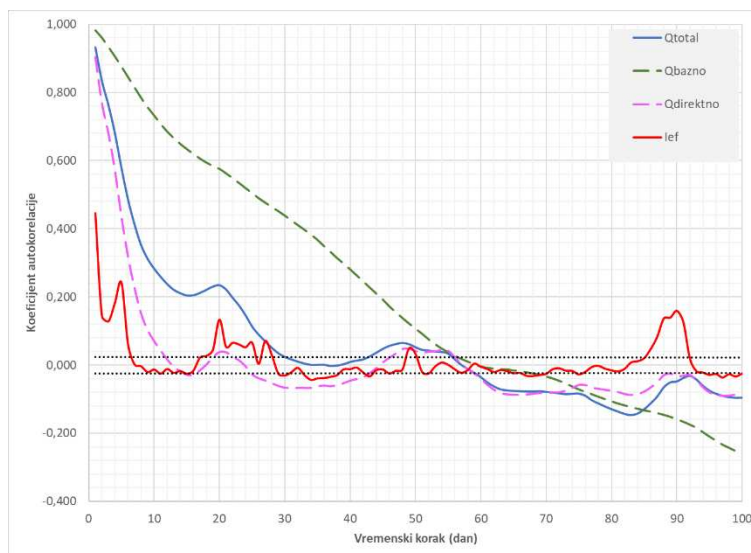
Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog sistema vrela Seljašnice, kao i za bruto izmerene padavine i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazana je

na sl. 6.29, sa koje se može uočiti visoka autokorelisanost vremenskih serija isticanja, među kojima se ističe autokorelacija baznog oticaja, koji gubi statističku značajnost 103. dana, ukoliko se posmatraju intervali poverenja, dok ukoliko se kao granica razmatra vrednost 0.2, koeficijenti autokorelacije baznog oticaja postaju statistički beznačajni posle 58 dana.

Sve pomenuto ukazuje na veliku memoriju sistema, odnosno na veliku akumulativnu sposobnost karstnog sistema Seljašnice. Slične rezultate pokazuju i analize Marinovića & Petrovića (2019) i Stevanovića et al. (2020a). Autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja su sinhroni i pokazuju veoma sličan nagib krive, što je pokazatelj velikog uticaja efektivne infiltracije na formiranje isticanja karstnog sistema vrela Seljašnice. Sinhroni pad direktnog i ukupnog oticaja ukazuje i na ispravnost postupka disagregacije hidrograma vrela Seljašnice. Koeficijenti autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja su takođe veoma visoki, te ukoliko se posmatraju intervali poverenja, tek nakon 68 dana autokorelacija direktnog i ukupnog oticaja dostiže prag značajnosti, da bi odmah potom koeficijenti autokorelacije ponovo rasli do 87. dana. Granicu od 0,2 pomenute vremenske serije dostižu 24. (direktni oticaj) i 27. dana (ukupni oticaj). Na osnovu navedenih vrednosti, može se zaključiti da je karstni sistem vrela Seljašnice veoma dobro razvijen i da ima sposobnost akumulacije značajne količine vode koja utiče na formiranje oticaja na vrelu. Strmi nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja koji traje prvih 6 dana jasno ukazuje na dominantan karstni kanal kojim se infiltrirane vode transportuju do karstnog vrela Seljašnice, dok suprotno tome, blagi nagib autokorelograma baznog oticaja ukazuje na formiranje ove komponente oticaja u okviru matrice poroznosti krečnjaka.

Autokorelacija izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije pokazuje slučajnu prirodu ove promenljive, tako da statistička značajnost ove komponente prestaje nakon samo dva dana, uz napomenu da su koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije nešto viši. Takođe, može se primetiti da efektivna infiltracije nekoliko puta se vraća u opseg značajnosti, izazivajući i povećanje autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja svaki put nakon 4 dana.

Sl. 6.30 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Seljašnice, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2016 – 2017, koja je ocenjena kao sušna godina.

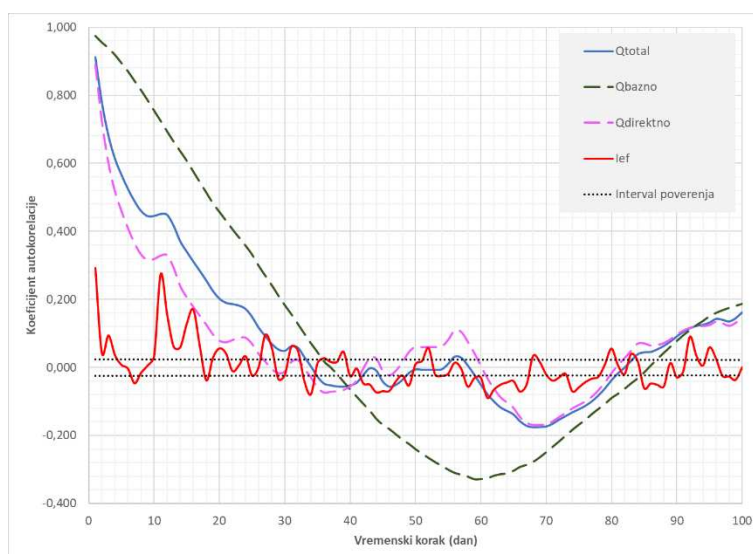


Sl. 6.30. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Seljašnice i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2016 – 2017)

Sa pomenutog dijagrama je još uočljivija zavisnost direktnog oticaja od efektivne infiltracije, sa jasnim poklapanjem pikova ulaznih signala sa izlaznim. Niži koeficijenti autokorelacije direktnog oticaja ukazuju na brže pražnjenje i brzi prolazak talasa infiltrirane vode, tako da

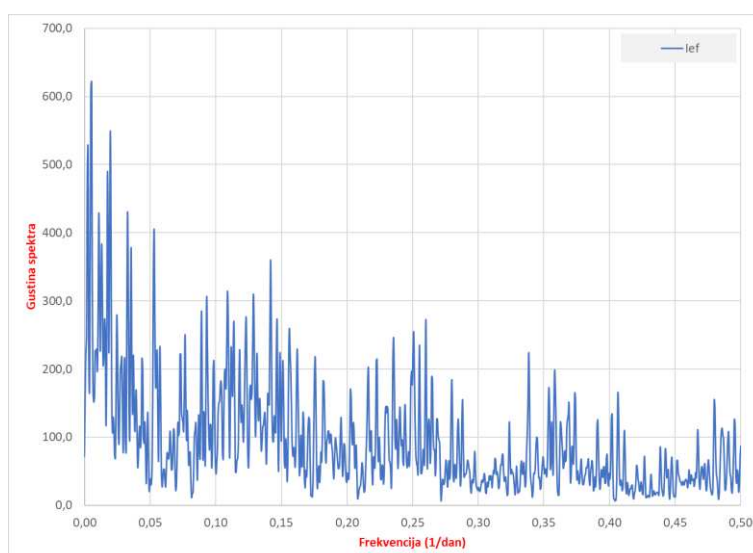
memorija direktnog oticaja je na nivou 8, odnosno 12 dana ukoliko se posmatra prag značajnosti od 0,2, tj. interval poverenja. Pik koji se javlja na autokorelogramu ukupnog i direktnog oticaja 20. dana moguće je da ukazuje na aktiviranje nižeg karstnog kanala koji postaje dominantan u formiranju oticaja, kada nivo podzemnih voda opadne toliko da gornji kanala presuši ili ima manje vode nego donji. Autokorelogram baznog oticaja nedvosmisleno pokazuje veliku memoriju i akumulativnu moć karstnog sistema Seljašnice od 44 dana, da bi finalno 55. dan predstavljao tačku preseka autokorelograma direktnog, baznog i ukupnog oticaja, odnosno trenutak kada sve tri veličine gube statističku značajnost. Autokorelogram efektivne infiltracije je zadržao slučajnu prirodu i cikličnost pojavljivanja, jasno pokazujući uticaj na formiranje oticaja vrela Seljašnice.

Sl. 6.31 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Seljašnice, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2017 – 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina. Sa sl. 6.31 uočava se takođe brza propagacija isticanja podzemnih voda kroz dominantni karstni kanal, tako da je nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja strm u prvih 9 dana, da bi se nakon toga aktivirao niži kanal, koji preuzima dominaciju. Statistička značajnost se gubi posle 20, odnosno 32 dana za ukupni i direktni oticaj, razmatrajući prag $r_k < 0,2$, tj. interval poverenja. Ponovno povećanje koeficijenta autokorelacije izvan praga poverenja je nakon 82. dana, što može ukazivati na vreme neophodno za popunjavanje rezervi podzemnih voda karstnog sistema, isteklih tokom recesionog perioda. Interesantan je oblik autokorelograma baznog oticaja, koji ima strmiji pad nego što je slučaj u sušnoj godini ili za ceo period osmatranja. To se može objasniti brzim pražnjenjem karstnog sistema (sa dominantnim baznim oticajem) pod uticajem velike količine novoinfiltriranih voda, usled prenošenja pritiska i inercije. Memorija sistema sa aspekta baznog oticaja je 30, odnosno 36 dana, tako da se bazni oticaj aktivira tek 86. dana, odnosno nakon 50 dana punjenja sistema.



Sl. 6.31. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Seljašnice i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Seljašnice prikazana je na sl. 6.32, sa koje se mogu uočiti 5 najfrekventnijih pikova koji pokazuju cikličnost vremenske serije. To su vrednosti 0,002738, 0,005476, 0,017525, 0,019715 i 0,035597 dan⁻¹, koji odgovaraju vremenskim periodima od 365 dana, 182 dana, 57 dana, 50 dana i 28 dana. Drugim rečima, prvi pik 0,002738 koji odgovara vremenskom periodu od 365 dana pokazuje godišnju cikličnost efektivne infiltracije.



Sl. 6.32. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Seljašnice za period 2015 – 2020

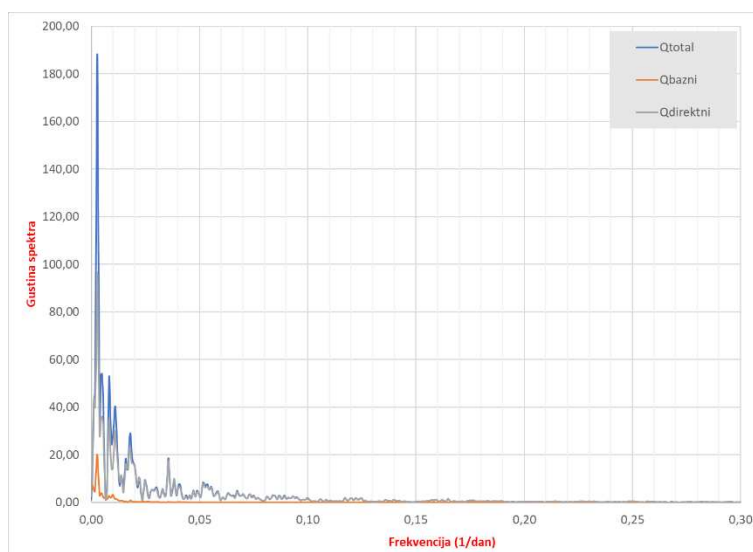
Drugi i treći pik (0.005476, 0.017525) odgovaraju periodima od 182 i 57 dana, pokazujući polugodišnji i dvomesečni ciklus, dok peti pik (0.002738) odgovara periodu od 28 dana, pokazujući mesečni ciklus efektivne infiltracije. Frekvencije iznad od 0.3 dan⁻¹ dobijaju slučajni karakter.

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu EWMA filtera za ceo period osmatranja (2015 – 2020) i prikazana je na sl. 6.33. Sa dijagrama 6.33 može se videti da se pikovi i direktnog i baznog oticaja, kao i ukupnih vrednosti isticanja javljaju pri niskim frekvencijama, nižim od 0.09 dan⁻¹ za direktni i ukupni oticaj, odnosno 0.02 dan⁻¹ za bazni oticaj. Karakteristični pikovi za ukupni oticaj iznose 0.002738, 0.004381, 0.005476, 0.008215 i 0.010953 za odgovarajuće periode od 365, 228, 182, 121 i 91 dana. Ove vrednosti i periodi ukazuju na godišnji, polugodišnji, četvoromesečni i kvartalni ciklus ukupnog oticaja. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine baznog oticaja pokazuje niže frekvencije (0.000548, 0.001643, 0.002191, 0.002738 i 0.0099858) koje odgovaraju broju dana od 1826, 608, 456, 365 i 101. Dakle, može se zaključiti da se vrednosti baznog oticaja javljaju u dužim ciklusima koji odgovaraju petogodišnjim, dvogodišnjim, godišnjim i tromesečnim ciklusima.

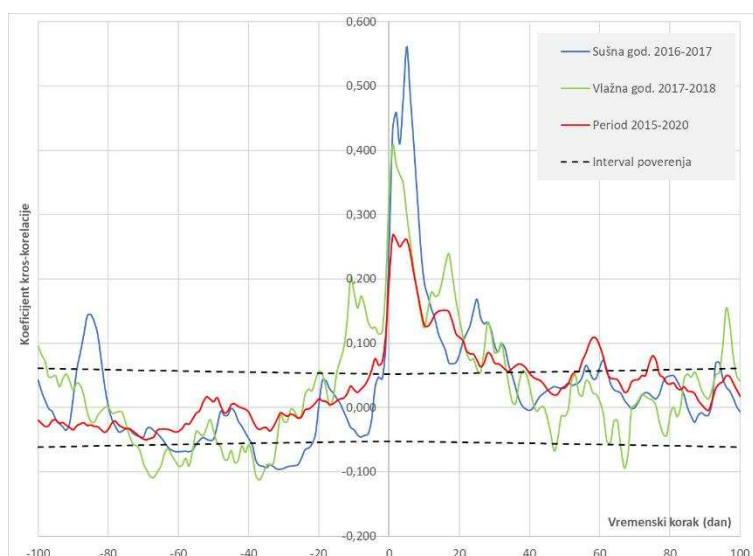
Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od 0.02 dan⁻¹, spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi značaj, što odgovara broju dana od 50. Spektralna funkcija gustine direktnog oticaja pokazuje slične cikluse kao što je slučaj sa ukupnim oticajem – 0.001905, 0.002738, 0.005476, 0.008215 i 0.010953 što odgovara periodima od 913, 365, 182, 121 i 91 dan. Dakle, kao što je slučaj sa ukupnim oticajem, i kod direktnog oticaja radi se o dvoipogodišnjem, godišnjem, polugodišnjem, četvoromesečnom i kvartalnom ciklusu. Sa sl. 3.26 takođe se može uočiti da pri frekvencijama višim od 0.02, kada spektar baznog oticaja postaje beznačajan, spektar ukupnog i direktnog oticaja značajno raste sve do frekvencije 0.09 dan⁻¹ što odgovara periodu od 11 dana. Spektralna funkcija gustine pokazala je dominantnu ulogu direktnog oticaja u formiranju ukupnog oticaja podzemnih voda karstnog sistema Seljašnice.

Kros-korelogram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Seljašnice, prikazan na sl. 6.34 pokazuje pozitivnu asimetriju korelacije što ukazuje na očigledan uticaj efektivne infiltracije na izdašnost Seljašnice. Sam izgled kros-korelograma sa dva jasno izražena pika u prva 4 dana jasno ukazuje na pomenuta dva dominantna kanala na različitim hipsometrijskim visinama. Koeficijenti korelacije u sušnoj godini su veći nego u vlažnoj godini, najverovatnije

zbog manje količine vode u sistemu tokom sušne godine, da bi vrelo nakon infiltracije nove vode jače reagovalo. Primetan je pik koji se javlja nakon 2 dana, odnosno nakon 5 dana, što ukazuje na reakciju višeg i nižeg dominantnog karstnog kanala. Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0,2, statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 10 dana, što pokazuje na vreme reakcije slivnog područja na intenzivnu kišnu epizodu.



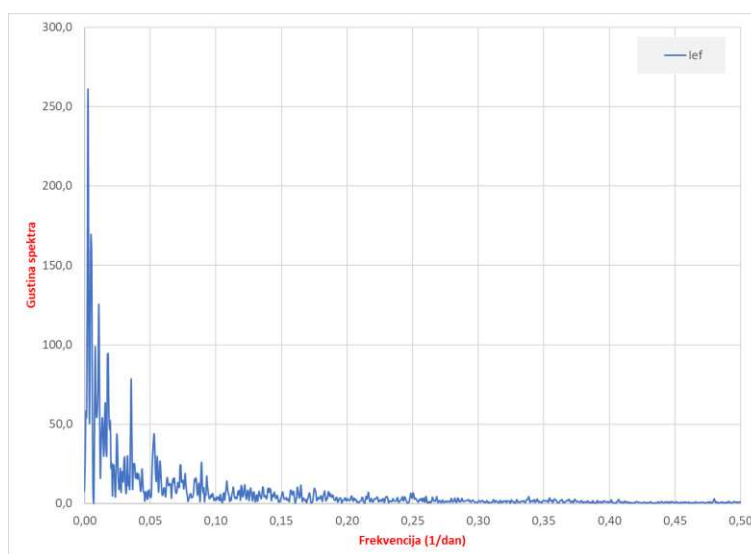
Sl. 6.33. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema Seljašnica u periodu 2015 – 2020 godina



Sl. 6.34. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Seljašnice za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

Kros-korelogram vlažne godine pokazuje zakašnjenje reakcije vrela od 1 dana na efektivnu infiltraciju, što se objašnjava većom količinom vode u sistemu, koja se najverovatnije usled brzog prenošenja pritiska nakon samo jednog dana pojavljuje na vrelu. I u vlažnoj godini uočava se aktiviranje nižeg kanala nakon 3 dana reakcije, samo što pik nije toliko izražen kao što je to slučaj u sušnoj godini, najverovatnije zbog toga što gornji kanal i dalje ističe, iako niži postaje dominantan. Statistička značajnost koeficijenta kros-korelacije prestaje nakon 7 dana, što je reakcija sistema u vlažnoj godini, a ujedno i tokom celog osmatranog perioda. Pikovi koji se javljaju oko 20, 60. i 90. dana ukazuju na cikličnost ulaznog signala (efektivne infiltracije) (Padilla & Pulido-Bosch, 1995), što generalno potvrđuje rezultate spektralne analize.

Kros-amplitudna funkcija izdašnosti karstnog vrela Seljašnice (Sl. 6.35) pokazuje stepen filtriranja impulsnog signala od strane karstnog sistema vrela Seljašnice, što se na dijagramu može videti u zoni visokih frekvencija.

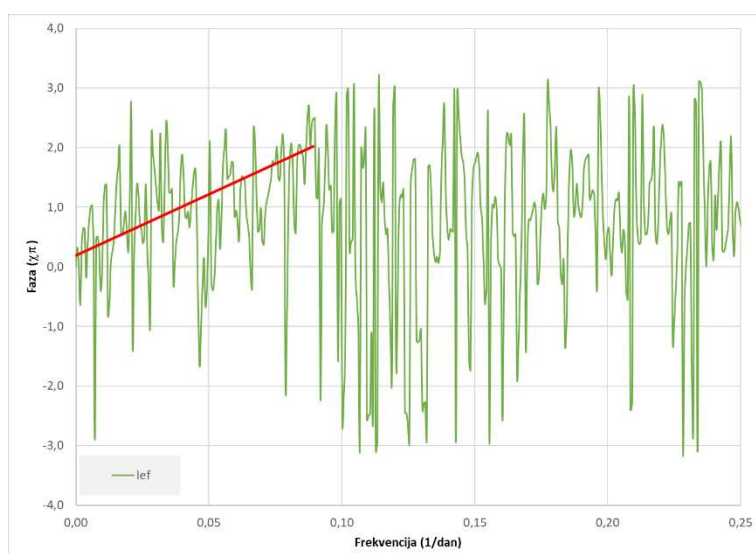


Sl. 6.35. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Seljašnice za period 2015 – 2020. godina

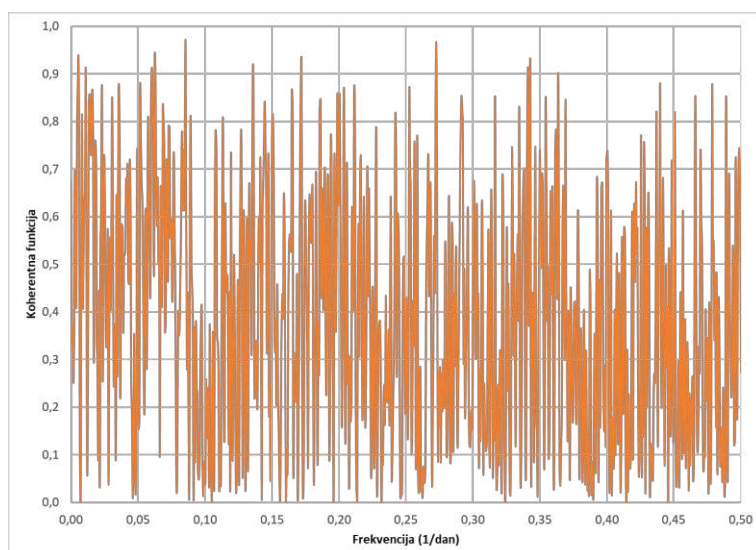
Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,25 \text{ dan}^{-1}$ (4 dana), tako da pikovi u zoni visokih frekvencija pokazuju značajan uticaj efektivne infiltracije na direktan oticaj i njegovu funkciju u formiranju ukupne izdašnosti vrela Seljašnice, kao i na mogućnost „prigušenja“ (amortizacije) jakog impulsnog signala (visokih vrednosti efektivnih infiltracija) nakon navedenog perioda. Frekvencije koje se javljaju u visokofrekventnom opsegu i koje odgovaraju direktnom oticaju su $0,108434$ i $0,16481$ koje odgovaraju periodu od 9 i 6 dana. Sa druge strane, pikovi u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, tako da se mogu uočiti pikovi od $0,002738$, $0,004929$, $0,010953$, $0,018072$, $0,035579$, $0,053122$ koje odgovaraju periodima od 365 dana (godišnji ciklus), 203 dana (polugodišnji ciklus), 91 dan (tromesečni ciklus), 55 dana (dvomesečni), 28 dana i 19 dana (mesečni ciklus). Slične vrednosti se mogu uočiti i pri spektralnoj analizi efektivne infiltracije (Sl. 6.43), što ukazuje na to da karstni sistem vrela Seljašnice ima značajnu moć transformacije ulaznog signala u izlazni.

Fazna funkcija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Seljašnice prikazana je na sl. 6.36, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri srednjim i visokim frekvencijama, dok se izvestan pozitivan linearni trend javlja pri niskim frekvencijama. Ovaj pozitivni trend prikazan je na sl. 6.36 crvenom linijom, tako da obuhvata frekventni opseg od 0 do $0,090361$, što odgovara periodu od 11 dana. Drugim rečima, period od 11 dana odgovara periodu kašnjenja odziva sistema na impulsni signal, što se slaže sa rezultatima dobijenim kros-korelacionom i kros-amplitudnom analizom.

Koherentna funkcija isticanja karstnog sistema Seljašnice, prikazana na sl. 6.37, ukazuje na izrazito nelinearan karakter karstnog sistema, tako da je srednja koherentna vrednost $0,38$, što ukazuje na značajnu akumulativnu sposobnost i dobro strukturiran i karstifikovan karstni sistem Seljašnice, tako da sistem sadrži značajne rezerve vode u sistemu, koje velikim delom na vrelu ističu u vidu baznog oticaja. Ovim su i potvrđeni rezultati analize baznog oticaja prikazanog u prethodnom tekstu, gde je dobijeno da je srednja vrednost baznog oticaja $80,7\%$ ukupnog oticaja, prema EWMA filteru. Takođe, uočava se i značajan pad koherentnih vrednosti u frekventnom opsegu od $0,1 \text{ dan}^{-1}$ (tj. 10 dana), što odgovara uticaju direktnog oticaja na ukupni sistem, a što je takođe saglasno sa rezultatima prethodnih analiza.



Sl. 6.36. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice za period 2015-2020

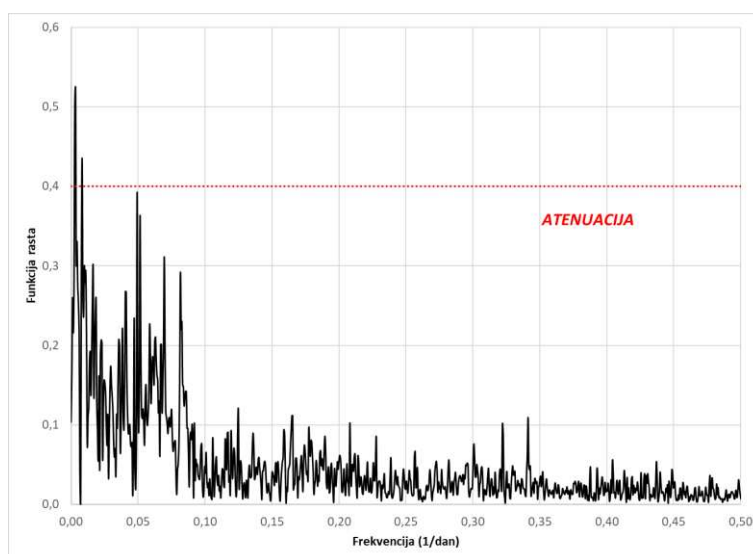


Sl. 6.37. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Seljašnice za period 2015-2020

Rezultati koherentne funkcije mogu delovati kontradiktorno prethodnim rezultatima koji ističu značajan uticaj direktne komponente hidrograma. Međutim, radi se o činjenici da direktni oticaj ima značajnu ulogu u formiranju izgleda hidrograma, tj. kao inicijalni impuls maksimalnim pikovima izdašnosti, tokom kojih svakako ističe i bazni oticaj.

Sl. 6.38 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Seljašnice, pokazujući da su sve vrednosti funkcije ispod 1, potvrđujući dominantnu ulogu baznog oticaja, što je posledica dobrog akumulativnog kapaciteta karstnog sistema vrela Seljašnice. Dijagram takođe pokazuje vrednosti funkcije rasta iznad 0.4, što je prag koji definiše uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, nakon čega karstni sistem u potpunosti vrši atenuaciju ulaznog signala i formira bazni oticaj (Padilla & Pulido-Bosch 1995). Poslednji pik iznad 0.4 javlja se pri frekvenciji od 0.008215 što odgovara periodu od 121 dan. Međutim, ovoliki broj dana ne može predstavljati period tokom koga direktni oticaj utiče na hidrogram vrela Seljašnice, već će se u tu svrhu izdvojiti poslednji pik koji se javlja na dijagramu. Poslednji pik javlja se pri frekvenciji od 0.081599, što odgovara broju od 12.25 dana, što je još jedna potvrda reda veličine od 10 dana,

nakon kojeg prestaje uticaj direktne komponente na ukupno isticanje podzemnih voda karstnog sistema Seljašnice.



Sl. 6.38. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice za period 2015-2020

Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se zaključiti da je karstni sistem vrela Seljašnice dobro hijerarhijski uređen i da postoje dva dominantna karstna kanala na različitim hipsometrijskim visinama. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 1038,9 mm na područjima sa vegetacijom, do 1243,7 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 641,5 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2020 iznosi 630,5 mm, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 505,9 mm do 528,5 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 42,5% na području bez vegetacije, tj. 48,7% na prostoru sa vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,45, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 45%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 55% (58,1% na prostoru bez vegetacije, tj. 52,2% na prostoru sa vegetacijom).

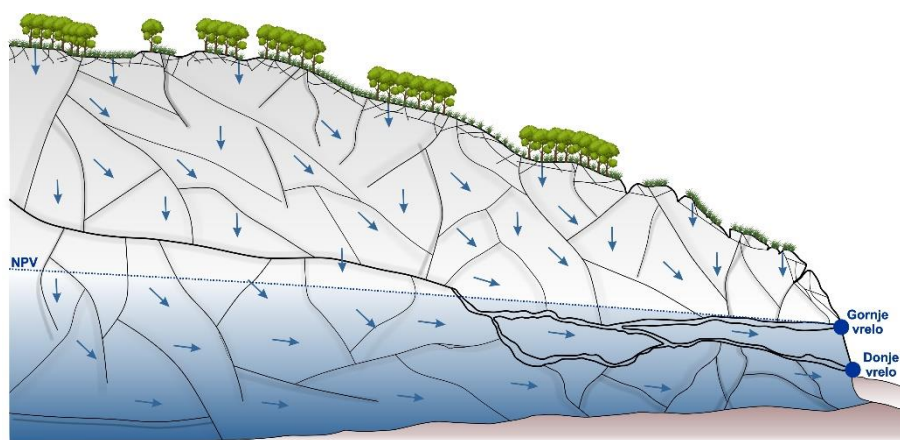
Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 0,13 m³/s do 9,47 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 0,39 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 4,8 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 0,16 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti tri mikrorežima pražnjenja, od kojih se prvi najčešće dešava u turbulentnom (β) režimu, dok se ostali mikrorežimi javljaju u laminarnom (α) režimu. Prosečna zapremina istekle vode iznosi nešto više od $7 \times 10^6 \times \text{m}^3/\text{s}$. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema EWMA filteru iznosi 0,45 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 80,7% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Rezultati korelacionih i (kros)spektralnih funkcija ukazuju na mehanizam funkcionisanja karstnog sistema vrela Seljašnice. Naime, očigledno je da efektivna infiltracija ima dominantnu ulogu u formiranju izgleda hidrograma vrela, i to najviše tako što se novoinfiltrirana voda ne javlja odmah na vrelu, već uzrokuje povećanje hidrostatičkog pritiska koji se prenosi kroz sistem, čime se povećava izdašnost na vrelu. Taj proces se dešava brzo – potrebno je svega 1 dan u vlažnoj (kada je sistem relativno pun) i 2 dana u sušnoj (kada je sistem ispražnjen) godini da bi se pritisak preneo sve do vrela. Povećanje rezervi u sistemu se dešava simultano i to tako što se efektivna infiltracija prvo „troši“ na popunjavanje rezervi, da bi u zavisnosti od

prethodnog stanja rezervi u sistemu (vlažna ili sušna godina), efektivna infiltracija bila transformisana u karstne podzemne vode koje se usled povećanja gradijenta i pritiska transportuju do vrela.

U zavisnosti od aktuelnog nivoa podzemnih voda u sistemu, podzemne vode ističu na gornjem ili donjem vrelu, koji zapravo predstavljaju dva karstna kanala na različitim visinama, što se može videti na konceptualnom modelu sistema (Sl. 6.39). Donji kanal je dominantan pri isticanju podzemnih voda, budući da on predstavlja primarnu zonu dreniranja. Gornji kanal se aktivira kada nivo podzemnih voda dostigne potrebnu visinu, tj. kada je sistem toliko napunjen da podzemne vode ističu i kroz viši kanal koji je zapravo paleotačka isticanja, koja je bila primarna u geološkoj istoriji, da bi evolucijom karstnog sistema, ona bila spuštена na niži nivo, tj. sadašnje donje vrelo. Komunikacija između dva dominantna karstna kanala omogućena je kroz matriks stenske mase, kao i manje kanale.

Tokom recesionog perioda, podzemne vode ističu isključivo kroz donji kanal u vidu baznog oticaja, odnosno podzemnih voda koje su prethodno akumulirane u sistemu, te sada ističu kroz matriks stene i manje karstne kanala u laminarnom režimu usled pada hidrostatičkog pritiska i gradijenta, kada je sistem bez aktivnog prihranjivanja. Laminarni režim isticanja baznog oticaja dešava se pri vrednostima izdašnosti koje su manje od kritične vrednosti isticanja $Q_{kr} = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Ova vrednost, koja je ujedno i medijana i Q_{50} ukazuje na to da se pri većim izdašnostima od nje menja hidraulički režim tečenja, odnosno cirkulacija podzemnih voda prelazi iz laminarnog u turbulentni režim. Vreme potrebno da se sistem napuni nakon recesionog perioda uočljiv je na kroskorelacionom dijagramu za vlažnu godinu, kada posle 50 dana dolazi do povećanja koeficijenta, čime bazni oticaj dobija ponovo statističku značajnost. Dakle, ovaj broj dana uslovno se može smatrati kao period obnavljanja dinamičkih rezervi karstnog sistema Seljašnice.



Sl. 6.39. Konceptualni model karstnog sistema vrela Seljašnice

6.2.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema Seljašnice izvršena je uzorkovanjem i kompletnim hemijskim analizama karstnih podzemnih voda vrela Seljašnice u periodu 2015 – 2017. godina. Prva kompletna hemijska analiza, izrađena 13. oktobra 2015. godine, podrazumevala je i uporednu analizu hemijskih karakteristika podzemnih voda na gornjem i donjem vrelu, kao i zbirne sirove vode u okviru postrojenja, čime je dokazano da su u pitanju vode identičnog kvaliteta, tako da su ostala tri uzorka podrazumevala samo zbirnu vodu (Stevanović et al. 2020a).

Kompletne hemijske analize su pokazale da su podzemne vode karstnog sistema vrela Seljašnice izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, budući da su svi hemijski parametri u svim

kompletnim analizama ispod maksimalno dozvoljene koncentracije. Jedini hemijski parametar koji može biti iznad dozvoljenih granice jeste mutnoća, koja se obično povećava pri nailasku velikih vrednosti efektivne infiltracije uzrokovane obilnim kišnim epizodama ili otapanjem snežnog pokrivača. Povećanje mutnoće može dovesti čak i do zatvaranja izvorišta, kao što je bio slučaj u junu 2017. godine (Stevanović et al. 2020a).

Sa druge strane, uočen je i povećan broj mezofilnih, ukupnih koliformnih i koliformnih bakterija fekalnog porekla, što može ukazivati na zagađujuće supstance antropogenog porekla dospele sa površine terena u okviru zone prihranjivanja, a koje se nisu u potpunosti redukovale u zavisnosti od cirkulacije podzemnih voda (Stevanović, 2015a). Osim bakteriološkog zagađenja sa površine terena, povišen sadržaj bakterija u podzemnim vodama može se javiti i usled neadekvatnog odabira lokacije uzorkovanja, što bi moglo dati nerealnu sliku stvarne koncentracije bakterija u karstnom sistemu (Vasić et al. 2013; 2015; Milanović et al. 2012).

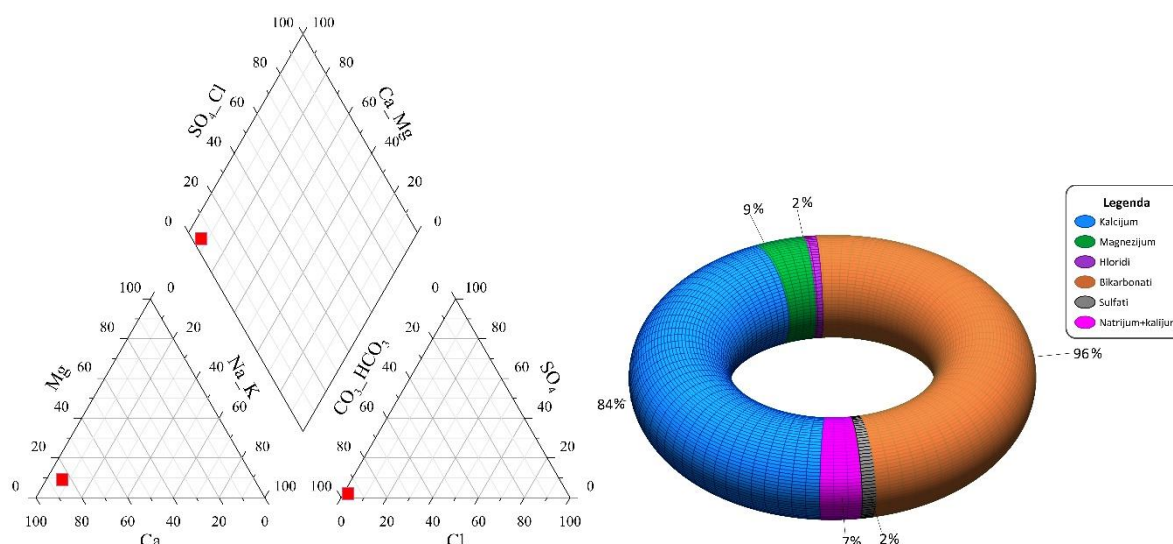
Neznatne oscilacije kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice ukazuje na postojan kvalitet ovih voda, koje su uniformne u vremenu. Tako, temperatura vode oscilira od 8,8 do 11,4°C, specifična provodljivost od 415 do 423 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH vrednost od 7,66 do 8,07, tvrdoća od 12,11 do 14,05°dH, a sadržaj organske materije od 2,53 do 7,59 mg/l, koji tokom godišnjih doba oscilira, što ukazuje na slobodni nivo karstnih podzemnih voda, na koju ima uticaj antropogeni faktor na karstnoj površi Babine (Stevanović et al. 2020a). Važno je istaći i mineralizaciju podzemnih voda Seljašnice koja varira od 229,3 mg/l do 248,4 mg/l, što ukazuje na srednju vrednost mineralizacije u periodu osmatranja od 239,4 mg/l.

Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (246,8 – 290,8 mg/l ili prosečno 97%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 81,60 do 91,39 mg/l, tj. prosečno 84%ekv. Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2015-2020, dat je na Pajperovom dijagramu i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.40), kao i formulom Kurlova (6.2).

$$CO_{6,81}^2 M_{0,24} \frac{HCO_{96}^3}{Ca_{84} Mg_9 Na + K_7} pH_{7,87} TV_{13,42} T_{9,7} Q_{360} \quad (6.2)$$

Na osnovu kompletnih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema vrela Seljašnice, koje su izvršene u periodu 2015-2017, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim dosta tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom neispravnnošću usled pojave mezofilnih i koliformnih fekalnih bakterija, sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema.

Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu vrela Seljašnice, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilog 4 ovog rada.



Sl. 6.40. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Seljašnice na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (prema podacima Stevanović et al. 2020)

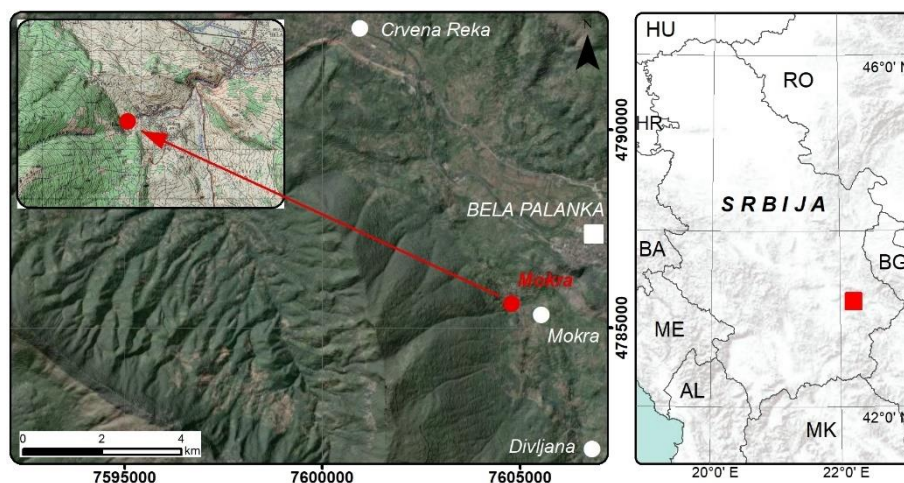
6.3 Karstni hidrogeološki sistem vrela Mokra

Slivno područje vrela Mokra, kao i celokupni karstni masiv Suve planine bio je predmet istraživanja brojnih istraživača, počevši od Jovana Cvijića koji je još krajem 19. i početkom 20. veka opisivao karstne fenomene ovog kraja, ali i cele istočne Srbije. Period između dva svetska rata obuhvatio je mahom istraživanja za potrebe rešavanja lokalnog vodosnabdevanja, dok se nakon Drugog svetskog rata hidrogeološka istraživanja intenziviraju, tako da su tokom 50-ih i 60-ih godina prvo istražene geološke, geomorfološke i pedološke karakteristike terena (Kostić, 1953; Milić, 1962), dok se prvi detaljniji podaci o izdašnostima vrela Suve planine javljaju u radovima Đalovića i Protića (1979), Stevanovića (1981; 1987; 1991; 1994; 1995), odnosno stručnjaka instituta „Jaroslav Černi“, koji su izvodili obimna (hidro)geološka, inženjersko-geološka i hidrološka istraživanja u sklopu izrade studije o mogućnosti kaptiranja karstnih vrela Suve planine za vodosnabdevanje Niša. Karst Suve planine, bio je predmet istraživanja i za potrebe doktorskih disertacija (Stevanović, 1987; Ristić, 2007; Petrović B. 2020). Podaci iz navedenih literaturnih izvora konsultovani su tokom izrade doktorske disertacije.

6.3.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Mokra nalazi se u jugoistočnoj Srbiji, na padinama Suve planine u neposrednoj blizini sela Mokra. Teritorijalno i administrativno pripada Opštini Bela Palanka, a locirano je na 3 km jugozapadno od grada Bela Palanka. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Karpato-balkanidima istočne Srbije (Sl. 6.41).

Vrelo Mokra drenira severoistočne padine Suve planine. Najveća naseljena mesta na širem istražnom prostoru su gradovi Niš, Pirot i Bela Palanka, koji prema aktuelnom popisu stanovništva imaju 260 237, 57 928 i 12 126 stanovnika (RZSS, 2012). Suva planina je jedinstvena po svojoj flori i šumskom ekosistemu, te je prema uredbi iz 2012. proglašena za specijalni rezervat prirode u cilju očuvanja bioloških, predeonih, geoloških i geomorfoloških vrednosti, kao i biološke i geološke raznovrsnosti (Sl. glasnik RS, br. 55/2012, br. 72/2015; Petrović B. 2020).



Sl. 6.41. Geografski položaj vrela Mokra (crvena boja) na karti Srbije i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Bela Palanka T583-4-1

Saobraćajna mreža na širem istražnom prostoru je dobro razvijena (auto-put Beograd – Sofija i Beograd – Atina), a do vrela Mokra može se stići asfaltnim putem od Bele Palanke ka Babušnici. Poljoprivreda i stočarstvo predstavljaju osnovnu delatnost lokalnog stanovništva.

6.3.2 Klimatske karakteristike

Klimatske karakteristike šireg slivnog područja vrela Mokra odgovaraju klimi Suve planine, koja pripada umereno-kontinentalnom tipu klimata u nižoj zoni, dok na višim nadmorskim visinama Suva planina ima karakteristike subplaninske i planinske klime. Na tip klimata direktne uticaje imaju regionalni položaj planine, tj. lokalni faktori koji se ogledaju u morfološkim odnosima planinskih vrhova i kotlina i nizija. Glavne klimatske karakteristike šireg slivnog područja vrela Mokra su topla leta i hladne zime sa dovoljnim i relativno pravilnom vremenskom distribucijom padavina.

Analiza klimatskog režima ovog područja, izvršena je na osnovu podataka o padavinama, temperaturi vazduha, visini snega i brzini i pravcima vetra sa klimatološke stanice Niš za period 2015-2020 god. Ovaj period je razmatran, s obzirom na to da se raspolagalo sa podacima o izdašnosti vrela Mokre za isti period. Stanica Niš se nalazi na nižoj nadmorskoj visini nego što je slučaj sa realnom zonom prihranjivanja karstnog sistema vrela Mokre, međutim, ova stanica je jedina na kojoj postoje dnevni podaci osmatranja padavina, temperature, snežnog pokrivača i brzine i čestine vetra u kontinuitetu i u dužem vremenskom periodu.

U tabeli 6.17 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Niš. Iz tabele se može uočiti da je mesec sa najvećom sumom padavina bio jun 2020. godine sa 186,7 mm pale kiše. Minimalne vrednosti pale kiše su u decembru 2015. godine sa svega 1,7 mm kiše, što je donekle i logično uzimajući u obzir snežne padavine koje imaju primat na području Niša i Suve planine u zimskom periodu. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 516,5 mm 2019. godine do 771 mm, koliko je ukupno palo 2016. godine. Prosečna vrednost padavina koja u periodu 2015 – 2020 mesečno padne na prostor stanice Niš je 53,6 mm, dok je prosečna suma padavina za isti period 643,3 mm/god.

U tabeli 6.18 dat je prikaz maksimalnih mesečnih i srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnjih vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina sa kišomerne stanice Niš.

Iz tabele se može videti da je mesec sa najvećom visinom ukupnog snega bio januar 2019. godine sa 38 cm ukupnog snega, dok je minimalna vrednost ukupnog snega zabeležena u

decembru 2019. i 2020. godine sa 0,1 cm ukupnog snega. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom novembra i decembra. Može se zaključiti da se snežne padavine javljaju od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u periodu januar-mart. Srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega za stanicu Niš za period 2015 – 2020 godina variraju od 2 cm 2020. godine do 14,8 cm, koliko je iznosila suma ukupnog snežnog pokrivača 2018. godine. Prosečna srednjegodišnja vrednost ukupnog snega za period 2015 – 2020. godina je 6,9 cm, uz napomenu da je proračun srednjegodišnjih vrednosti palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.17. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Niš u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (RHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	S
2015	60	45,2	89,5	33,8	40	66	7,5	44,1	58,5	81,3	60,2	1,7	587,8
2016	101,3	45,1	73,7	31,2	90,6	37,3	88,6	31,4	43,6	89,5	129,6	9,1	771
2017	16,6	32,9	37,5	77	88,8	26	23,2	15,1	26,6	87,5	35	142,3	608,5
2018	60,5	47,1	153,9	42,8	62,5	72,2	53,4	33,5	10,8	9,3	35,5	64,3	645,8
2019	88,7	26,4	11,7	36,4	100,8	29,9	82,5	32,1	19,3	4,3	43,4	41	516,5
2020	17,5	42,1	71,5	20,3	67	186,7	78,6	78,6	14,9	89,1	2,8	60,9	730
Prosek	57,4	39,8	73,0	40,3	75,0	69,7	55,6	39,1	29,0	60,2	51,1	53,2	643,3

Tabela 6.18. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Niš u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (RHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	15,0	7,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0
2016	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	2,0	9,3
2017	15,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	2,8
2018	17,0	20,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	19,0	14,8
2019	38,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,4
2020	0,0	8,0	9,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0
Prosek	17,8	7,5	4,8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	5,7	6,9

U tabeli 6.19 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa kišomerne stanice Niš. Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 25,3°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -4,3°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 12,6°C 2016. godine do 13,8°C, koliko je bilo 2019. godine, dok prosečne višegodišnja temperatura vazduha u periodu 2015 - 2020 iznosi 13,1°C.

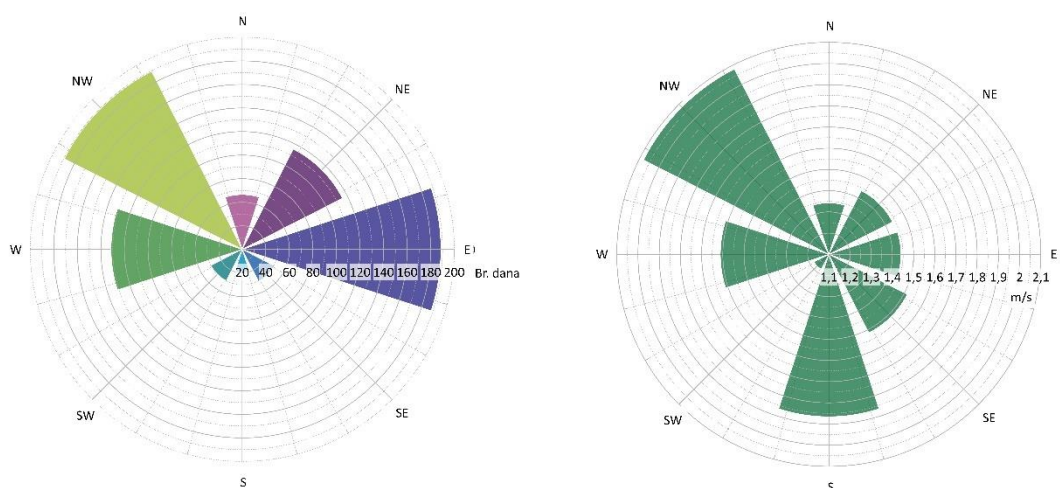
Tabela 6.20 i sl. 6.42 prikazuje vrednosti čestine pravca i brzine vetra u periodu 2015-2020. godine prikupljene sa klimatološke stanice Niš. Za prostor Suve planine karakteristični su vetar *dolnjak* severozapadnog pravca i vetar *gornjak* istočnog pravca, sa jako hladnim i razornim dejstvom, naročito u zimskim mesecima kada spuštaju temperaturu značajno ispod nule (Ducić & Anđelković, 2007), što se vidi na sl. 6.42.

Tabela 6.19. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Niš u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (RHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	2,1	3,6	6,9	11,5	18,4	20,2	25,3	25,0	20,1	12,1	7,7	2,9	13,0
2016	0,5	9,1	8,3	14,9	15,9	22,5	23,4	21,2	18,1	11,1	7,1	-0,5	12,6
2017	-4,3	4,9	10,8	11,5	17,0	22,9	24,7	24,4	18,8	12,2	7,4	3,7	12,8
2018	3,5	3,2	7,2	17,2	19,9	21,2	22,3	24,2	18,5	14,9	8,1	2,1	13,5
2019	-0,2	4,2	10,1	13,8	15,4	23,1	23,4	24,6	19,2	14,6	12,3	4,9	13,8
2020	1,0	6,0	8,4	12,6	16,4	19,8	22,3	22,6	20,3	13,4	6,3	5,9	12,9
Prosek	0,4	5,2	8,6	13,6	17,2	21,6	23,6	23,7	19,2	13,1	8,1	3,2	13,1

Tabela 6.20. Učestalost pravaca i brzine vetrova prema pravcima vetrova u (m/s) osmatranih na stanici Niš u periodu 2015 – 2020. godina (RHMZ). Legenda: N - sever, NE - severoistok, E - istok, SE - jugoistok, SW - jugozapada, W - zapad, NW - severozapad, B - brzina vetra (u m/s), Č - čestina vetra

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B
2015	173	1,4	145	1,5	115	1,4	27	1,7	23	2,2	15	1,6	24	1,6	174	1,9
2016	52	1,5	122	1,4	179	1,5	46	1,5	35	1,9	52	1,1	147	1,6	181	2,1
2017	44	1,2	130	1,4	211	1,3	62	1,6	49	1,8	60	1,1	158	1,9	205	2,2
2018	43	1,2	129	1,6	235	1,7	58	1,5	40	2,1	58	1,0	159	1,4	193	1,9
2019	43	1,4	68	1,3	192	1,3	52	1,3	33	1,6	49	1,2	141	1,7	185	2,2
2020	44	1,3	99	1,4	200	1,5	58	1,5	56	1,6	65	1,1	159	1,5	199	2,2
Prosek	67	1,3	116	1,4	189	1,4	51	1,5	39	1,9	50	1,2	131	1,6	190	2,1



Sl. 6.42. Ruža vetrova (levo) i brzine vazdušnih strujanja (desno) za područje klimatološke stanice Niš u periodu 2015-2020 (prema podacima RHMZ)

6.3.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

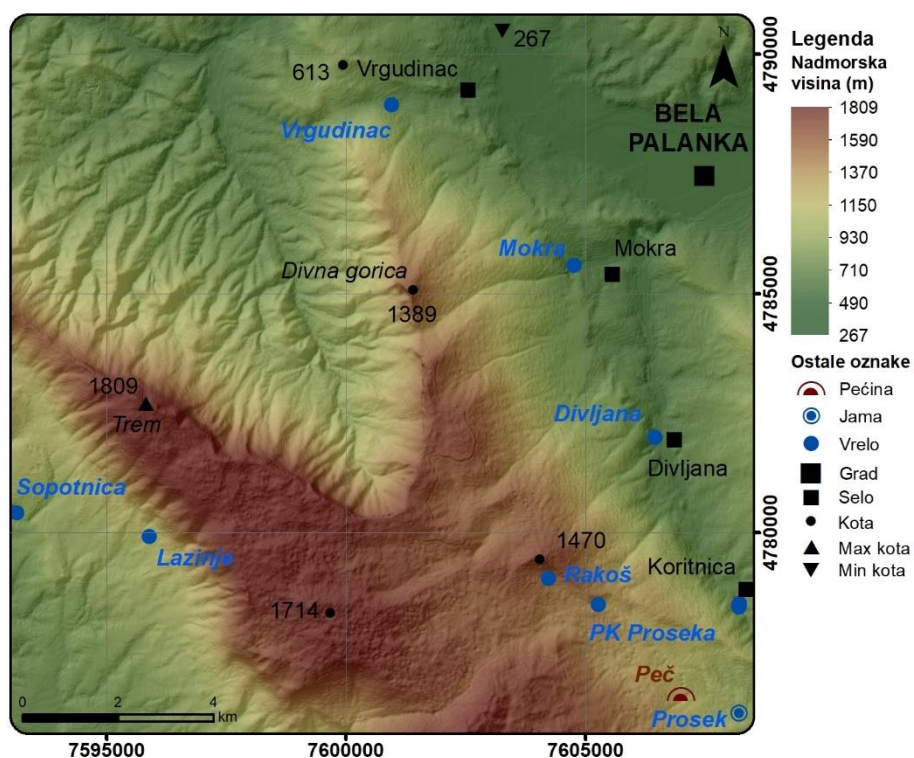
Prostor Suve planine oskudeva u površinskim rečnim tokovima, kako joj i sam naziv govori. Tako i šire slivno područje vrela Mokra, koje se nalazi na prostoru ove planine ne sadrži niti jedan stalni površinski rečni tok, već samo povremene koji se aktiviraju usled obilnih kišnih epizoda u kombinaciji sa vodama nastalim na račun otapanja snežnog pokrivača (Petrović B. 2020). Aktivna rečna mreža prisutna je isključivo u podnožju Suve planine i čine je dva

površinska toka – Koritnička i Mokranjska reka koje pripadaju slivu Nišave, u koju se i ulivaju. Koritnička reka formira se od voda koje izviru na Koritničkim vrelima, dok se nizvodno od vrela Mokra formira površinski tok Mokranjske reke, koja čini levu najnižvodniju pritoku Koritničke reke uzvodno od Bele Palanke.

6.3.4 Geomorfološke karakteristike

Suvu planinu je Cvijić (1912) podelio na tri dela: potkovičasti greben, obluk Crvene reke i površ Valožja, dok kasniji istraživači ističu karstni geomorfološki proces kao dominantan na prostoru Suve planine, koji je omogućio formiranje podzemnih i površinskih karstnih oblika (Petrović J. 1974, 1976; Stevanović, 1987, 1991; Petrović, B. 2020).

Nadmorske visine šireg istražnog područja variraju od 267 mnm u dolini Nišave u okviru Belopalanačke kotline (severoistočno od Bele Palanke), odnosno do 1809 mnm, koliko iznosi Trem, najviša kota Suve planine (Sl. 6.43). Suva planina odlikuje se potkovičastim oblikom na krajnjem severu planine, koja se proteže od sela Ljuberada severnim krakom ka Crvenoj Reci u dolini Nišave, odnosno severozapadnim krakom do Niške Banje (Petrović B. 2020) (Sl. 6.43). Idući južnije planinom, nadmorske visine su u dijapazonu od 1000 do 1600 mnm, pretežno se radi o visoravni prekrivenoj pašnjacima, na kojima je aktivno stočarstvo. Ova planinska područja odlikuju se veoma razuđenim reljefom sa velikim visinskim razlikama, što je posledica geološke građe i tektonike terena, budući da je Suva planina antiklinala, čija su krila izgrađena od krednih krečnjaka, a jezgro od paleozojskih stenskih kompleksa.



Sl. 6.43. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Mokra na kome su vrtače uočljive u vidu sivih tačaka u centralnom delu Suve planine

Među površinskim karstnim oblicima na širem slivnom području vrela Mokra ističu se krečnjački izdanci, koji su prirodno „obrađeni“ abrazivnim dejstvom vode, tako da formiraju *škrapare* ili *žlebove* (Petrović B. 2020). Osim njih, locirane su i vrtače različitih oblika – obično obrasle visokom šumskom vegetacijom, dok se na širem prostoru Suve planine mogu naći i vrtače obrasle niskim rastinjem i travom, bez šumske vegetacije, kakve su karakterističnije za karstne terene.

Podzemni karstni oblici (pećine i jame) nisu previše rasprostranjeni na istočnim i centralnim padinama Suve planine, na kojima se prostire i sliv vrela Mokra, kao što je slučaj sa zapadnim padinama planine, gde Petrović J. (1976) i Cvijić (1912) navode postojanje nekoliko većih pećina i jama. Na istočnim padinama Suve planine nalaze se samo pećina Peč i jama Prosek. Pećina Peč se nalazi na visini od 885 mnm, na oko 2,5 km zapadno do sela Bežište, tunelastog je oblika, duga 20 m, a visoka na najvišem delu 10,5 m (Petrović B. 2020). Jama u Proseku se nalazi na visini 710 mnm, na oko 1,1 km jugozapadno od sela Bežište, dimenzije otvora jame 1,5 x 0,5 metara, dok je dubina jame oko 2 metra (Petrović B. 2020).

6.3.5 Geološke karakteristike

Suva planina predstavlja antiklinalu, čije je jezgro sastavljeno od najstarijih, a krila od najmlađih tvorevina. Najstarije tvorevine predstavljene su devonskim ($D_{2,3}$) i permskim (P) alevrolitima, peščarima i peskovitim glincima, i manjim delom metamorfisanim gabrovima.

Mezozojski sedimenti predstavljeni su trijaskim, jurskim i krednim sedimentima. Trijaski sedimenti su otkriveni samo na krilima antiklinale Suve planine, pripadaju sajskim (T_1^1) i kampilskim slojevima (T_1^2), a izgrađeni su od kvarcnih konglomerata i arkoznih peščara. Srednja jura (J_2) predstavljena je peščarima i laporovitim krečnjacima, a locirana je u vidu uskih, dugih zona na istočnom krilu antiklinale Suve planine. Na prostoru Suve planine, srednjajurski karbonatni i klastični sedimenti skoro po pravilu prelaze u gornjojurske dolomite i dolomitične krečnjake neraščlanjenog oksforda i kimeridža (J_3^{1+2}). Gornjojurski sedimenti koji pripadaju titonskom katu (J_3^3) najveće rasprostranjenje imaju u centralnom delu i na jugoistočnim padinama Suve planine duž ose antiklinale, a predstavljeni su sprudnim i subsprudnim krečnjacima i dolomitima (Vujisić et al. 1971).

Geološki kompleksi sa najvećim rasprostranjenjem na širem slivnom području vrela Mokra pripadaju donjoj kredi. Krila antiklinale Suve planine izgrađena su od donjokrednih krečnjaka valendijsko-otrivskog kata (K_1^{1+2}). Bankovito-slojeviti i masivni donjokredni krečnjaci koji pripadaju barem-aptu (K_1^{3+4}), nalaze se na severoistočnim padinama Suve planine. Locirani su i samostalni aptski klastično-karbonatni sedimenti (K_1^4) u vidu peščara sa interkalacijama ili sočivima jako peskovitih krečnjaka i laporaca (Vujisić et al. 1971).

Gornjooligocenski sedimenti (O_3) nalaze se u podnožju Suve planine i predstavljeni su laporcima i glincima, alevrolitskim peščarima i konglomeratima. Pliocenske tvorevine (Pl) locirane su samo na krajnjem jugoistočnom delu Suve planine, i predstavljeni su krupnozrnim žutim peskovima sa sočivima peskovito-laporovitih krečnjaka. Deluvijalne naslage uočene su samo u podnožju vrha Trešten, u blizini Rakoš česme, u vidu odlomaka krečnjaka i dolomita. Aluvijalne naslage formirane su u dolinama Koritničke (Mokranjske) reke i Nišave u vidu šljunkova, peskova i gline male debljine. Prisutne su takođe i rečne terase (t_1 i t_2), ali samo u dolini Nišave, kao i manje površine izgrađene od proluvijalnih sedimenata.

Antiklinala Suve planine ima pravac pružanja severozapad-jugoistok, sa kasnijim izdizanjem severozapadnog dela, što je rezultat intenzivnih tektonskih karakteristika terena tokom kaledonske, hercinske i alpske orogene faze (Vujisić et al. 1971). Intenzivna tektonska aktivnost doprinela je erodovanju karbonatnih sedimenata gornje jure i donje krede i otkrivanja jezgra antiklinale izgrađenog od devonskih i permskih klastičnih sedimenata.

6.3.6 Hidrogeološke karakteristike

Tip izdani koji ima najveće rasprostranjenje na istražnom području je karstni. U okviru ovog tipa izdani, izdvojene su dve zone prema vodonosnosti krečnjaka – karstni tip izdani veće i manje izdašnosti (Prilog 5). Krečnjaci koji pripadaju oksford – kimeridžu gornje jure svrstani su u karstni tip izdani manje izdašnosti, s obzirom na njihovu lokaciju na Suvoj planini,

tektonski sklop i čistoću krečnjaka (Petrović B. 2020). Sa druge strane, karstni tip izdani veće izdašnosti formiran je u krečnjacima titona i donje krede, koji imaju dominantno razviće na čitavom istražnom terenu i koji zapravo grade karstni sistem vrela Mokre.

Prihranjivanje podzemnih voda koje pripadaju karstnom tipu izdani veće izdašnosti vrši se difuznim prihranjivanjem, tj. infiltracijom kiše i otopljenog snega, s obzirom na to da na istočnom delu Suve planine nije uočen nijedan ponor. Izuzetno, prihranjivanje se može vršiti i punktuono, kada se povremeni površinski tokovi formiraju nakon obilnih kišnih epizoda i poniru preko vrtača i/ili pukotina različitih dimenzija.

U prethodnom periodu, na prostoru istočnog dela Suve planine izveden je samo jedan opit trasiranja podzemnih voda. Petrović J. (1958) navodi opit bojenja toka koji nastaje od Rakoš česme, a koji se gubi nakon nekoliko desetina metara, te se traser pojavljuje na Gornjekoritničkim vrelima, koja su pravolinijski udaljena oko 4,5 km, na osnovu čega se može sračunati fiktivna brzina kretanja podzemnih voda na ovom prostoru od 0,048 m/s, što se uklapa u prosečne brzine cirkulacije karstnih podzemnih voda Karpato-balkanida istočne Srbije (Stevanović, 1991).

Dreniranje podzemnih voda Suve planine najčešće se vrši po obodnim delovima planine, na kontaktu krečnjaka jurske i kredne starosti i vodonepropusnih barijera. Drugim rečima, dreniranje karstnih podzemnih voda vrši se na najnižim tačkama erozionog bazisa, gde se osim isticanja na površinu, može javiti i isticanje u susedne izdani, pre svih intergranularnu izdan. Sa druge strane, dreniranje je moguće i na višim kotama terena, kada karstne podzemne vode nailaze na lokalnu hidrogeološku barijeru, pa dolazi do isticanja podzemnih voda iz tzv. visećih izdani ili epikarstnih delova karstnog hidrogeološkog sistema (Petrović B. 2020).

Najznačajnija vrela Suve planine su vrela Mokra, Divljana, Gornjekoritnička vrela, Bežište, Provaljenik i Vrelo koja se nalaze na istočnim padinama Suve planine, zatim Gornji Dušnik, Sopotnica i Lazinje na zapadnim i Ljuberađska vrela na južnim padinama Suve planine. Severni deo planine odlikuje se manjim brojem izvora male izdašnosti, uz postojanje pojava termalnih voda Niške Banje i Ostrovice (Petrović B. 2020).

Vrelo Mokra nastaje na kontaktu urgonskih krečnjaka i gornjeoligocenskih sedimenata koji predstavljaju hidrogeološku barijeru i erozioni bazis cirkulaciji podzemnih voda ovog dela masiva Suve planine. Takođe, rasedne strukture uslovile su lokaciju isticanja podzemnih voda, a istovremeno i usmeravaju pravac kretanja podzemnih karstnih voda od centralnih delova masiva, tj. od ose antiklinale ka severoistoku. Prihranjivanje se vrši isključivo na račun atmosferskih padavina koje se infiltriraju u centralnim i istočnim delovima Suve planine. Vrelo Mokra je kaptirano za vodosnabdevanje Niša u iznosu od prosečno 200 l/s (Sl. 6.44). Izdašnost vrela oscilira od 100 l/s do preko 4 m³/s. Ono što je karakteristično za vrelo Mokra, minimalne i maksimalne vrednosti isticanja vrela stoje u relaciji 1:3 (Stevanović, 1991; Petrović B. 2020).

Površina sliva vrela Mokra (Prilog 5) ocenjena je na 40 km², na osnovu bilansiranja padavina u vidu kiše i snega, odnosno proračunu efektivne infiltracije i isticanja podzemnih voda, imajući u vidu deficit zemljišne vlage. Delineacija sliva vrela Mokra umnogome je otežana s obzirom na to da je u dosadašnjim istraživanjima najčešće vršeno izdvajanje zajedničkog sliva Mokre i Divljane, budući da ova dva vrela zapravo predstavljaju jedinstven sliv koji vrši internu raspodelu voda u zavisnosti od trenutnog hidrološkog stanja (Stevanović, 1987; 1991; Petrović B. 2020). Naime, zajednički sliv vrela Mokra i Divljana, u koji ulaze i manja vrela koja se nalaze južnije od Divljane iznosi 78 km² (Stevanović, 1987; 1991; Petrović B. 2020), tako da se izdvojenih 40 km² odnosi isključivo na prostor Suve planine na kome se infiltriraju vode koje ističu na vrelu Mokra. Ova površina sliva Mokre se čini logičnom, imajući u vidu dominantan karakter ovog vrela u odnosu na druga, dok je potvrdu ovakvog pristupa moguće naći i u oceni

efektivne infiltracije koja za vrelo Mokra iznosi 56%, što se u potpunosti uklapa sa rezultatima Stevanovića (1987, 1991) i Petrovića B. (2020). Svakako, pouzdaniji podaci o ulaznim parametrima bi se dobili ukoliko bi postojala klimatološka stanica na samoj Suvoj planini, u zoni prihranjivanja vrela, na osnovu kojih bi tako i proračun efektivne infiltracije bio relevantniji. Ipak, podaci sa klimatološke stanice Niš dali su relativno tačne i logične finalne proračune efektivne infiltracije, gubitaka (evapotranspiracije) i površine sliva.



Sl. 6.44. Spoljašnji (levo) i unutrašnji (desno) izgled kaptaze vrela Mokra

6.3.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Mokra

6.3.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

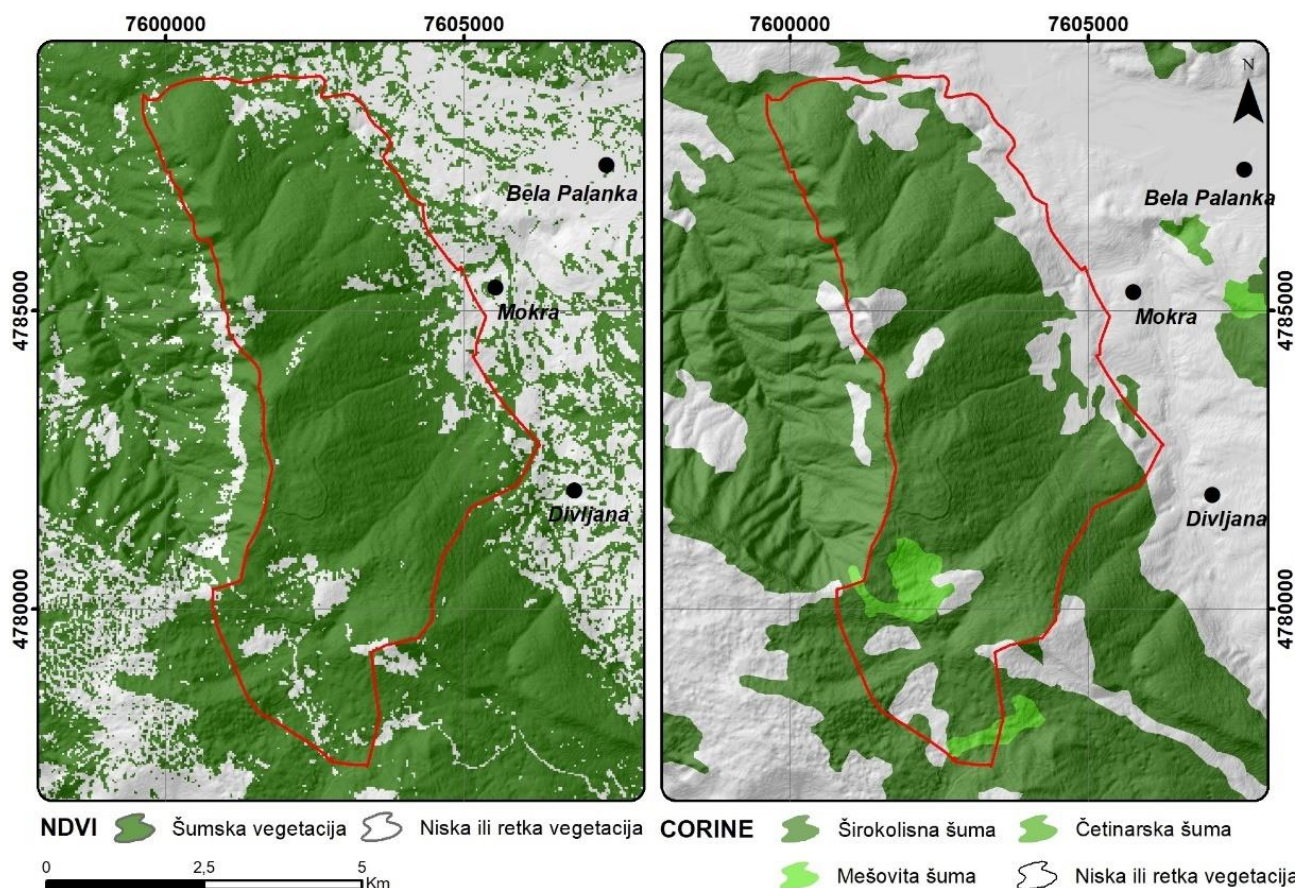
Za slivno područje vrela Mokra, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 88% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 80% sliva (Sl. 6.45). Za finalni vegetacioni indeks uzeta je u obzir aritmetička sredina ove dve vrednosti, te je indeks procenjen na 0,84, što bi značilo da finalna vrednost efektivne infiltracije je sačinjena od 84% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 16% viška vode dolazi sa otvorenih područja sa niskom ili retkom vegetacijom.

Kalibracija deficita zemljišne vlage, efektivne infiltracije i površine sliva je pokazala da maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje vrela Mokra iznosi 20 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Pri proračunu je unapred zadata površina sliva od 40 km² pokazala najbolje poklapanje parametara kalibracije, te je ova vrednost površine sliva i usvojena. Najveći deficit vlage u zemljištu je tokom letnjih meseci, dok se najmanji deficit ostvaruje tokom prolećnih meseci, kada dolazi do značajnijih kišnih padavina i otapanja snežnog pokrivača. Deficit vlage koji je određen u ovom slučaju se mora uzeti sa rezervom, budući da se radi o prosečnoj vrednosti za ceo period osmatranja i da je određen na osnovu ravnoteže efektivne infiltracije i količina istekle vode, koje ne moraju nužno biti jednake.

Tabela 6.21 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabelâ 6.17-6.20), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu Mokra. Takođe, date su i procentualne vrednosti parametara evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

Iz tabele 6.21 uočava se da je vrednost korigovanih padavina i na otvorenim i na područjima pod vegetacijom (Sl. 6.46) značajno veća od izmerenih na meteorološkoj stanici Niš, tako da je prosečna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom za

168,3 mm veća od izmerenih prosečnih suma kiše, dok je na području sa vegetacijom ona veća za 70,8 mm. Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 902,4 mm do 934,2 mm, što ukazuje da je ona veća od bruto izmerenih padavina na prostoru Niša. Vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa dodatim vodenim ekvivalentom snega se kreću od 284,5 mm do 408,1 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 242,6 mm do 363,3 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent iznosilo od 35,9% do 50,6% u pojedinim hidrološkim godinama za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom, odnosno od 36,1% do 49,9% za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **43,4%**, dok je za područja pod vegetacijom **43,9%**.



Sl. 6.45. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva Mokre (prema podacima USGS, snimak zabeležen 8. avgusta 2021. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva Mokre (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Mokra prikazana je crvenom linijom

Ukupni višak vode u zemljištu iznosi od 326,5 mm do 682,8 mm (ili 51,5% do 64,6% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 313,1 mm do 606 mm (ili od 50,1% do 64,3% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **56,9%**, dok je za područja pod vegetacijom **56,5%**. Procentualne vrednosti se uklapaju sa vrednostima koje odlaze na stvarnu evapotranspiraciju, tako da se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan, a praktično isti red veličine gubitaka daju i Stevanović (1987, 1991) i Petrović B. (2020).

Tabela 6.21. Usporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Niš, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Mokra za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Mokra

Parametar	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	686,0	571,9	801,5	536,9	665,9	652,4
PgSWE (mm)	807,0	789,0	1056,8	618,9	832,0	820,7
PgiSWE (mm)	728,9	674,0	942,9	561,9	708,3	723,2
PET (mm)	913,1	902,4	934,2	926,9	917,9	918,9
PET/Pbruto (%)	133,1	157,8	116,6	172,6	137,8	140,8
AETg (mm)	408,1	318,3	379,1	284,5	390,8	356,2
AETg/PgSWE (%)	50,6	40,3	35,9	46,0	47,0	43,4
AETveg (mm)	363,3	287,9	340,7	242,6	353,7	317,6
AETv/PgiSWE (%)	49,8	42,7	36,1	43,2	49,9	43,9
Wi (g) (mm)	415,3	470,2	682,8	326,5	440,2	467,0
Wi (g) / PgSWE (%)	51,5	59,6	64,6	52,8	52,9	56,9
Wi (š) (mm)	383,5	386,0	606,0	313,1	354,9	408,7
Wi (š) / PgSWE (%)	52,6	57,3	64,3	55,7	50,1	56,5
Ief (mm)	388,3	398,6	617,5	315,1	367,7	417,4
Ief/Pbruto (%)	56,6	69,7	77,0	58,7	55,2	64,0
Ief/PgSWE (%)	48,1	50,5	58,4	50,9	44,2	50,9
Ief/PgiSWE (%)	53,3	59,1	65,5	56,1	51,9	57,7
Qsr (m³/s)	0,58	0,53	0,77	0,34	0,4	0,52
Q (mm) (F = 40 km²)	459,84	416,99	604,71	268,39	318,01	413,6
Δ Ief-Q (mm)	-71,5	-18,4	12,8	46,7	49,6	3,9
Q / Ief (%)	118,42	104,61	97,92	85,18	86,50	99,08

Finalne vrednosti efektivne infiltracije su svedene na jedinstvenu vrednost pomoću vegetacionog indeksa od 0,84 za područje Mokre, tako da je vrednost deficita zemljišne vlage kalibrisana do ravnoteže sa vrednostima sloja oticaja na vrelu u mm, uz unapred zadatu vrednost površine sliva vrela Mokra. Procesom kalibracije slivnog područja, vrednosti efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu su tarirane, tako da površina sliva od 40 km² dovodi ove dve veličine u ekvilibrijum. Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 315,1 mm do 617,5 mm. Procentualni odnos efektivne infiltracije i padavina iznosi od 50,9% do 64% u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu, u zavisnosti da li se radi o izmerenim ili korigovanim vrednostima. Ispravnost ovakvog postupka ogleda se u razlici i procentualnom odnosu sloja isticanja i efektivne infiltracije (poslednja dva reda tabele 6.21) koja za celokupni period oktobar 2015 – septembar 2020 iznosi svega 19,3 mm ili 0,92%. Takođe, uočava se da je tokom perioda 2015-2017 isticalo od 4% do 18% više vode nego što je infiltrirano, dok je tokom perioda 2017-2020. godine na vrelu isticalo od 85,18% do 97,92% efektivno infiltriranih količina vode. Razlog za veće isticanja od prihranjivanja tokom perioda 2015-2016 godina može biti posledica prenošenja voda iz prethodne hidrološke godine, koja

nije razmatrana pri analizi za potrebe doktorske disertacije, dok se razlika između infiltriranih i isteklih voda tokom 2018-2019 i 2019-2020 godine može objasniti akumuliranjem viška vode u sistemu. Upporedni prikaz dnevnih vrednosti ulaznih i izlaznih parametara karstnog sistema Mokra dat je na komparativnom dijagramu na sl. 6.46.

Sa pomenutog dijagrama može se uočiti veća vrednosti korigovanih padavina sa vodenim ekvivalentom snega u odnosu na izmerene padavine. Takođe, uočljiva je pojava ciklusa stvarne evapotranspiracije, sa izraženim pikovima tokom vegetacionog perioda u prolećnim i letnjim mesecima. Vrednosti efektivne infiltracije su najveće tokom prolećnih i letnjih meseci, dok praktično odsustvuju tokom letnjih, sušnih meseci. Uočava se i da vrednosti izdašnosti vrela Mokra korespondiraju sa pikovima efektivne infiltracije, što se može videti i u periodu visokih i u periodu niskih voda. Takođe, može se uočiti da visoke vrednosti efektivne infiltracije ne prouzrokuju uvek visoke vrednosti isticanja, što direktno zavisi od stanja rezervi podzemnih voda u sistemu. Naime, ukoliko su rezerve podzemnih voda u sistemu ispražnjene, visoke vrednosti efektivne infiltracije će prouzrokovati niže vrednosti isticanja, budući da će se znatna količina infiltrirane vode potrošiti na popunjavanje rezervi. Pomenuto ukazuje na nelinearni karakter karstnog sistema, a sama činjenica je najočiglednija na hidrogramu nakon recesionog perioda.

6.3.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Ukupna izdašnost vrela Mokra sračunata je kao suma prosečne dnevne zahvaćene količine vode izmerene na vodomeru i visine prelivnog praga u kaptaži, koja je preračunata na osnovu zavisnosti $Q = f(H)$, a sve prema podacima JKP „Naissus“ iz Niša.

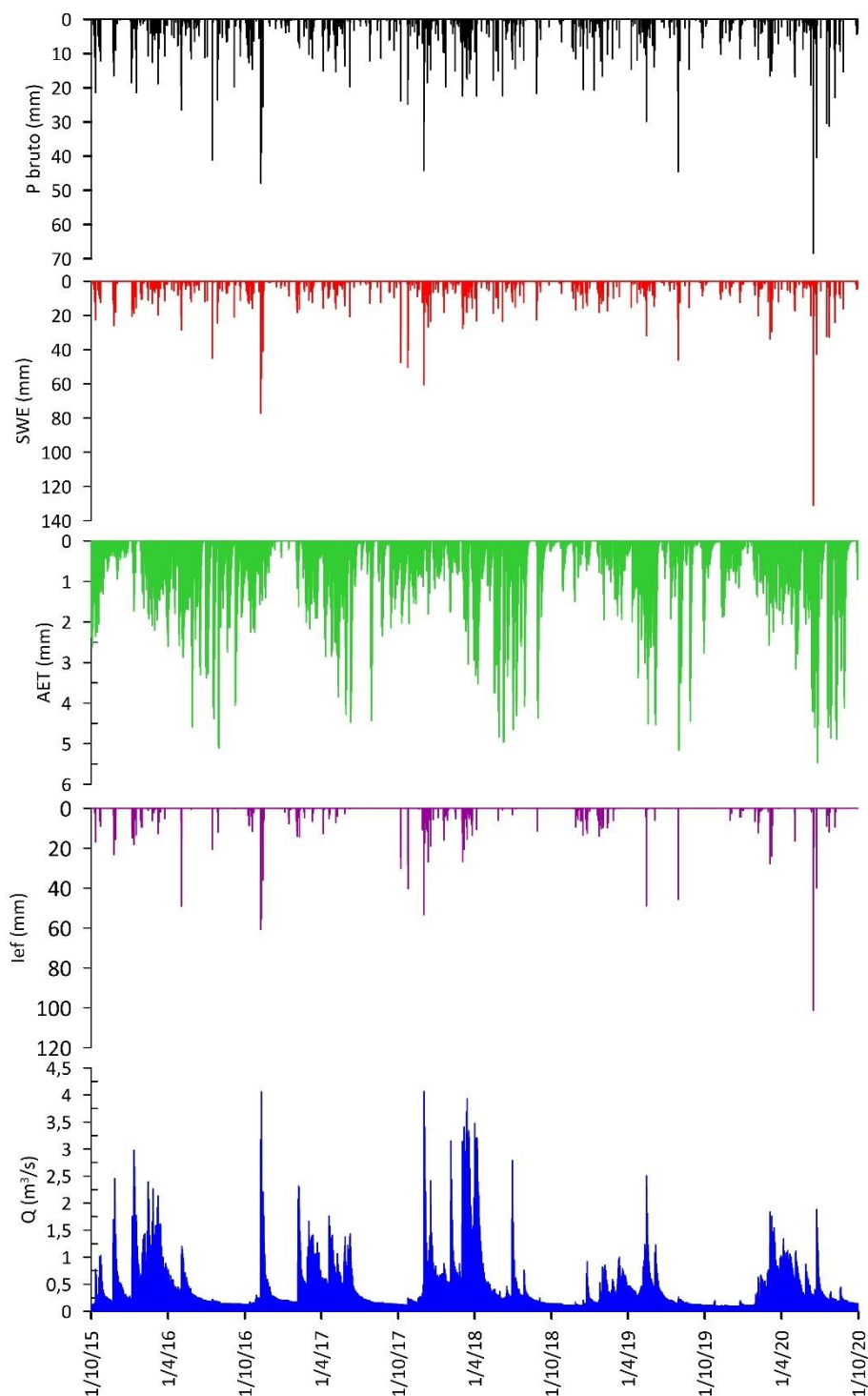
Tabela 6.22 prikazuje osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mokra, i to za svaku pojedinačnu hidrološku godinu, kao i za celokupni period osmatranja 2015 – 2020. godina.

*Tabela 6.22. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mokra za period 2015 – 2020. godine (prema podacima JKP „Naissus“, Niš). Legenda: **N** – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} – srednja vrednost serije; **Mdn** – medijana; **M** – mod; **Min** – minimalna vrednost serije; **Max** – maksimalna vrednost serije; **VAR** – varijansa serije; σ – standardna devijacija; **Cv** – koeficijent varijacije; **Cs** – koeficijent asimetrije*

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
m ³ /s										
2015-2016	366	0,582	0,320	0,137	0,102	2,977	0,301	0,549	94,375	1,584
2016-2017	365	0,528	0,266	0,170	0,105	4,062	0,285	0,533	100,970	2,344
2017-2018	365	0,767	0,402	0,166	0,113	4,062	0,754	0,868	113,228	1,910
2018-2019	365	0,340	0,210	0,124	0,066	2,507	0,094	0,306	89,948	2,777
2019-2020	366	0,402	0,238	0,113	0,081	1,887	0,140	0,374	92,926	1,487
2015-2020	1827	0,524	0,287	0,113	0,066	4,062	0,336	0,580	110,661	2,587

Iz tabele 6.22 može se uočiti da je izdašnost karstnog vrela Mokra u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,066 m³/s do 4,062 m³/s, tako da je srednja vrednost 0,524 m³/s, medijalna 0,287 m³/s, odnosno modalna vrednost 0,113 m³/s, što bi predstavljala najfrekventniju vrednost vremenske serije. Takođe, uočava se da se minimalne vrednosti oscilirale od 0,066 do 0,113 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 1,88 do 4,06 m³/s. Vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju centralnu tendenciju vremenske serije isticanja vrela Mokra, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno. Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini karstnog sistema (Flora, 2004;

Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020), tako da vrelo Mokra pripada klasama *Umereno* i *Visoko razvijeni sistemi*, ukoliko se posmatraju pojedinačne hidrološke godine, dok ako se uzme ceo period, onda vrelo pripada klasi *Visoka razvijenost sistema*, u smislu površine koji zauzima, odnosno veličine karstifikacije.



Sl. 6.46. Upporedni prikaz dnevni vrednosti izmerenih padavina sa stanice Niš, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Mokra u periodu 2015 – 2020

6.3.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

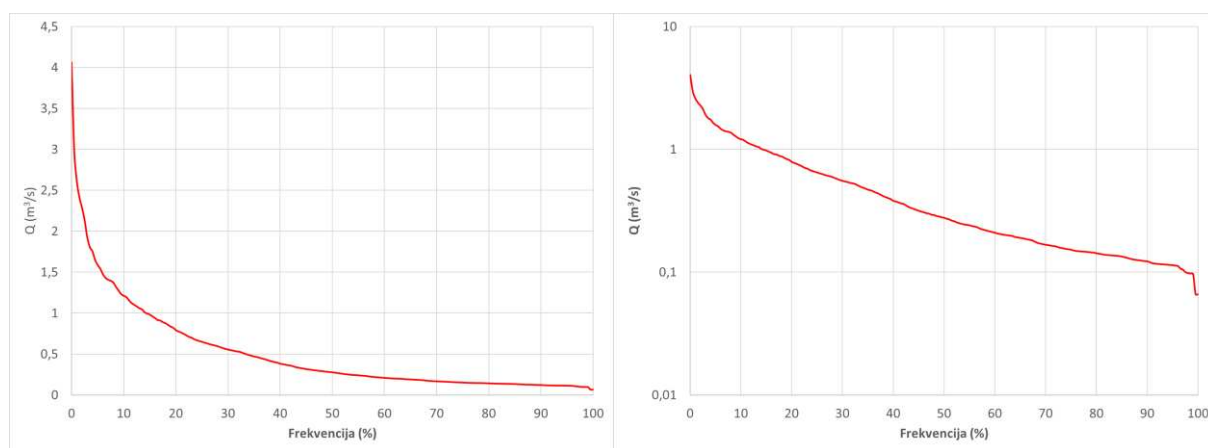
Iz tabele 6.23 može se uočiti da je u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) isticanje na vrelu iznosilo $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$, što u potpunosti korespondira sa medijalnom vrednošću, sračunatom u okviru

analize statističkih parametara. Za analizu sušnih perioda bitne su vrednosti $Q_{95} - Q_{100}$, dok su za analizu poplavnih perioda bitne veličine $Q_0 - Q_1$. Tako, tabela 6.23 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Mokre mogu očekivati vrednosti isticanja od $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{99}) do $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{95}), što bi bilo nedovoljno za očekivanu isporuku voda sa ovog izvorišta stanovnicima Niša, za koje je vrelo Mokra kaptirano. Ipak, Niš ima i dodatne lokacije koje su kaptirane za vodosnabdevanje grada (Divljana, Ljuberađa, Studena, Krupac, Medijana), tako da grad svakako ne bi ostao bez vode. Sa druge strane, poplavni talasi koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_1) na vrelu Mokra. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od $1,21 \text{ m}^3/\text{s}$ do $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{10} do Q_1), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{70} do Q_{95}).

Tabela 6.23. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mokra na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m^3/s

Period	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{30}	Q_{40}	Q_{50}	Q_{60}	Q_{70}	Q_{80}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{99}
2015-2020	2,61	1,59	1,21	0,79	0,56	0,38	0,28	0,21	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10

Analizirajući krive trajanja protoka podzemnih voda na vrelu Mokra (Sl. 6.47), uočava se relativno strm nagib krive za vrednosti frekvencije od 1 do 10%, što ukazuje na dominaciju karstnih kanala i većih pukotina pri transportu voda kroz sistem. Tada je cirkulacija u turbulentnom režimu tečenja, što omogućava brzi protok vode. Suprotno tome, u sušnim periodima godine, dakle sa učestalošću isticanja na nivou $Q_{95} - Q_{99}$, na dijagramu log-normalne raspodele jasno se uočava tačka infleksije nakon koje isticanje rapidno opada. Na osnovu toga se može zaključiti da se u ekstremno sušnim periodima godine isticanje na vrelu Mokra formira isključivo na račun transporta voda kroz matriks stene ili je režim tečenja laminarni kroz isti ili niži sistem kanala.



Sl. 6.47. Krive trajanja protoka vrela Mokra za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) pokazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Mokra iznosi 2,33, ukazujući na nisku varijabilnost isticanja. Sa druge strane, odnos Q_{90} / Q_{50} ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema Mokre, ovaj odnos je 0,43, što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela skoro 45% vode dolazi na račun baznog oticaja.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al., 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Mokra iznosi 9,89, što ovo vrelo svrstava u klasu vrela sa disbalansiranim vrednostima isticanja karstnih podzemnih voda. Ukoliko se ova veličina uporedi sa koeficijentom hidrodinamičke neravnomernosti od 61,5, što predstavlja odnos ekstremnih vrednosti isticanja vrela, može se ustanoviti da je koeficijent varijabilnosti vrela daje realniju sliku odnosa isticanja vrela pri velikim i malim vodama, budući da ne razmatra ekstreme, već učestalost minimalnih i maksimalnih pojava, te je oko 6 puta manji.

6.3.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Definisanje perioda isticanja podzemnih voda bez aktivnog prihranjivanja sistema je izvršeno na osnovu komparativne analize hidrograma vrela Mokra i dijagrama efektivnih padavina, datih na sl. 6.46, gde se jasno uočavaju vremenski periodi tokom letnjih meseci bez efektivne infiltracije. Sl. 6.46 pokazuje da, iako nije bilo efektivne infiltracije tokom izdvojenog recesionog perioda, padavine u vidu kiše su se javljale. Ipak, kiša koja je padala u pomenutim periodima nije bila transformisana u efektivnu infiltraciju, te nije imala značajnijeg uticaja na formiranje isticanja karstnog vrela Mokra, budući da su vrednosti kiše „potrošene“ na zasićenje zemljišne vlage. Na taj način, može se konstatovati da je za karstni sistem vrela Mokra ispunjen teorijski uslov o odsustvu aktivnog prihranjivanja tokom odabranog recesionog perioda.

Tabela 6.24 prikazuje rezultate analize recesionih krivih vrela Mokra za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.24. Rezultati recesione analize karstnog vrela Mokra za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

Godina	Recesioni period	Koeficijent recesije			$V_0 \times 10^6$ (m^3)	$V^* \times 10^6$ (m^3)	$V_{total} \times 10^6$ (m^3)	t (dani)
2015- 2016	16.7. - 23.9.2016	1	α_1	0,0423	V_1	9,45	2,54	4
				0,0023	V_2			14
				0,0012	V_3			52
				ΣV_0	11,99			$\Sigma = 70$
2016- 2017	9.6. - 30.9.2017	1	α_1	0,138	V_1	2,19	3,05	8
				0,0274	V_2			23
				0,0065	V_3			46
				ΣV_0	5,25			$\Sigma = 77$
2017- 2018	28.7. - 30.9.2018	1	α_1	0,1460	V_1	1,03	1,72	5
				0,0307	V_2			19
				0,0103	V_3			41
				ΣV_0	2,74			$\Sigma = 65$
2018- 2019	6.6. - 29.7.2019	1	α_1	0,12	V_1	0,55	1,93	6
				0,067	V_2			8
				0,022	V_3			40
				ΣV_0	2,48			$\Sigma = 54$
2019- 2020	20.8. - 30.9.2020	1	α_1	0,1521	V_1	2,85	0,91	4
				0,0242	V_2			14
				0,0044	V_3			24
				ΣV_0	3,76			$\Sigma = 42$

Posmatrajući celokupni period osmatranja od 2015. do 2020. godine, može se zaključiti da karstni sistem vrela Mokra može aproksimirati sa tri mikrorežima pražnjenja tokom perioda recesije, što je odlika dobro razvijenog i karstifikovanog sistema. Ipak, prvi mikrorežimi

pražnjenja najčešće se ne pokoravaju Majeovoj eksponencijalnoj jednačini, budući da se dešavaju u turbulentnom režimu tečenja, te je korektnije definisati ih kao β režim. Na to ukazuje i red veličine koeficijenta recesije od 10^{-1} u skoro svim recesionim perioda, koji osciliraju od 0,0423 do 0,1521. Sa druge strane, podzemna voda vrela Mokra ističe skoro sigurno u laminarnom režimu tokom trećih mikrorežima pražnjenja, koji se najčešće odlikuje koeficijentima recesije reda veličine 10^{-3} , oscilirajući u dijapazonu od 0,0012 do 0,022. Zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine varira od $0,91 \text{ m}^3$ do $3,05 \text{ m}^3$, tako da prosečna zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine iznosi $2,03 \times 10^6 \text{ m}^3$, što je u skladu sa rezultatima recesione analize izvršene i u istraživanjima Stevanovića (1987; 1991) i Petrovića B. (2020).

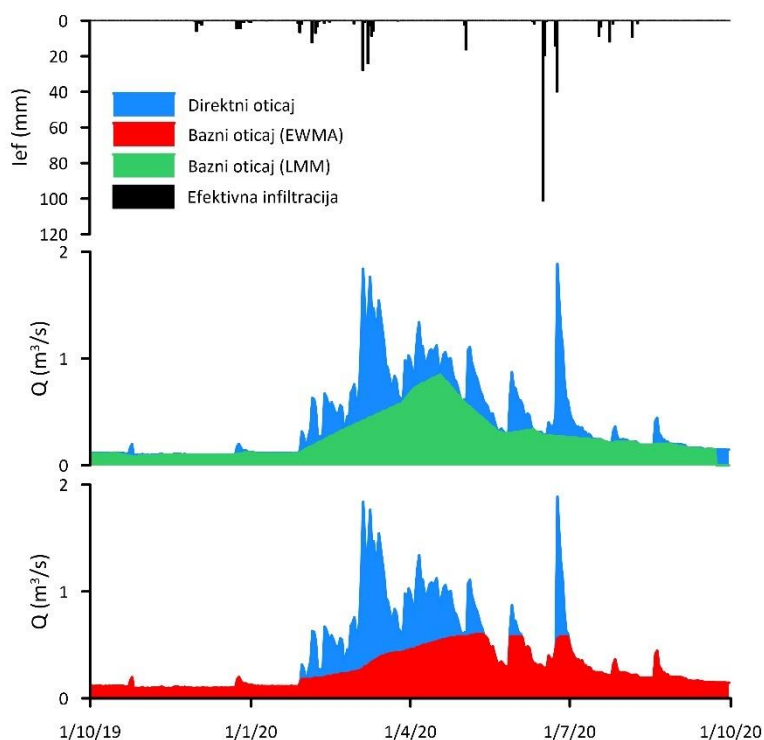
6.3.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

U sklopu primene LMM metode, ustanovljeno je da nakon vrednosti $N=5$ nagib krive opada, tj. poprima praktično linearni karakter, te je ova vrednost uzeta pri razdvajanju baznog oticaja pomoću ove metode. Maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Mokra iznosi $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $0,323 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,04 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,796 što znači da bazni oticaj karstnog sistema vrela Mokra prosečno čini 79,6% ukupnog oticaja, prema LMM metodi.

Primena EWMA filtera uključila je srednju vrednost koeficijenta recesije trećih mikrorežima pražnjenja karstnog sistema vrela Mokra za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.24, budući da je ocenjeno da se treći mikrorežimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena vrednosti koeficijentata recesije trećih mikrorežima iznosi $\alpha_{3av} = 0,009$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Mokra $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $0,332 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,846, što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Mokra prosečno čini 84,6% ukupnog oticaja ovog sistema. Ova vrednost je sličnog reda veličine kao vrednost dobijena primenom LMM metode.

Rezultati primene prethodno pomenuta dva filtera razdvajanja hidrograma pokazuju veoma slične rezultate, što ukazuje na to da oko 80% voda generisanih na slivu Mokre potiče od baznog oticaja, tj. da je karstni sistem vrela Mokra dobro karstifikovan i strukturiran sa značajnim akumulacionim sposobnostima, koje omogućavaju formiranje značajnih rezervi podzemnih voda. S obzirom na veću dozu subjektivnosti koja je uključena kod primene metode lokalnog minimuma, kao finalni kriterijum usvojen je rekurzivni digitalni filter EWMA, budući da uključuje koeficijent recesije.

Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Mokra dati su na sl. 6.48 i to za hidrološku godinu 2018-2019, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 665,9 mm.

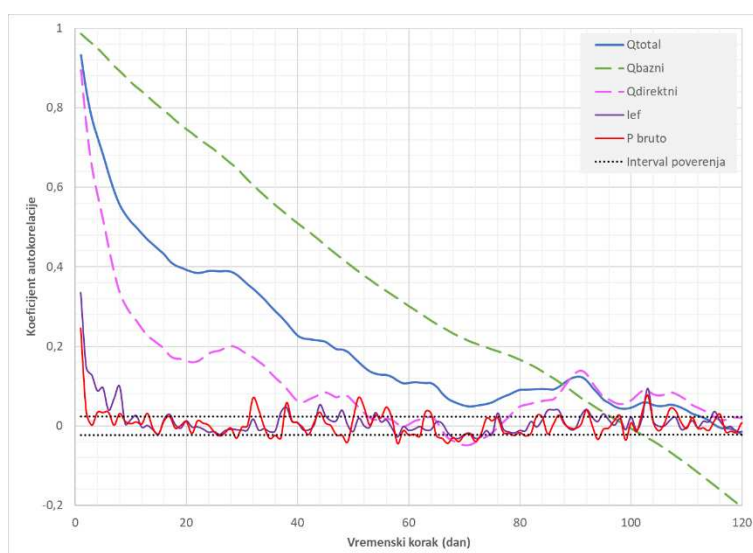


Sl. 6.48. Usporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema Mokre za 2019-2020 god.

6.3.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza je izvršena za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), kao i zasebno za sušnu (2018-2019) i vlažnu (2017-2018) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 120 dana za ukupni period razmatranja, odnosno 100 dana za sušnu i vlažnu godinu.

Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog vrela Mokre, kao i za bruto prispele padavine i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazan je na sl. 6.49, koji pokazuje visoku autokorelisanost vremenskih serija isticanja podzemnih voda ovog vrela. Autokorelogram baznog oticaja ima veoma blagi nagib, što ukazuje na veliku memoriju sistema, odnosno da rezervoar karstnog sistema vrela Mokre ima veliki uticaj na isticanje bazne komponente hidrograma. Veliku memoriju sistema dokazuju i visoki koeficijenti autokorelacije baznog oticaja koji gube statističku značajnost nakon 74 dana, ukoliko se posmatra empirijski prag od 0,2, odnosno 98 dana ukoliko se posmatraju statistički intervali poverenja na bazi 95% verovatnoće. Sve pomenuto ukazuje na dobro razvijen karstni sistem vrela Mokre, i njegov akumulativni kapacitet. Autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja su sinhroni i pokazuju skoro identičan nagib krive, na osnovu čega se može zaključiti da efektivne infiltracije u sistem imaju veliki uticaj na izgled hidrograma vrela Mokre, u smislu da impulsni šokovi izazivaju instantne promene na hidrogramu, najčešće usled prenošenja pritiska novoinfiltrirane vode. Sinhroni pad i praktično isti izgled autokorelograma ukupnog i direktnog oticaja vrela Mokre, ukazuje i na korektnost postupka razdvajanja hidrograma vrela pomoću EWMA rekurzivnog filtera.

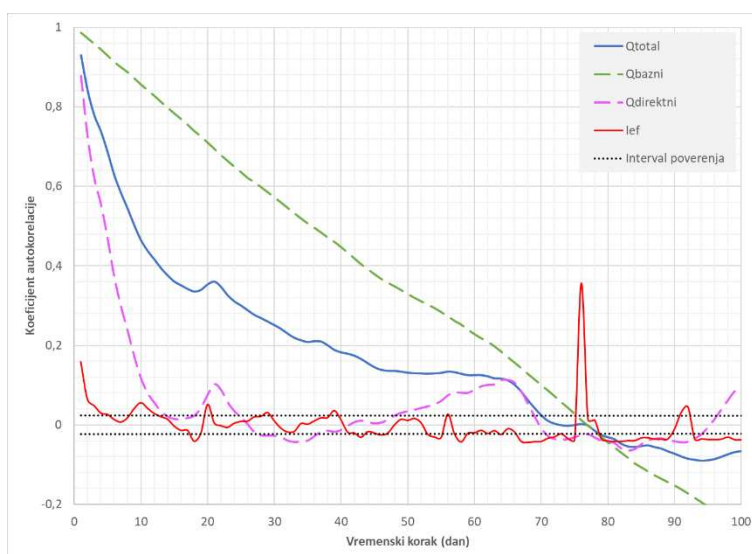


Sl. 6.49. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mokra, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

Ukoliko se posmatra memorija sistema na bazi koeficijenata autokorelacije direktnog oticaja vrela Mokra, može se zaključiti da koeficijenti posle 15 dana postaju statistički beznačajni ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 53 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja. Period od 15 dana se čini logičnijim, budući da se odnosi na memoriju sistema prouzrokovanu jednim talasom efektivne infiltracije, na šta ukazuje konstantan pad koeficijenta, dok sa druge strane, period od 53 dana uključuje i uticaje novih talasa prihranjivanja, što se može videti na konveksnim delovima autokorelograma 24, 45, 66, 90. i 101. dana. Konveksni delovi autokorelograma se mogu uočiti i kod direktnog i kod ukupnog oticaja, što jasno ukazuje da su ovi pikovi izazvani uticajem prihranjivanja. Strmi nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja (od 1. do 8. i od 28. do 40. dana) ukazuje na pražnjenje karstnog sistema kroz dominantne karstne kanale, dok se blagi nagibi odnose na pražnjenje sistema kroz matriks krečnjaka ili niže kanale sa slabim hidrostatičkim pritiskom, što potvrđuje i konstantan blagi nagib autokorelograma baznog oticaja. Statistička značajnost ukupnog oticaja vrela Mokre prestaje nakon 45 dana, što je u skladu i sa prethodnim istraživanjima (Petrović, B. 2020). Autokorelacija izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije pokazuje slučajnu prirodu ove promenljive, tako da statistička značajnost bruto padavina prestaje nakon samo dva dana, dok su koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije nešto viši. Takođe, može se primetiti da efektivna infiltracije nekoliko puta se vraća u opseg značajnosti, izazivajući i povećanje autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja.

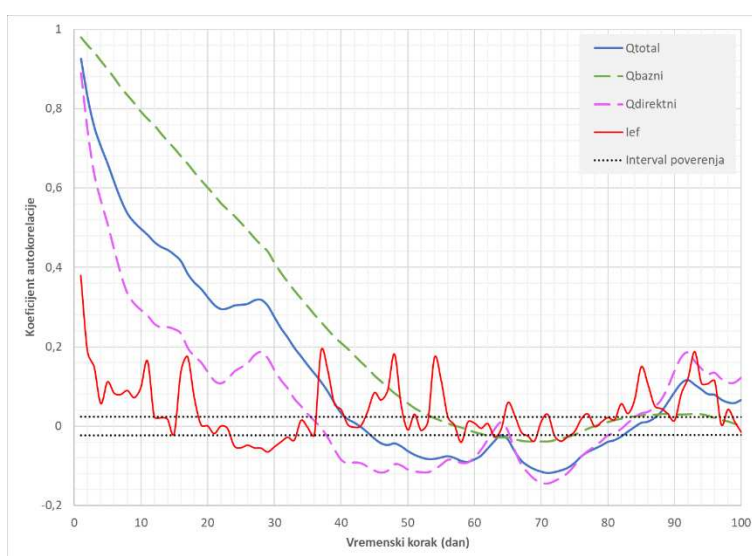
Sl. 6.50 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Mokre, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2018 – 2019, koja je ocenjena kao sušna godina. Sa dijagrama je još uočljivija zavisnost ukupnog i direktnog oticaja od efektivne infiltracije, sa jasnim poklapanjem pikova ulaznih signala sa izlaznim 20. i 39. dana. Na sl. 6.62 može se uočiti da autokorelogram ukupnog oticaja prvih 8 dana ($r_k < 0,2$) pokazuje uticaj direktne komponente hidrograma, da bi nakon tog perioda, ukupni oticaj više odgovarao nagibu autokorelograma baznog oticaja, što je i očekivano budući da se radi o sušnoj hidrološkoj godini, kada je isticanje podzemnih voda generalno formirano više na račun baznog oticaja, tj. vode koja je već u sistemu. Pik 21. dana, uočljiv na autokorelogramu direktnog i ukupnog oticaja je posledica prihranjivanja novoinfiltriranim vodama. Autokorelogram baznog oticaja nedvosmisleno pokazuje veliku memoriju i akumulativnu moć karstnog sistema Mokre od 63 dana ($r_k < 0,2$), odnosno 76 dana ako se uzmu u obzir intervali poverenja. Autokorelogram efektivne infiltracije je zadržao slučajnu prirodu i cikličnost pojavljivanja, jasno pokazujući

uticaj na formiranje oticaja vrela Mokre, na šta ukazuje izraziti pik autokorelacije 76. dana koji nije imao uticaja ni na jednu komponentu hidrograma vrela.



Sl. 6.50. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mokra i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2018 – 2019)

Sl. 6.51 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Mokra, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2017 – 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina.



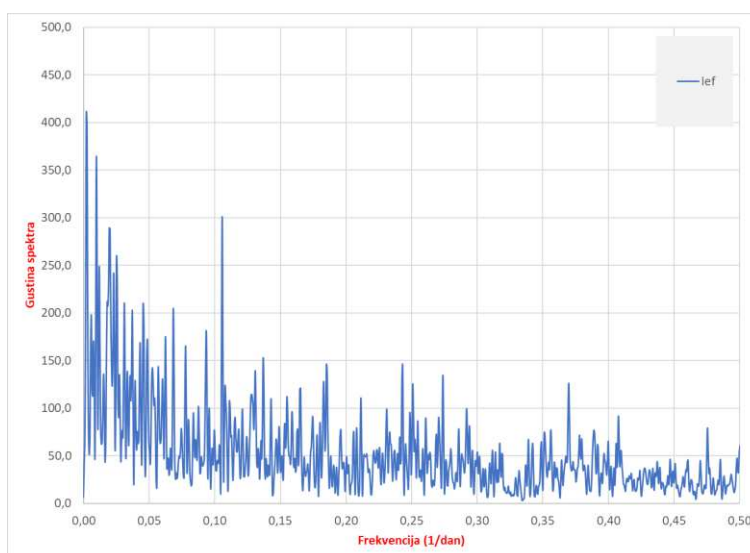
Sl. 6.51. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mokra i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

Sa sl. 6.51 uočava se brza propagacija isticanja podzemnih voda kroz karstne kanale tokom vlažne hidrološke godine, tako da je nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja strmi u prvih 8 dana. Statistička značajnost se gubi posle 17, odnosno 33 dana za direktni i ukupni oticaj ($r_k < 0,2$). Sinhroni pik autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja 28. dana ukazuje na uticaj prihranjivanja sistema. Ponovno povećanje koeficijenta autokorelacije izvan praga poverenja je nakon 91. dana, što može ukazivati na vreme neophodno za popunjavanje rezervi podzemnih voda karstnog sistema, isteklih tokom recesionog perioda.

Strmiji nagib autokorelograma baznog oticaja nego što je slučaj za sušnu godinu, ali i ceo period osmatranja ukazuje brže pražnjenje sistema tokom vlažne godine, pod uticajem veće količine

vode koja je akumulirana u sistemu. Na to ukazuje i najkraća memorija sistema baznog oticaja od svih razmatranih perioda (40 dana za $r_k < 0,2$), nakon čega se jasno uočava pad što ukazuje na ispražnjenost karstnog sistema. Pikovi autokorelograma efektivne infiltracije koji se javljaju od 38. do 65. dana ukazuju na prihranjivanje sistema koje je „potrošeno“ na popunjavanje rezervi podzemnih voda, budući da nije uočena reakcija nijedne komponente hidrograma na impuls. Ipak, sinhrona reakcija autokorelograma baznog, direktnog i ukupnog oticaja javlja se nakon 72. dana, tj. sa 7 dana zakašnjenja, dok prethodno prvu reakciju pokazuju direktni i bazni oticaj, budući da je cirkulacija kroz više karstne kanale brža usled njihove veće poroznosti od matriksa krečnjaka i nižih kanala sa slabijim pritiskom u kojima se formira bazni oticaj sistema.

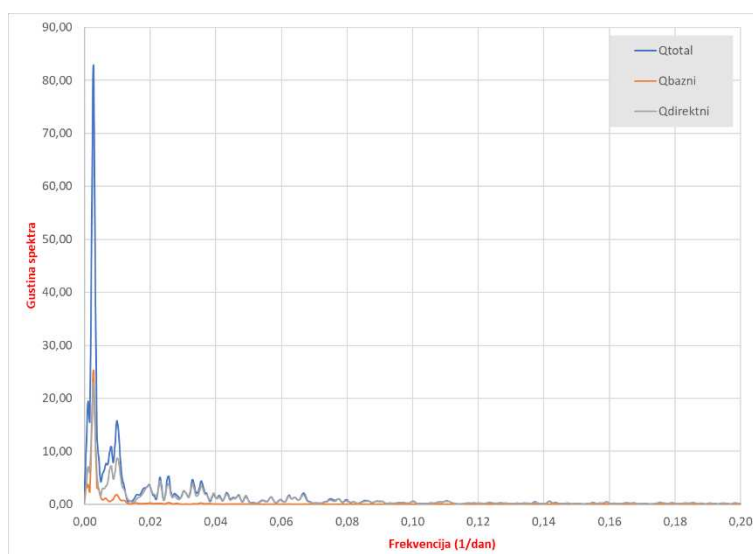
Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Mokra prikazana je na sl. 6.52, sa koje se mogu uočiti 5 najfrekventnijih pikova koji pokazuju cikličnost vremenske serije. To su vrednosti 0.002191, 0.002738, 0.009858, 0.012048 i 0.105696 dan^{-1} , koji odgovaraju vremenskim periodima od 456 dana, 365 dana, 101 dan, 83 dana i 9 dana, respektivno. Drugim rečima, prvi pik 0.002191 koji odgovara vremenskom periodu od 456 dana pokazuje 15-mesečnu cikličnost efektivne infiltracije. Drugi (0.002738) odgovara periodu od 365 dana, pokazujući godišnji ciklus, dok treći i četvrti pik (0.009858 i 0.012048) odgovaraju kvartalnom periodu od 101, tj. 83 dana. Poslednji pik (0.105696) koji odgovara periodu od 9 dana ukazuje na minimalni obnavljajući period prihranjivanja karstnog sistema Mokre na račun efektivne infiltracije od padavina. Frekvencije iznad od 0.1 dan^{-1} predstavljaju slučajni karakter efektivne infiltracije karstnog sistema Mokre.



Sl. 6.52. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Mokre za period 2015 – 2020

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu EWMA filtera za ceo period osmatranja (2015 – 2020) i prikazan je na sl. 6.53. Sa dijagrama 6.53 može se videti da se pikovi direktnog i ukupnog oticaja javljaju pri niskim i srednjim frekvencijama, dok se spektr baznog oticaja nalazi samo u niskim frekvencijama. Spektr direktnog i ukupnog oticaja se javlja u frekventnom opsegu ispod 0,12 dan^{-1} , sa karakterističnim pikovima za ukupni oticaj od 0.001095, 0.002191, 0.002738, 0.003834 i 0.009859 za odgovarajuće periode od 913, 456, 365, 260 i 101 dana. Ove vrednosti i periodi ukazuju na dvoipogodišnji, 15-mesečni, godišnji i četvoromesečni ciklus ukupnog oticaja. Praktično isti pikovi, tj. u istom frekventnom opsegu se javljaju i za direktnu komponentu hidrograma, odnosno za spektralnu funkciju gustine efektivne infiltracije. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine baznog oticaja pokazuje niže frekvencije (0.000548, 0.001095, 0.002738, 0.003834 i 0.004381) koje odgovaraju broju dana od 1826, 913, 365, 260

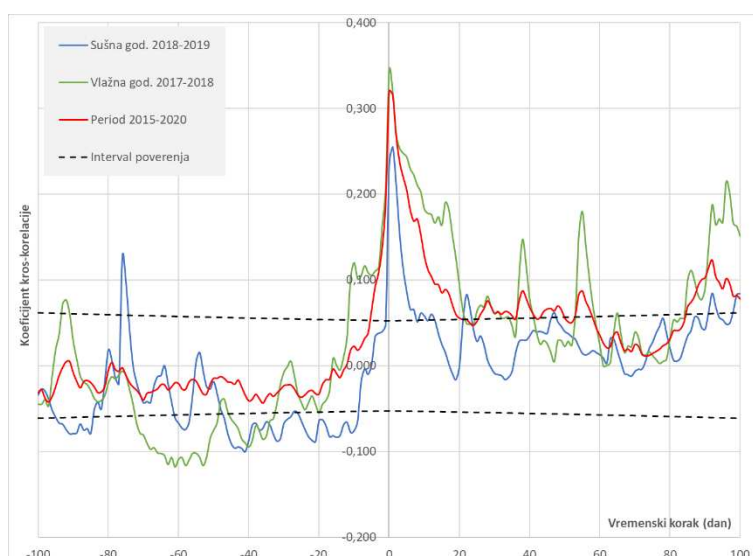
i 228. Dakle, može se zaključiti da se vrednosti baznog oticaja javljaju u dužim ciklusima koji odgovaraju petogodišnjim, dvoipogodišnjim, godišnjim i devetomesečnim ciklusima.



Sl. 6.53. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema vrela Mokra u periodu 2015 – 2020 godina

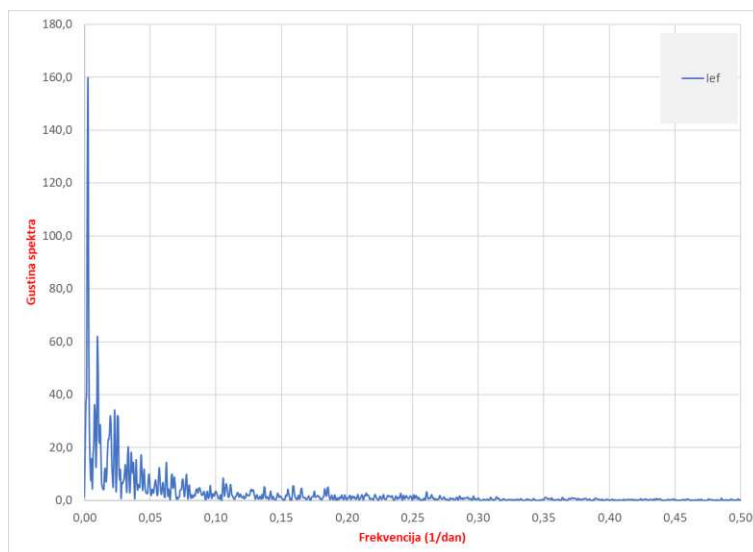
Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od 0.015 dan^{-1} , spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi statistički značaj, što odgovara broju dana od 67, dok statistička značajnost direktnog oticaja prestaje nakon frekventnog opsega od 0.12 dan^{-1} , što odgovara periodu od 8 dana. Tako, može se zaključiti da direktni oticaj ima dominantan uticaj u spektralnom opsegu ukupnog oticaja vrela Mokra, jasno utičući na konačan izgled hidrograma vrela Mokra.

Kros-korelogram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Mokra prikazan na sl. 6.54 pokazuje interesantne rezultate koji se ogledaju u centriranosti, odnosno asimetriji funkcije u zavisnosti od hidrološke godine, tj. stanja rezervi u sistemu. Naime, na sl. 6.54 može se uočiti centriranost kros-korelacione funkcije za vlažnu hidrološku godinu, odnosno za ceo period razmatranja, što ukazuje na instantnu reakciju sistema na ulazni impuls. Razlog tome su najverovatnije popunjenje rezerve podzemnih voda u sistemu, koje pri nailasku novoinfiltrirane vode automatski uzrokuju reakciju vrela, usled prenošenja pritiska. Slikovito bi se to moglo objasniti fenomenom pune čaše koja bi krenula sa prelivanjem dodavanjem samo jedne nove kapljice vode. Naime, jasno je da nova kap ne može prouzrokovati snažnu reakciju vrela, međutim s obzirom na značajne rezerve, reakcije je prisutna usled prenošenja pritiska i inercije. Sa druge strane, pozitivna asimetrija kros-korelograma tokom sušne godine ukazuje na ispražnjenost sistema čija reakcija na novoinfiltriranu vodu se prvo ogleda u zasićenju sistema vodom, pa tek nakon toga reakcijom na vrelu. Otuda i asimetrija dijagrama i period zakašnjenja reakcije vrela na ulazni impuls od dva dana. Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0,2 (Mangin, 1984; Ristić Vakanjac, 2015), statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 3 dana, u vlažnoj godini nakon 9 dana, dok tokom celog perioda značajnost prestaje nakon 5 dana, što pokazuje na vreme reakcije slivnog područja na intenzivnu kišnu epizodu. Slični rezultati dobijeni su i u analizama koje navodi Petrović B. (2020). Pikovi koji se javljaju oko 18, 40, 58. i 90. dana ukazuju na cikličnost ulaznog signala (efektivne infiltracije) (Padilla & Pulido-Bosch, 1995), što generalno potvrđuje rezultate spektralne analize.



Sl. 6.54. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Mokra za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

Kros-amplitudna funkcija koja uključuje vremenske serije efektivne infiltracije i izdašnosti karstnog vrela Mokra prikazana je na Sl. 6.55. Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,32 \text{ dan}^{-1}$ (3 dana), što pokazuje dominantan uticaj direktne komponente hidrograma na njegov izgled.

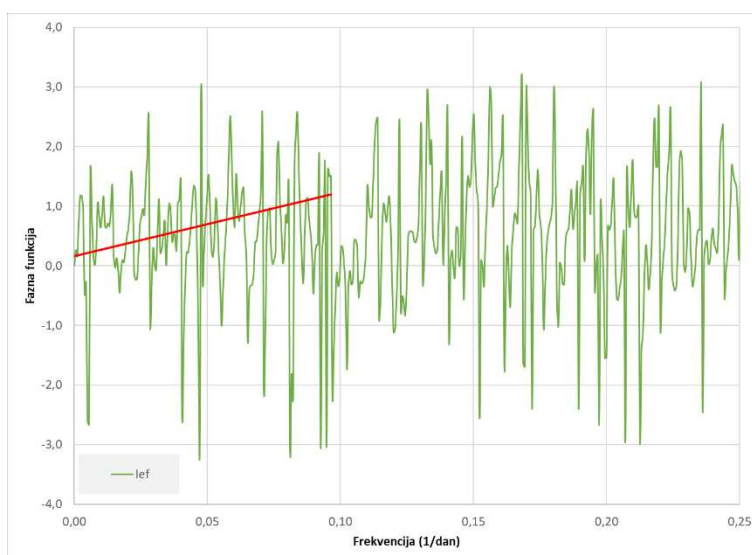


Sl. 6.55. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Mokra za period 2015 – 2020. godina

Pikovi u visokofrekventnom opsegu ($f > 0,1$) pokazuju značajan uticaj efektivne infiltracije na direktan oticaj i njegovu funkciju u formiranju ukupne izdašnosti vrela Mokra, kao i na mogućnost amortizacije jakog impulsnog signala (visokih vrednosti efektivnih infiltracija) nakon inicijalnog uticaja direktnog oticaja na sistem. Frekvencije koje se javljaju u visokofrekventnom opsegu i koje odgovaraju direktnom oticaju su 0,105696, 0,159365 i 0,185652 koje odgovaraju periodu od 9, 6 i 5 dana, respektivno. Sa druge strane, visoke oscilacije pikova u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, odnosno ukazuju na značajne rezerve u sistemu. U okviru niskofrekventnih opsega mogu se uočiti pikovi od 0,002738, 0,009858, 0,023001, 0,033406, 0,06432 koje odgovaraju periodima od 365 dana (godišnji ciklus), 101 dana (kvartalni ciklus), 43 i 29 dana dan (mesečni ciklus) i 15 dana (polumesečni ciklus). Slične vrednosti se mogu uočiti i pri spektralnoj analizi efektivne

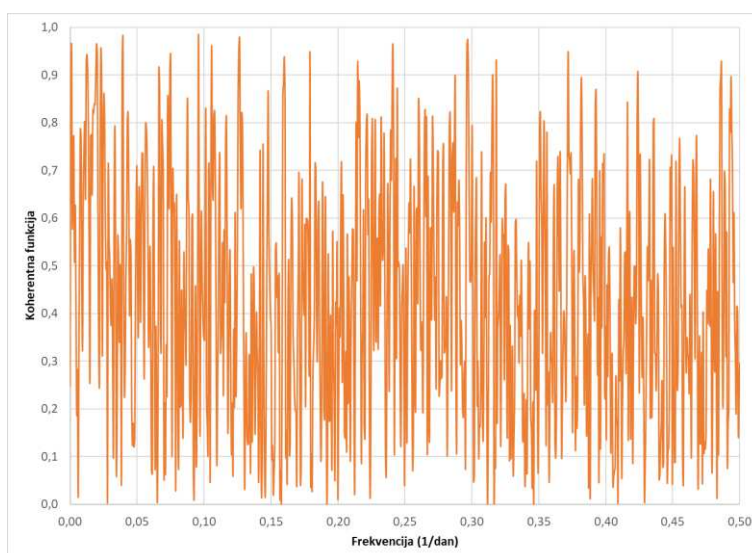
infiltracije (Sl. 6.64), što ukazuje na to da karstni sistem Mokre ima veliku moć transformacije ulaznog signala u izlazni.

Fazna funkcija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mokra prikazana je na sl. 6.56, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri visokim frekvencijama ($f > 0.1$), dok se izvestan pozitivan linearni trend javlja pri niskim i srednjim frekvencijama. Ovaj pozitivni trend prikazan je na sl. 6.83 crvenom linijom, tako da obuhvata frekventni opseg od 0 do 0.096933, što odgovara periodu od 10 dana, tako da pomenuti period odgovara kašnjenju odziva sistema na impulsni signal, što se generalno slaže sa rezultatima dobijenim kros-korelacionom analizom za vlažnu hidrološku godinu i kros-amplitudnom analizom.



Sl. 6.56. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mokra za period 2015-2020

Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mokre, prikazana na sl. 6.57, ukazuje na izrazito nelinearan karakter karstnog sistema, tako da srednja koherentna vrednost 0.43 ukazuje na značajnu akumulativnu sposobnost i dobro strukturiran i karstifikovan karstni sistem Mokre.

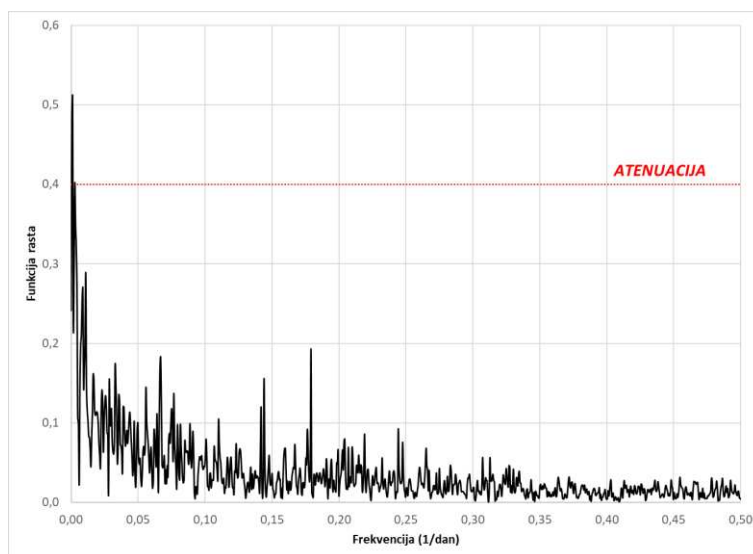


Sl. 6.57. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mokra za period 2015-2020

Koherentna funkcija pokazuje da karstni sistem Mokre sadrži značajne rezerve podzemnih voda, koje veliki delom ističu na vrelu u vidu baznog oticaja. Takođe, koherentnom funkcijom

su dokazani i rezultati razdvajanja hidrograma oticaja, koji su pokazali da bazni oticaj vrela Mokre čini 84,6% ukupnog oticaja na vrelu, prema EWMA filteru. Pomenuti rezultati koherentne funkcije mogu delovati kontradiktorno sa rezultatima spektralne i kros-amplitudne funkcije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, budući da one ističu značajan uticaj direktne komponente hidrograma. Međutim, radi se o činjenici da direktni oticaj ima značajnu ulogu u formiranju izgleda hidrograma, tj. kao inicijalni impuls maksimalnim pikovima izdašnosti, tokom kojih svakako ističe i bazni oticaj, kao glavni pokretač podzemnih voda u sistemu. Tako, radi se o međusobno komplementarnim funkcijama koje potvrđuju značajan rezervoar karstnog sistema Mokre, ali i uticaj direktnog oticaja. Tome u prilog ide i činjenica koje se može uočiti sa dijagrama koherentne funkcije (Sl. 6.57), a odnosi se na značajan pad koherentnih vrednosti u frekventnom opsegu od $0,14 \text{ dan}^{-1}$ (tj. 7 dana), što odgovara uticaju direktnog oticaja na ukupni sistem, a što je takođe saglasno sa rezultatima prethodnih analiza.

Sl. 6.58 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Mokra, pokazujući da su sve vrednosti funkcije ispod 1, što potvrđuje dominantnu ulogu baznog oticaja u formiranju rezervi podzemnih voda karstnog sistema Mokre. Dijagram takođe pokazuje vrednosti funkcije rasta iznad 0,4, što je prag koji definiše uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, nakon čega karstni sistem u potpunosti vrši atenuaciju ulaznog signala i formira bazni oticaj (Padilla & Pulido-Bosch 1995). Imajući to u vidu, može se videti da se poslednji pik iznad 0,4 javlja pri frekvenciji od 0,002738 što odgovara periodu od 365 dana. Međutim, ova vrednost se ne može uzeti kao period uticaja direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj, s obzirom na veoma dugačak vremenski korak. Kao reprezentivi uticaja direktnog oticaja mogu se uočiti pikovi od 0,182724 i 0,193000 koji odgovaraju periodima od 5 dana, što se uklapa u prethodne rezultate uticaja direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj podzemnih voda karstnog sistema Mokre.



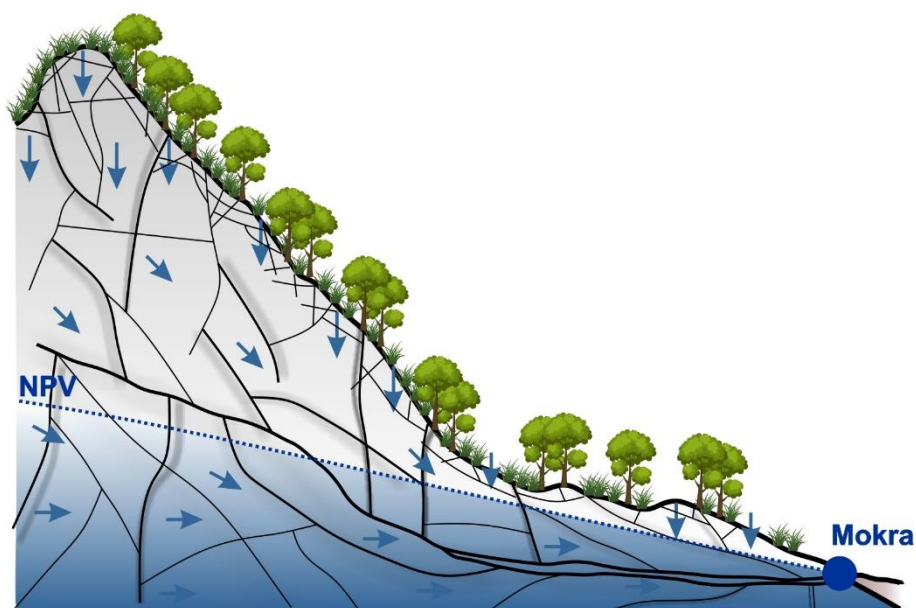
Sl. 6.58. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mokra za period 2015-2020

Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se uočiti da je karstni sistem vrela Mokra dobro karstifikovan i da postoji dominantan karstni kanal kojim se voda doprema do vrela. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 723,2 mm na područjima sa vegetacijom, do 820,7 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 417,4 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2020 iznosi 918,9 mm, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 317,2 mm do 356,2 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 43,4% na području bez vegetacije, tj. 43,9% na prostoru sa

vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,84, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 43,5%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 56,5% (56,9% na prostoru vez vegetacije, tj. 56,5% na prostoru sa vegetacijom).

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 0,066 m³/s do 4,062 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 0,287 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 2,61 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 0,1 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti tri mikrorežima pražnjenja, od kojih se prvi najčešće dešava u turbulentnom (β) režimu, dok se ostali mikrorežimi javljaju u laminarnom (α) režimu. Prosečna zapremina istekle vode iznosi nešto više od $2,03 \times 10^6 \times \text{m}^3/\text{s}$. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema EWMA filteru iznosi 0,332 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 84,6% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Analiza vremenskih serija isticanja i efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Mokra ukazala je na mehanizam funkcionisanja karstnog sistema. Naime, u zavisnosti od hidrološke godine, tj. stanja rezervi u sistemu, atenuacija ulaznog signala biće veća ili manja, odnosno reakcija impulsa izazvanog kišnom epizodom i efektivnom infiltracijom biće brža ili sporija. Kroskorelaciona analiza je pokazala da kada je sistem napunjen, dolazi do momentalne reakcije vrela na prihranjivanje, dok se zakašnjenje od dva dana javlja u sušnoj godini kada se prvo vrši popunjavanje rezervi koje su istekle u prethodnom periodu, pa tek kada se sistem dovoljno napuni, dolazi do reakcije na vrelo. Takođe, izgled kroskorelograma ukazuje na jedan dominantan kanal kojim se voda transportuje kroz sistem do vrela (Sl. 6.59) dok je sistem manjih kanala i pukotina i matrične poroznosti stenske mase međusobno povezan.



Sl. 6.59. Konceptualni model karstnog sistema vrela Mokra

Tokom recesionog perioda, podzemne vode ističu kroz matriks stene i kroz karstne kanale u uslovima oslabljenog hidrostatičkog pritiska, u vidu baznog oticaja, kada vladaju laminarni hidraulički uslovi cirkulacije. Analizom hidrogramâ vrela Mokra, ustanovljeno je da se pri kritičnim vrednostima isticanja nižim od $Q_{kr} = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ javljaju laminarni uslovi tečenja, dok pri vrednostima višim od kritične vrednosti hidraulički režim prelazi u turbulentni pri čemu se veoma brzo dešavaju veliki skokovi isticanja podzemnih voda. Kritična vrednost isticanja je duplo manja od medijalne i vrednosti Q_{50} , dok je analizom krive trajanja protoka ustanovljeno

da kritična vrednost zapravo odgovara isticanjima podzemnih voda koje se javljaju u 80% vremena (Q_{80}). Drugim rečima, kritična vrednost od $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ u 80% analiziranog vremena (2015-2020 god) se javlja na vrelu, što generalno korespondira i sa indeksom baznog oticaja, čime je potvrđena pretpostavka o značajnom rezervoaru karstnog sistema vrela Mokre. Takođe, kroskorelogram baznog oticaja u vlažnoj godini pokazuje da memorija sistema za ovu komponentu gubi statističku značajnost 54. dana, a da je ona ponovo u okviru intervala poverenja 91. dana, što bi značilo da je potrebno oko 37 dana da se sistem napuni, tj. da se obnove dinamičke rezerve u okviru karstnog sistema vrela Mokra.

6.3.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokra

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokra izvršena je na osnovu hemijskih analiza A obima koje JKP „Naissus“ vrši tri puta mesečno i analiza V obima koje ista institucija vrši jednom mesečno. Sve analize su izvršene u periodu 2015 – 2018. godine.

Hemijske analize pokazuju da su podzemne vode karstnog sistema vrela Mokra izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, bez boje, ukusa i mirisa, budući da su svi hemijski parametri u svim analizama ispod maksimalno dozvoljene koncentracije. Jedini hemijski parametar koji može biti iznad dozvoljenih granice jeste mutnoća, koja se obično povećava pri nailasku velikih vrednosti efektivne infiltracije uzrokovane obilnim kišnim epizodama ili otapanjem snežnog pokrivača, na šta ukazuje i Petrović B. (2020) navodeći podatak o povišenoj mutnoći podzemnih voda vrela Mokra barem tri puta godišnje u trajanju od nekoliko dana.

Pored mutnoće, može se uočiti i povišena koncentracija bakterija, koja ukazuje na mikrobiološko zagađenje karstnog sistema vrela Mokre, a koje su najčešće povezane sa povećanjem izdašnosti vrela tj. intenzivnijem izlučivanju kišnice. Na osnovu komparacije izdašnosti i koncentracije bakterija u podzemnim vodama vrela Mokra, može se zaključiti da se najčešće koliformne bakterije i streptokoke fekalnog porekla javljaju pri povećanju izdašnosti vrela (Petrović. B, 2020).

Neznatne oscilacije kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema Mokra ukazuje na postojan kvalitet ovih voda, koje su uniformne u vremenu. Temperatura vode oscilira od $13,9$ do $15,5^\circ\text{C}$, što je više od prosečne godišnje temperature vazduha izmerene na stanici Niš. Povišena temperatura podzemnih voda vrela Mokre može biti posledica njihovog dužeg boravka u podzemlju (Petrović, B. 2020). Stevanović (1987; 1991) takođe ističe povišenu temperaturu podzemnih voda ovog vrela, na osnovu čega je svrstava u klasu subgeotermalnih voda.

Vrednosti mutnoće variraju od $0,29$ do $0,9 \text{ NTU}$, na osnovu čega bi se moglo reći da je vrednost uvek ispod maksimalno dozvoljenih granica. Međutim, kako je već navedeno u prethodnom tekstu, pojave povišene mutnoće se javljaju u vezi za intenzivnim kišnim epizodama i povišenim vrednostima izdašnosti podzemnih voda u trajanju od nekoliko dana. Detaljnije o uzročno-posledičnim vezama povišene mutnoće, padavina i izdašnosti biće dato u poglavlju 6.3. koje razmatra simulacioni model kvaliteta podzemnih voda vrela Mokra na osnovu vrednosti mutnoće.

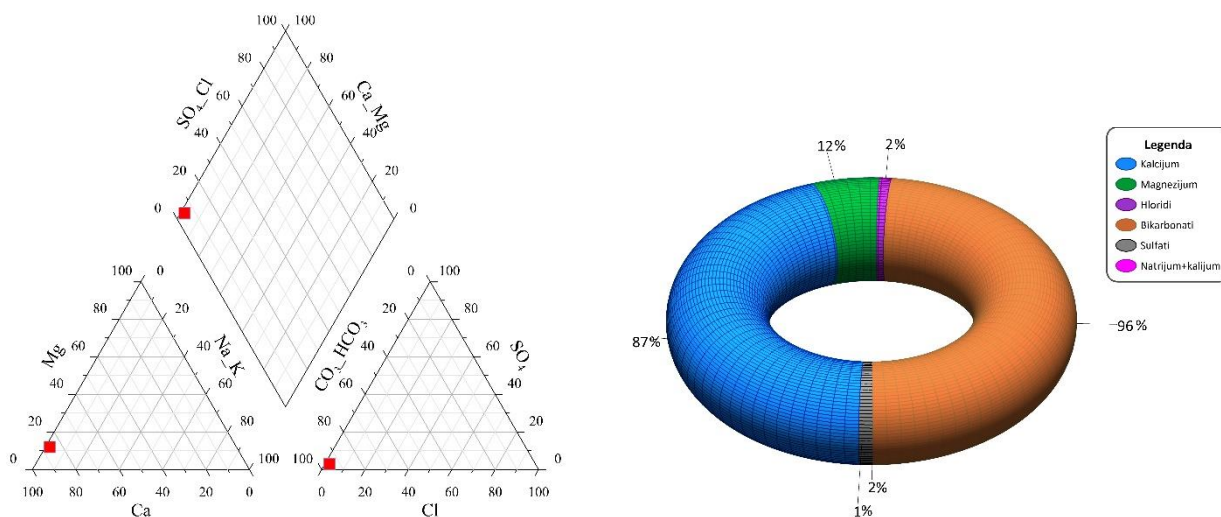
Varijacija pH vrednosti praktično odsustvuje, budući da je uvek reda veličine $7,3$, odnosno da je u granicama neutralnosti. Specifična provodljivost je takođe konstantna tokom celog perioda osmatranja i varira u granicama od 467 do $486 \mu\text{S}/\text{cm}$. Odsustvo značajnije fluktuacije vrednosti specifične provodljivosti ukazuje na cirkulaciju podzemnih voda kroz karstne kanale koji dublje zaležu, i na koje zemljište i epikarst više nemaju uticaj (Petrović B. 2020). Ukupna mineralizacija podzemnih voda karstnog sistema Mokre oscilira od $309 \text{ mg}/\text{l}$ do $328 \text{ mg}/\text{l}$, što ukazuje da se radi o malomineralizovanim vodama. Sadržaj organske materije u podzemnoj vodi vrela Mokra iskazan kroz utrošak kalijum-permanganata sve vreme je ispod MDK i varira

od 2,1 do 2,4 mg/l. Sadržaj analiziranih mikrokomponenti je ispod MDK, što ukazuje na neopterećenost podzemnih voda metalima, ali i antropogenog faktora i izuzetan prirodni kvalitet ovih voda, budući da je i vrednost nitrata daleko ispod MDK (red veličine 3 mg/l).

Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (395,64 – 437,85 mg/l ili prosečno 96%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 91,46 do 94,02 mg/l, tj. prosečno 87%ekv. Od ostalih makrokomponenti ističu se magnezijum (5,91 – 8,43 mg/l ili prosečno 12%ekv) od katjona, tj. sulfati (6,23 mg/l – 9,1 mg/l ili prosečno 2%ekv). Interesantna pojava može se uočiti pri analizi promena koncentracije hidrokarbonata, kalcijuma i magnezijuma sa promenom izdašnosti. Imajući u vidu da su ova tri jona glavna u formiranju hemijskog sastava podzemnih voda vrela Mokra, uočava se povećanje koncentracije hidrokarbonata i kalcijuma i smanjenje sa smanjenjem izdašnosti (u recesionim uslovima), dok su koncentracije magnezijuma obrnuto proporcionalne izdašnosti vrela Mokra (Stevanović, 1987; 1991; Petrović, B. 2020).

Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokra, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2015-2018, dat je na Pajperovom i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.60), kao i formulom Kurlova (6.3).

$$CO_{4,02}M_{0,32} \frac{HCO_{96}^3}{Ca_{87}Mg_{12}Na + K_1} pH_{7,35} TV_{14,77} T_{14,8} Q_{524} \quad (6.3)$$



Sl. 6.60. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog vrela sistema Mokra na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (JKP „Naissus“)

Na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokra, koje su izrađene u periodu 2015-2018 godine, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim dosta tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom neispravnnošću usled pojave mezofilnih i koliformnih fekalnih bakterija, sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema. Niske oscilacije fizičko-hemijskih parametara, mikro- i makrokomponenti ukazuju na postojan hemizam voda u vremenu i izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda karstnog sistema Mokra, koji najviše zavisi od čistoće krečnjaka koji sačinjava sistem i kroz koji voda cirkuliše na svom putu od zone prihranjivanja do zone isticanja (Petrović, B. 2020). Takođe, kao finalni zaključak može se ustanoviti da regionalno gledano, podzemne vode karstnog sistema Mokra u potpunosti odgovaraju hemizmu karstnih voda Karpato-balkanida (Stevanović, 1987; 1991; Milanović, 2010; Vasić, 2017, Petrović B. 2020).

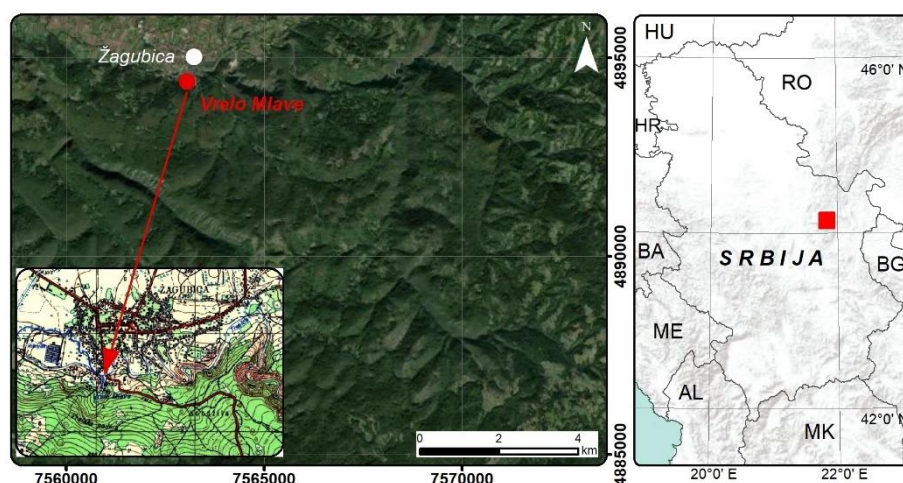
Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu Mokre, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 6 ovog rada.

6.4 Karstni hidrogeološki sistem vrela Mlave

Vrelo Mlave predstavlja karstno vrelo sa najdužim nizom osmatranja izdašnosti u Srbiji. Samim tim, vrelo Mlave se može smatrati kao vrlo dobro izučeno karstno vrelo, koje se istražuje još od Cvijića (1895, 1896). Ipak, detaljna hidrogeološka istraživanja intenziviraju se posle Drugog svetskog rata, kada je instalirana i hidrološka stanica na samom mestu isticanja, ali i na nekoliko mernih profila nizvodno. Istraživanja su vršena i kao primenjena i kao fundamentalna, naučna istraživanja za potrebe izrade nekoliko doktorskih disertacije (Stevanović, 1987; Ristić, 2007; Milanović S. 2010; Vasić, 2017). Osim pomenutih disertacija, najviše hidrogeoloških informacija o vrelu Mlave može se dobiti iz radova Stevanovića (1981; 1991; 2010b), Stevanovića et al. (1986; 2012), Dragišića (1989), Milanovića S. (2007), Milanović S. & Vasić (2014), Milanović S. et al. (2016), Ristić Vakanjac et al. (2012). Podaci iz prethodno navedenih radova korišćeni su kao ulazni podaci i osnova za dalja istraživanja u okviru doktorske disertacije. S obzirom na to da vrelo Mlave predstavlja dobro izučeni karstni sistem, rezultati simulacije režima ovog vrela su iskorišćeni i za transfer ka relativno neizučeni terenima. Drugim rečima, oni su preneti na primere vrela Pirotske kotline, kako bi se i na ovim karstnim terenima ocenio uticaj klimatskih promena na režim karstnih podzemnih voda (Ristić Vakanjac et al. 2012).

6.4.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Mlava nalazi se u istočnoj Srbiji, na severnim padinama Beljanice, oko 1 km južno od Žagubice. Teritorijalno i administrativno pripada Opštini Žagubica. Najveća naseljeno mesto na istražnom prostoru je Žagubica, koja prema aktuelnom popisu stanovništva ima 2 590 stanovnika, dok cela opština ima nešto manje od 13 000 (RZSS, 2012), dok je slivno područje vrela skoro nenaseljeno. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Karpato-balkanidima istočne Srbije (Sl. 6.61). Nizvodno od vrela formira se površinski tok reke Mlave, koja je jedna od najvećih i najznačajnijih reka istočne Srbije.



Sl. 6.61. Geografski položaj vrela Mlava (crvena boja) na karti Srbije i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Žagubica T482-4-1

Vrelo Mlave drenira masiv Beljanice, koja čini deo Kučajsko-beljaničkog masiva, prvobitno proglašenog za park prirode zbog svojih izuzetnih prirodnih karakteristika i bogatog biljnog i životinjskog sveta (Vasić, 2017), da bi početkom 2022. godine severni deo (Beljanica i severni deo Kučaja) bio proglašen za nacionalni park, odlukom resornog ministarstva. NP „Kučaj-

Beljanica“ odlikuje se raznovrsnim diverzitetom ornitofaune, čime je ovaj NP ušao na listu međunarodno značajnih mesta za ptice, dok je takođe i na listi EMERALD mreže zbog prisustva značajnog broja ugroženih biljnih i životinjskih vrsta i prirodnih staništa¹⁸. Trenutno je u postupku pokretanje zaštite I, II i III nivoa na prostoru celog nacionalnog parka.

Saobraćajna mreža na širem istražnom prostoru je solidno razvijena, imajući u vidu relativnu blizinu auto-puta Beograd-Niš, odnosno magistralnog puta Požarevac-Žagubica-Bor. Do vrela Mlave je veoma lako doći, budući da postoji asfaltni put. Stoga, ovo vrelo, koje je na listi nacionalnih prirodnih spomenika, predstavlja i turističku atrakciju ovog dela Srbije. Poljoprivreda i stočarstvo predstavljaju osnovnu delatnost lokalnog stanovništva na slivnom području vrela, dok na širem istražnom području postoji rudnik mrkog uglja „Jasenovac“ u Krepoljini, koji posluje u sklopu JP „Resavica“ za podzemnu eksploataciju uglja.

6.4.2 Klimatske karakteristike

Klimatske karakteristike šireg slivnog područja vrela Mlave odgovaraju umereno-kontinentalnom tipu klimata u nižim delovima terena (ispod 800 mm), dok se u područjima sa nadmorskom visinom iznad 800 m javlja prelaz ka planinskom tipu klimata, koji je karakterističan po dugim i hladnim zimama i relativnom toplim letima (Ristić, 2007; Vasić, 2017). Na klimatske karakteristike, stoga, veliki uticaj ima reljef terena, tj. regionalni položaj Kučajsko-beljaničkog masiva i pozicija Žagubičke kotline.

Analiza klimatskog režima ovog područja, izvršena je na osnovu podataka o padavinama, temperaturi vazduha, visini snega i brzini i pravcima vetra sa klimatološke stanice Crni Vrh za period 2015-2020 god, koja raspolaže najdužim nizom osmatranja. U prethodnim primerima, petogodišnji periodi su bili analizirani iz razloga što se tim obimom podataka o izdašnosti raspolagalo za konkretno vrelo. Međutim, klimatološka stanica Crni Vrh je uspostavljena 60-ih godina prošlog veka, kada i merni profil na vrelu Mlave, što ovo vrelo čini jedinim u Srbiji sa toliko dugim nizom osmatranja (skoro 60 godina). Ipak, kako bi se mogla izvesti komparativna analiza sa ostalim primerima za koje se raspolaže samo petogodišnjim periodom, i vrelo Mlave i stanica Crni Vrh su analizirani samo za period 2015-2020. godina, iako bi svakako relevantniji podaci i rezultati bili na osnovu analize celokupnog perioda od 60 godina. Ova stanica je u nadležnosti RHMZ Srbije, nalazi se na visini od 1037 mm, u blizini slivnog područja vrela Mlave, te se može smatrati reprezentativnom.

U tabeli 6.25 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Crni Vrh. Iz tabele se može uočiti da je mesec sa najvećom sumom padavina bio avgust 2018. godine sa 246,4 mm pale kiše. Minimalne vrednosti kiše su bile u decembru 2015. godine sa svega 4,2 mm, što je i očekivano, budući da su na Crnom Vrhu tokom zimskih meseci dominantne snežne padavine. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 623,1 mm 2017. godine do 904,4 mm, koliko je ukupno palo 2016. godine. Prosečna vrednost padavina koja je u periodu 2015 – 2020 mesečno pala na prostor stanice Crni Vrh je 64,9 mm, dok je prosečna godišnja suma padavina za isti period 778,3 mm/god.

Tabela 6.25. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Crni Vrh u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označene maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (RHMZ, preuzeto sa meteomanz.com)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	58,6	52,5	73,8	55,3	71,7	62,9	10,1	65,3	116,9	141,4	51,5	4,2	764,2
2016	65,4	53,7	98,1	56,4	136,5	119,0	63,6	69,7	28,3	102,4	88,1	23,2	904,4

¹⁸ Izvor: <https://www.ekologija.gov.rs/obavestenja/zastita-prirode/obavestenje-o-postupku-pokretanja-zastite-u-nacionalnom-parku-kucaj-beljanica-0>; posećeno 26.7.2022. godine

2017	33,2	23,2	37,2	49,8	106,0	39,9	14,8	77,4	46,6	93,9	36,9	64,2	623,1
2018	35,1	82,9	91,7	40,8	85,8	100,2	50,4	246,4	11,1	15,6	38,1	59,0	857,1
2019	77,5	24,1	8,0	75,3	137,2	82,7	98,1	17,5	37,0	35,0	104,5	43,1	740,0
2020	14,4	62,3	86,2	17,4	96,9	119,0	90,2	73,5	27,7	89,8	24,6	79,2	781,2
Prosek	47,4	49,8	65,8	49,2	105,7	87,3	54,5	91,6	44,6	79,7	57,3	45,5	778,3

Analizirajući pluviometrijski režim na stanici Crn Vrh, Stevanović (1987; 1991) navodi prosečnu godišnju sumu padavina za period 1970-1979 od 904 mm, Ristić (2007) analizira period 1961-2000 i navodi prosečnu sumu od 783,6 mm, dok Vasić (2017) analizira nešto duži niz (1967-2012), navodeći prosečnu sumu padavina sa iste stanice od 800,7 mm. Iz ovoga se može zaključiti da prosečna suma padavina u razmatranom periodu (2015-2020) zadržava istorijski red veličina, ali sa blagim negativnim trendom. Takođe, uočava se da se prosečne godišnje sume padavina tokom 70ih godina prošlog veka (Stevanović, 1987; 1991), javljaju kao maksimalne vrednosti tokom perioda osmatranja 2015-2020. godine, dok maksimalne sume padavina u pomenutom periodu nijednom nisu prešle 1000 mm/god, što nije bio slučaj ranijih godina. Trend opadanja prosečnih godišnjih suma padavina navode i Ristić Vakanjac et al. (2012) ističući prognozu da će do kraja 21. veka, ove vrednosti na stanici Crni Vrh biti za oko 55 mm manje nego što je slučaj tokom perioda 1966-2010. godina.

U tabeli 6.26 dat je prikaz maksimalnih mesečnih i srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnjih vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina sa klimatološke stanice Crni Vrh. Iz tabele se može videti da je mesec sa najvećom visinom ukupnog snega bio decembar 2017. godine sa čak 165 cm ukupnog snega, dok je minimalna vrednost ukupnog snega zabeležena u oktobru i novembru iste godine sa 2 cm ukupnog snega. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom novembra i decembra. Može se zaključiti da se snežne padavine javljaju od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u periodu januar-mart, odnosno da snežna sezona na Crnom Vrh najčešće traje 7, izuzetno 8 meseci. Srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega za stanicu Crni Vrh za period 2015 – 2020 godina variraju od 20,6 cm 2016. godine do 51 cm, koliko je iznosila suma ukupnog snežnog pokrivača 2015. godine. Prosečna srednjegodišnja vrednost ukupnog snega za period 2015 – 2020. godina je 32,9 cm, uz napomenu da je proračun srednjegodišnjih vrednosti palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg. Ova vrednost nalazi se između srednjevišegodišnjih vrednosti snežnog pokrivača koje navode Ristić (2007) od 15,9 cm, Stevanović (1987;1991) od 49 cm i Vasić (2017) od 80,28 cm za predmetnu stanicu.

Tabela 6.26. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Crni Vrh u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (RHMZ, preuzeto sa meteomanz.com)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	46,0	62,0	59,0	74,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,0	31,0	51,0
2016	41,0	26,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	14,0	20,6
2017	70,0	56,0	12,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	165,0	46,3
2018	25,0	88,0	100,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	49,0	50,0
2019	71,0	47,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	19,0	32,4
2020	15,0	21,0	77,0	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	31,0	31,3
Prosek	44,7	50,0	47,0	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	13,2	51,5	32,9

U tabeli 6.27 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Crni Vrh. Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 20,5°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -8,4°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 7,8°C 2017. godine do 9°C, koliko je bilo 2019. godine, dok srednji višegodišnji prosek za period 2015-2020 godina iznosi 8,3°C. Ukoliko se ove vrednosti uporede sa rezultatima prethodnih analiza, može se zaključiti da je srednja višegodišnja vrednost temperature vazduha porasla za čitav stepen Celzijusa, budući da Stevanović (1987; 1991) navodi prosečnu godišnju temperaturu od 6,9°C za period 1976-1979, Ristić (2007) navodi srednje višegodišnju temperaturu od 6,5°C za period 1961-2000. godina, dok Vasić (2017) navodi srednjevišegodišnju temperaturu od 7,1°C za period 1997-2012. godina. Može se zaključiti da se generalno radi o pozitivnom trendu temperaturnog režima ovog područja i generalno višim temperaturama vazduha, čime se može potvrditi prognoza Ristić Vakanjac et al. (2012) o porastu prosečne godišnje temperature vazduha na stanici Crni Vrh do kraja 21. veka za 3,1°C, što se očigledno već dešava.

Tabela 6.27. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Crni Vrh u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (prema podacima RHMZ, preuzeto sa meteomanz.com)

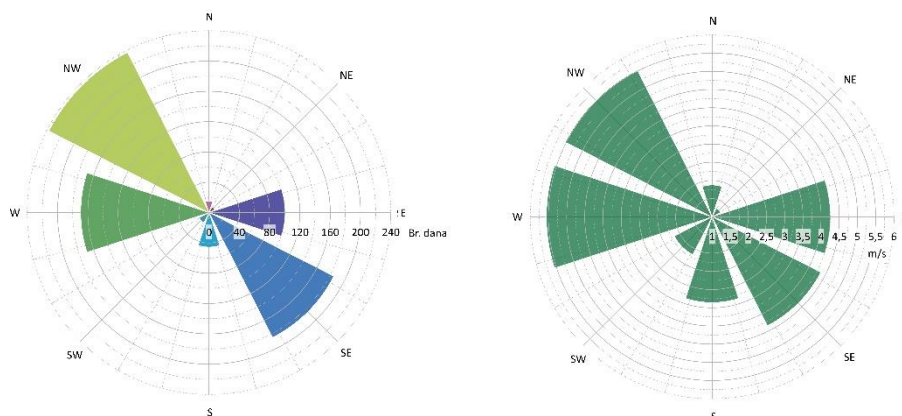
God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	-1,7	-3,0	0,8	6,7	12,9	15,5	20,5	19,5	14,9	6,2	6,3	2,6	8,4
2016	-3,4	3,6	2,4	11,2	10,6	16,7	18,2	17,1	15,1	5,6	2,4	-3,6	8,0
2017	-8,4	-1,2	5,6	6,1	11,3	17,2	19,2	19,7	13,7	8,9	2,2	-0,4	7,8
2018	-0,6	-3,0	-0,4	12,1	14,3	16,1	16,8	19,2	14,6	9,6	2,5	-2,0	8,3
2019	-4,4	-0,7	5,3	7,3	9,7	17,5	18,3	20,1	15,1	12,9	5,3	1,7	9,0
2020	-1,5	1,6	2,7	7,4	10,7	14,3	16,6	18,2	15,9	9,6	4,0	-0,7	8,2
Prosek	-3,4	-0,4	2,7	8,5	11,6	16,2	18,2	19,0	14,9	8,8	3,8	-0,4	8,3

Tabela 6.28 i sl. 6.62 prikazuje vrednosti čestine pravaca i brzine vetra u periodu 2015-2020. godine prikupljene sa klimatološke stanice Crni Vrh, sa koje se vidi da je najučestaliji jugoistočni i severozapadni vetar, koji je, pored zapadnog i najintenzivniji.

Tabela 6.28. Učestalost pravaca i brzine vetrova prema pravcima vetrova u (m/s) osmatranih na stanici Crni Vrh u periodu 2015 – 2020. godina (prema podacima RHMZ Srbije). Legenda: N - sever, NE - severoistok, E - istok, SE - jugoistok, SW - jugozapada, W - zapad, NW - severozapad, B – brzina vetra (u m/s), Č – čestina vetra

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B	Č	B
2015	16	2,1	13	1,8	154	4,6	288	4,9	52	4	26	3,2	190	5,8	346	6
2016	28	2,4	12	1,7	113	4,6	252	4,7	74	4,1	26	3,4	248	6,0	345	6,1
2017*	14	1,6	8	1,4	100	4,4	232	5,0	67	4,1	15	2,4	232	6,2	343	6,3
2018*	22	2,1	11	0,8	141	4,6	212	4,6	51	3,3	11	1,9	139	5,2	231	5,3
2019*	4	1,9	2	1,0	24	3,5	36	3,1	11	1,9	1	0,5	49	5,1	56	4,6
2020*	6	1,2	5	0,86	71	3,76	89	3,86	18	2,7	9	1,54	158	5,1	102	4,84
Prosek	15	2	9	1	101	4	185	4	46	3	15	2	169	6	237	6

*Nepotpuni podaci



Sl. 6.62. Ruža vetrova (levo) i brzine vazdušnih strujanja (desno) za područje meteorološke stanice Crni Vrh u periodu 2015-2020 (prema podacima RHMZ)

6.4.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

Svi stalni i povremeni rečni tokovi na širem slivnom području gravitiraju od centralnih do perifernih delova Kučajsko-beljaničkog masiva, da bi nailaskom na kontakt karstnih i nekarstnih delova terena ponirali, a kasnije pojavljivali kao snažna karstna vrela, kao npr. vrelo Mlave (Ristić, 2007; Vasić, 2017). Hidrografska mreža centralnog dela masiva Beljanice, ali i celog Kučajsko-beljaničkog masiva odlikuje se gustom drenažnom mrežom. Naravno, treba istaći da se ova rečna mreža javlja na nekarbonatnim delovima terena, tj. u južnim i na istočnim delovima istražnog prostora, dok u karstnim, vodopropusnim delovima ona praktično izostaje, tako da je skoro 170 km² Beljaničkog masiva bez površinskih tokova (Stevanović, 1981; Vasić, 2017). Povremeni rečni tokovi i ponornice koje se javljaju na širem istražnom terenu, svoj tok formiraju na nekarbonatnim delovima terena. Budući da im je režim zavistan od pluviometrijskog režima, najveći proticaji javljaju se u prolećnim mesecima usled jakih kiša ali i otapanja snežnog pokrivača, dok se najmanji proticaji javljaju tokom letnjih i ranih jesenjih meseci kada su i nivoi podzemnih voda najniži, a i kada se izlučuje najmanja količina padavina (Milanović S. 2010; Vasić, 2017). Neke od najznačajnijih ponorskih zona su Suvi Do, dok se Rečka i Busovata, nalaze na širem istražnom terenu i u slivu vrela u dolini Resave.

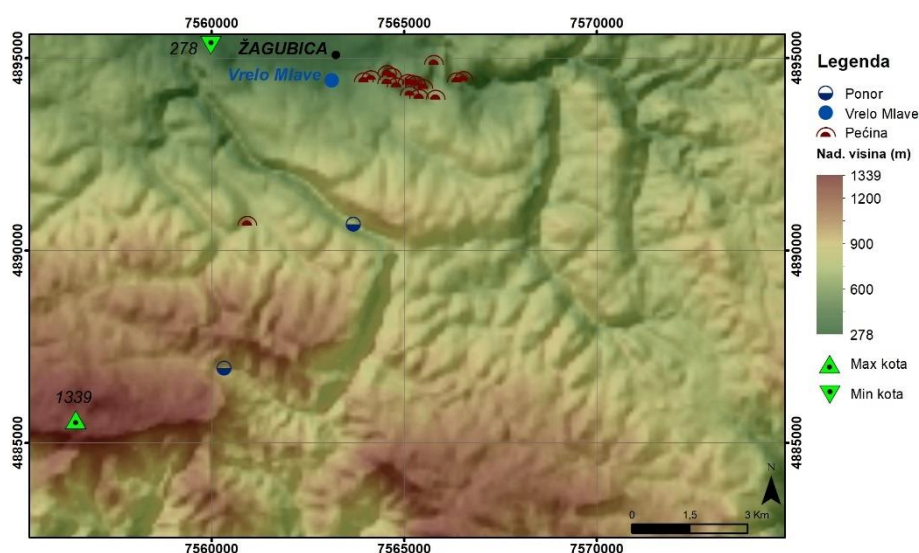
Veći površinski tokovi formirani su po obodu masiva. Tisnica i Crna reka pripadaju slivu Mlave koja se direktno uliva u Dunav (Stevanović, 1991). Mlava predstavlja najveći površinski rečni tok šireg istražnog područja. Formira se spajanjem voda koje ističu na karstnom vrelu Mlave i reke Tisnice, odakle teku severoistočnim obodom Beljanice. Reka Mlava osmatra se na nekoliko profila duž svog toka, počevši još od 1949. godine. Interesantno je to da je ova reka jedna od retkih u Srbiji na kojoj se vrše osmatranja od samog mesta isticanja, tako da karstno vrelo Mlave predstavlja osmatrački punkt karstnih podzemnih voda sa najdužim nizom u Srbiji. Ipak, merenja nisu vršena kontinuirano, već postoje izvesni prekidi, a od 2009. godine, paralelno sa RHMZ Srbije, koji gazduje stanicom za merenje vodostaja i proticaja reke, osmatranja nivoa i protoka reke vrše i stručnjaci Departmana za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta (Stevanović et al. 2012; Milanović S. et al. 2016; Vasić, 2017). Tako dugačak niz omogućio je detaljno poznavanje režima Mlave, tako da prema dosadašnjim istraživanjima, srednja višegodišnja izdašnost vrela iznosi 1,73 m³/s, sa apsolutnim maksimumom tokom majskih poplava 2014. godine, kada je izmereno 16,55 m³/s (Vasić, 2017). Stevanović (1981) navodi poplavni talas zabeležen 1969. godine, kada je Mlava poplavila veći deo Žagubice.

6.4.4 Geomorfološke karakteristike

Geomorfološke karakteristike šireg istražnog područja odlikuju se postojanjem visokih planinskih vrhova i terena sa nižim nadmorskim visinama u podnožju Beljaničkog masiva. Nadmorske visine na širem istražnom terenu variraju od 278 mnm, koliko iznosi minimalna vrednost na severnim delovima istražnog područja u dolini Mlave, do 1339 mnm, koliko iznosi najviši vrh Beljanice (Sl. 6.63).

Reljef terena je raščlanjen, imajući u vidu geološke i tektonske karakteristike terena. Naime, visoki planinski vrhovi su obično izgrađeni od krečnjaka, dok se nekarbonatne tvorevine od kristalastih škriljaca, permskih peščara, vulkanogenog gornjokrednog kompleksa, tercijarnih sedimenata i aluvijalnih nanosa nalaze u centralnim i jugoistočnim delovima Beljanice (Vasić, 2017). Proces jaružanja je čest na padinama Beljanice, koje omogućavaju formiranje površinskog oticaja, te su ova područja sa gušćom drenažnom mrežom.

Karstni tereni šireg istražnog područja odlikuju se svim površinskim i podzemnim karstnim oblicima, izuzev karstnih polja. Među površinskim karstnim oblicima ističu se škrape, vrtače i suve doline. Značaj vrtača na prostoru Kučajsko-beljaničkog masiva je još Cvijić isticao u svojim radovima, na osnovu kojih je postavio osnov teorije „erozije tekuće i atmosfere vode“ kao dominantnom agensu formiranja vrtača (Milanović S. & Vasić, 2014). Vrtače mogu biti različitih dimenzija, najčešće metarskih do dekametarskih, a obično su zapunjene crvenicom.



Sl. 6.63. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrele Mlave

Najveću suhu dolinu karsta Beljanice predstavlja Suvi Do, međutim treba napomenuti da većim delom godine ona sadrži vodu. Najveći broj pećina registrovan je u dolini Tisnice (Sl. 6.63), dok su brojne jame detektovane speleološkim i speleoronilačkim istraživanjima. Najpoznatije jame su Tisova jama (dubina 128 m) i Ledena jama (dubine 32 m) (Milanović S. & Vasić, 2014).

6.4.5 Geološke karakteristike

Ceo prostor Kučajsko-beljaničkog masiva predstavlja antiklinorijum pravca pružanja SSZ-JJI, čija su krila izgrađena od karbonatnih sedimenata, dok se u jezgru nalaze najstarije tvorevine prekambrijuma i paleozoika (Stevanović, 1981; Vasić, 2017). Burna geološka istorija koja se događala na ovom prostoru, uzrokovala je veoma složenu geološku građu terena, te se mogu naći stenski kompleksi od najstarijih perioda do najmlađih. Stvaranje terena Kučajsko-beljaničkog masiva praćeno je najstariji kristalastim kompleksima preko kojih leže paleozojski škriljci silurske starosti, nakon čega nastaje hijatus do trijasa, kada se formiraju prve karbonatne naslage. Najdeblje karbonatne tvorevine javljaju se nakon dogerske transgresije, a

sedimentacija karbonata se završava tokom urgona (donja kreda), dok se u tercijaru javlja sedimentacija u izolovanim jezerskim basenima, nakon čega se formiraju i najmlađi, kvartarni nanosi (Stevanović, 1981; Vasić, 2017).

Mezozojski sedimenti na širem istražnom prostoru predstavljeni su jurskim i krednim tvorevinama. Jurski sedimenti nastajali su tokom dogera i malma. Sedimenti srednje jure (J_2) predstavljeni su klastičnim i karbonatnim tvorevinama, nastalim u neritskoj sredini, u vidu uskih zona kao podina oksford-kimeridžkim krečnjacima (Stevanović, 1981). Neraščlanjena serija srednje i gornje jure ($J_{2,3}$) predstavljena je dolomitima i krečnjacima, debljine do 100 m, koji čine podinu krečnjacima gornje jure. Izgrađeni su od krečnjaka i dolomita, sa proslojcima rožnaca, stvaranih u oksford-kimeridžu i titonu, ukupne debljine 500-700 m. Oksford-kimeridž (J_3^{1+2}) je predstavljen serijom slojevitih i bankovitih krečnjaka sa rožnacima, debljine oko 200 m, dok su titonski krečnjaci (J_3^3) uglavnom bankoviti do masivni krečnjaci, debljine i do 400 m. Kredni sedimenti su predstavljeni uglavnom donjom kredom i to krečnjacima neokoma (K_1^{1+2}) koji su stvarani u plitkovodnoj sredini, konkordantno posle titonskih krečnjaka. Najveće rasprostranjenje imaju u planinskom delu masiva, odakle se od severne strane u vidu pojasa širine 1-3 km spuštaju istočnom i zapadnom stranom prema jugu (Stevanović, 1981; Milanović S, 2010). Urgonska facija ($K_1^{3,4}$) predstavljena je bankovitim i slojevitim krečnjacima stvaranim takođe u plitkovodnoj sredini (Antonijević et al. 1970). Zahvataju područja na obodu masiva, a debljina može biti i do 500 m. Albski kat (K_1^5) predstavljen je glaukonitskim peščarima, a karakterističan je po tome što tokom alba dolazi do povlačenja plitkog mora, čime se završava sedimentacioni ciklus (Stevanović, 1981). Tako je gornja kreda (K_2) predstavljena manjim zonama konglomerata, peščara, laporaca i tufova. Krajem gornje krede dolazi do vulkanske aktivnosti koja rezultuje stvaranjem vulkanskih aglomerata u breča (ω) u dve faze.

Tercijarni sedimenti imaju manje rasprostranjenje na istražnom terenu, nalaze se na samom severu u okviru Žagubičkog basena. Predstavljeni su miocenskim naslagama. Ovi gornjomiocenski jezerski sedimenti predstavljeni su konglomeratima, laporcima i krečnjacima (Vrelo Mlave) i peščarima, peskovima sa proslojcima šljunkova.

Najmlađi sedimenti predstavljeni su kvartarnim naslagama u vidu aluvijona (al), sipara (s) i deluvijuma (d). Malog su rasprostranjenja, pre svega u dolini Mlave (aluvijon), zatim na platou Beljanice u vidu deluvijuma, koji se najčešće nalaze u vrtačama i uvalama. Sipari se najčešće javljaju kao osulinski materijal na krečnjačkim padinama i liticama.

Tektonska aktivnost ovog područja takođe je bila veoma intenziva, što je dovelo do različitih tumačenja stvaranja terena ove oblasti. Kako Stevanović (1981) navodi, postoje dva pristupa o autohtonosti masiva: prvi zastupa gledište o postojanju velikih horizontalnih kretanja i navlačenja (alohtoni koncept), dok drugi, koji je danas potvrđen izradom nekoliko bušotina zastupa autohtonost sa dominantno vertikalnim kretanjima stenskih masa.

Generalno, prostor Kučajsko-beljaničkog masiva predstavlja antiklinorijum sa dva tektonska sprata, od kojih je niži izgrađen od niskokristalastih škriljaca i peščara, a viši od sedimenata mezozojske starosti (Vasić, 2017). Od regionalnih rasednih struktura ističe se Beljanički rased, dužine 15 km, koji preseca Beljanički masiv.

6.4.6 Hidrogeološke karakteristike

Na osnovu hidrogeoloških karakteristika terena, na širem istražnom prostoru izdvojeni su zbijeni, pukotinski i karstni tip izdani, kao i uslovno bezvodni delovi terena (Prilog 7).

Najznačajniji tip izdani na istražnom terenu je karstni, imajući u vidu značajno rasprostranjenje krečnjaka jurske i kredne starosti. Karstna izdan formirana je u krečnjacima sa rožnacima oksford-kimeridža ($J_3^{1,2}$), krečnjacima i dolomitima titona (J_3^3), krečnjacima valend-otriva,

krečnjacima i dolomitima urgonske facije i glaukonitskim krečnjacima i peščarima alba (K₁⁵). Erozioni bazis karstne izdani zavisi od debljine karbonatnog kompleksa, tako da može iznositi i do 600 m, što je i potvrđeno istražnim bušenjem tokom formiranja regionalnog izvorišta „Bogovina“ (Stevanović, 1981; 2010). Prihranjivanje karstne izdani vrši se infiltracijom površinskih i atmosferskih voda kroz ponore, vrtače i pukotine različitih dimenzija, odnosno podzemnim vertikalnim ili lateralnim doticajem. Difuzno prihranjivanje na otvorenim karstnim terenima može biti veoma intenzivno, dok u područjima sa šumskom vegetacijom efektivna infiltracija može iznositi i do 70% (Stevanović, 1981). Prihranjivanje je najintenzivnije u prolećnim mesecima, kada su i kiše i otapanje snega najveće, te se može desiti i da se formiraju veći površinski oticaji usled zasićenja podzemlja infiltriranom vodom, kao što je bio slučaj u maju 2014. godine (Vasić, 2017).

Na prostoru Karpato-balkanida istočne Srbije, a posebno na području Kučajsko-beljaničkog masiva izvršen je veliki broj opita trasiranja, posebno u periodu od 50ih do početka 90ih godina prošlog veka (Vasić, 2017), koji su, između ostalih, potvrdili podzemnu vezu ponorskih zona Suvog Dola, Velike Tisnice i Crne reke sa vrelom Mlave (Stevanović, 1991). Vasić (2017) navodi opite trasiranja Suvodolske reke 1954. godine, koje je izvršio J. Petrović, međutim bez detaljnije analize isteklog obeleživača i vremena koje je bilo potrebno traseru da se pojavi na vrelu, već je samo utvrđena veza ponor Suvog Dola – vrelo Mlave. Dragišić (1989) navodi bojenja Crne reke 80ih godina prošlog veka u dva navrata, kada je u prvom opitu ubačeno 5 kg trasera pri proticaju reke od 324 l/s, te se traser pojavio na vrelu Mlave posle 117,5h, prešavši 8 km fiktivnom brzinom 68 m/h (tj. 1,89 cm/s), dok je tokom drugog opita ubačen 1 kg trasera pri proticaju od 120 l/s, kada se boja pojavila posle 172h, prešavši 8 km fiktivnom brzinom od 46 m/h (tj. 1,28 cm/s).

Dreniranje karstnih podzemnih voda najčešće se vrši na obodnim delovima karstnog masiva, kada podzemna voda naiđe na hidrogeološku barijeru i krene da ističe u vidu snažnih karstnih vrela. Dreniranje se može vršiti i na višim nadmorskim visinama, kada podzemne vode ističu preko manjih izvora koji dreniraju tzv. lebdeće izdani formirane između vodonepropusnih paketa, ili koje dreniraju epikarstne zone.

Na istražnom prostoru je najveće vrelo Mlave, koje je predmet istraživanja, te će se ovom vrelu posvetiti pažnja. Vrelo Mlave ističe na 305 mm u vidu sifonskog kanala (Sl. 6.64), koji je istražen brojnim zaronima do dubine od 73 m, pri čemu je definisana dubina jezera od oko 30 m, da bi se posle toga kroz kolenasti karstni kanal ušlo u vertikalni kanal koji se zatim širi u levkasti kana na dubini od 43 m (Milanović S. 2007; 2010; Vasić et al. 2020). Ovim podacima i speleoronilačkim akcijama potvrđena je pretpostavka o dubokoj bazi karstifikacije Kučajsko-beljaničkog masiva. Imajući u vidu sifonsku cirkulaciju podzemnih voda ovog vrela, njegova zanimljiva pojava je da se povremeno javljaju prekidi isticanja podzemnih voda, kada tok u potpunosti presušuje, dok u jezeru ostaje voda koja ne otiče (Vasić, 2017). Ovaj fenomen je ustanovio još Cvijić (1895, 1896), dok se najnoviji prekid isticanja dogodio u jesenjem periodu 2006. godine (Stevanović, 2010b; Milanović S. 2010; Vasić, 2017). Milanović S. (2010) tumači da je prekid isticanja podzemnih voda kroz sifonski kanal Mlave, posledica kolapsiranja tavanica karstnih kanala, koje formiraju barijeru cirkulaciji podzemnih voda, te se povećava nivo vode u zaleđu sifona, pa kada nivo dostigne gradijent koji prelazi barijeru, ponovo se javlja isticanje na vrelu.

Mehanizam isticanja vrela Mlave uslovljen je kontaktom urgonskih krečnjaka i bazalnog dela tercijarne serije, odnosno rasednom strukturom pravca pružanja I-Z (Stevanović, 1987; 1991; Ristić, 2007; Milanović, S. 2010; Vasić, 2017). Vrelo nije kaptirano, samo jednim delom je iskorišćeno za ribnjak, a nizvodno od vrela formira se površinski tok Mlave. Izdašnost vrela Mlave varira od oko 300 l/s u minimumu, dok srednjevišegošnji maksimum iznosi oko 4 m³/s.

Ekstremni maksimum može dostići i 16,55 m³/s, koliko je izmereno u maju 2014. godine, tokom poplavnog talasa (Vasić, 2017). Maksimumi izdašnosti vrela javljaju se obično u periodu mart-april, kada je dolazi do većeg topljenja snega, zatim u periodu maj-jul, kada su maksimumi vezani za kiše jakog intenziteta i krajem jeseni, odnosno recesionog perioda. Takođe, minimumi se javljaju tokom zime (januar-februar), zatim u aprilu kada se završi topljenje snega i infiltracija otopljenog snega u podzemlje, odnosno u recesionom periodu tokom leta, najčešće u avgustu (Stevanović, 1987; Ristić, 2007).



Sl. 6.64. Karstno vrelo Mlave periodu malih voda (levo, decembar 2016) i velikih voda (maj, 2019, desno)

Površina vrela Mlave procenjuje se na oko 120 do 124 km² (Stevanović, 1982; 1991; Milanović S. et al. 2012), odnosno do 156,5 km² (Ristić, 2007). Pri proračunu površine sliva sa korigovanim kišama i otopljenim snegom, usvojena je površina sliva vrela Mlave od 115 km², pri kojoj je sračunato da 70% vode koja se infiltrirala istekne na vrelo. S obzirom na to da je sliv vrela Mlave pouzdano geološki određen, ostatak od 30% vode koja se infiltrirala, a nije istekla na vrelo može se objasniti formiranjem površinskog oticaja, posebno u delu suve doline Suvog dola, odnosno prelivanjem dela vode u susedni sliv vrela Belosavac, Živkova rupa i isticanjem na vrelo Buk (Milanović S. 2010). Takođe, ulazni parametri kiše i snega koji su korišćeni sa stanice Crni Vrh su najverovatnije bitno viši nego što je realno stanje na Beljanici, te pri proračunu korigovane kiše i otopljenog snega daju sliku da je ulaz u sistem veći nego što realno jeste. Stoga, površina sliva od 115 km² usvojena je kao realna i ona je uključena u sve dalje analize ovog karstnog sistema. Naravno, ova veličina nije nepromenljiva, već se mora smatrati uslovnom veličinom, s obzirom na to da se vododelnice u hidrogeologiji karsta moraju smatrati kao zone. Stoga, povećanje slivne površine u periodima velikih voda može se tražiti u okviru alogenog dela sliva na zapadnom delu terena, u slivnom području Crne reke, čija veza sa vrelom Mlave je dokazana opitom bojenja.

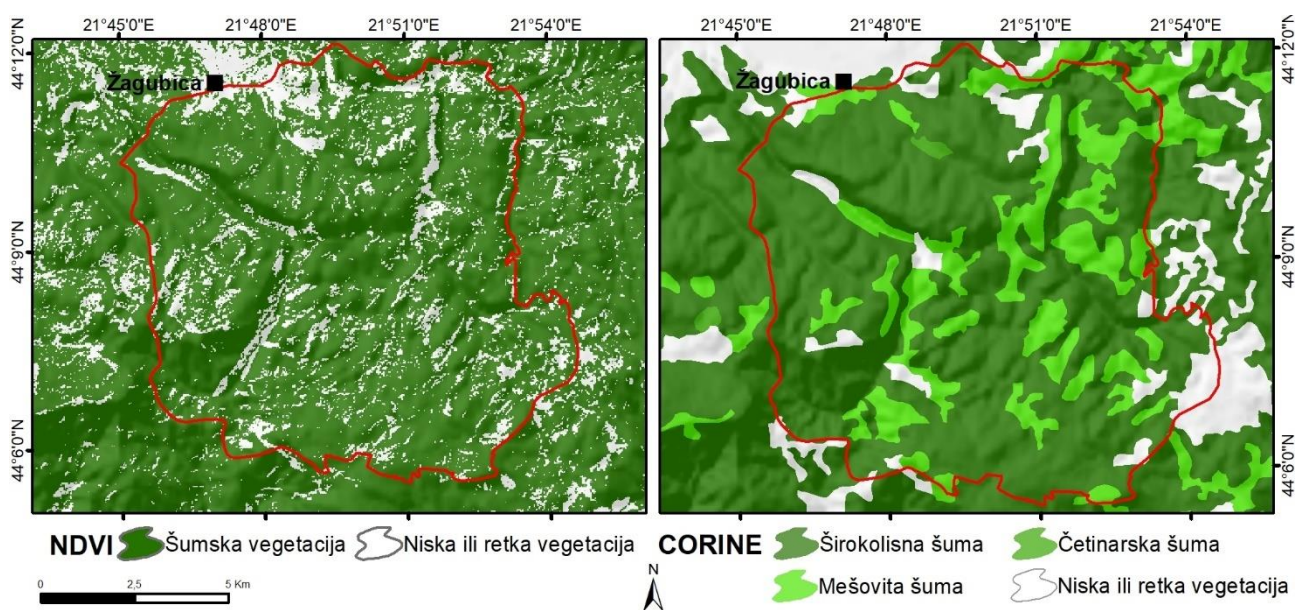
6.4.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Mlave

6.4.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Za slivno područje vrela Mlave, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 83% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 95% sliva (Sl. 6.65). Za finalni vegetacioni indeks je usvojena vrednosti aritmetičke sredine ove dve vrednosti, tj. indeks je procenjen na 0,89, što bi značilo da finalna vrednost efektivne infiltracije je sačinjena od 89% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 11% viška vode dolazi sa otvorenih područja sa niskom ili retkom vegetacijom.

Maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje vrela Mlave iznosi 750 mm, što znači da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Najveći deficit vlage u zemljištu je tokom letnjih i ranih jesenjih meseci, a najmanji tokom prolećnih meseci, kada dolazi do značajnijih kišnih padavina i otapanja snežnog pokrivača. Deficit vlage koji je određen u ovom slučaju se mora uzeti sa rezervom, budući da se

radi o prosečnoj vrednosti za ceo period osmatranja i da je određen na osnovu ravnoteže efektivne infiltracije i količina istekle vode, koje ne moraju nužno biti jednake.



Sl. 6.65. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva Mlave (prema podacima USGS, snimak zabeležen 6. septembra 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva Mlave (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Mlave prikazana je crvenom linijom

Tabela 6.29 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabela 6.25-6.28), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu Mlave, odnosno procentualne vrednosti parametara evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

Iz tabele 6.29 uočava se da je vrednost korigovanih padavina i na otvorenim i na područjima pod vegetacijom (Sl. 6.65) dosta veća od izmerenih na stanici Crni Vrh, tako da je prosečna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom za 716,8 mm veća od izmerenih prosečnih suma kiše, dok je na području sa vegetacijom ona veća za 291,2 mm.

Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 624,8 mm do 657,9 mm. Vrednost stvarne evapotranspiracije se kreću od 550,9 mm do 620,3 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 543,3 mm do 613 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent za pojedine hidrološke godine iznosilo od 31,6% do 51% za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom, odnosno od 44% do 64,9% za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **39,7%**, dok je za područja pod vegetacijom **54,5%**.

Ukupni višak vode u zemljištu iznosi od 573 mm do 1255,4 mm (ili 53% do 65,5% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 340,1 mm do 719,9 mm (ili od 38% do 61,3% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju prosečne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **61,6%**, dok je za područja pod vegetacijom **47,8%**. Generalno, vrednosti efektivne infiltracije se uklapaju sa vrednostima

gubitaka na stvarnu evapotranspiraciju, a red veličine efektivne infiltracije je u skladu sa prethodnim istraživanjima (Stevanović, 1987; 1991).

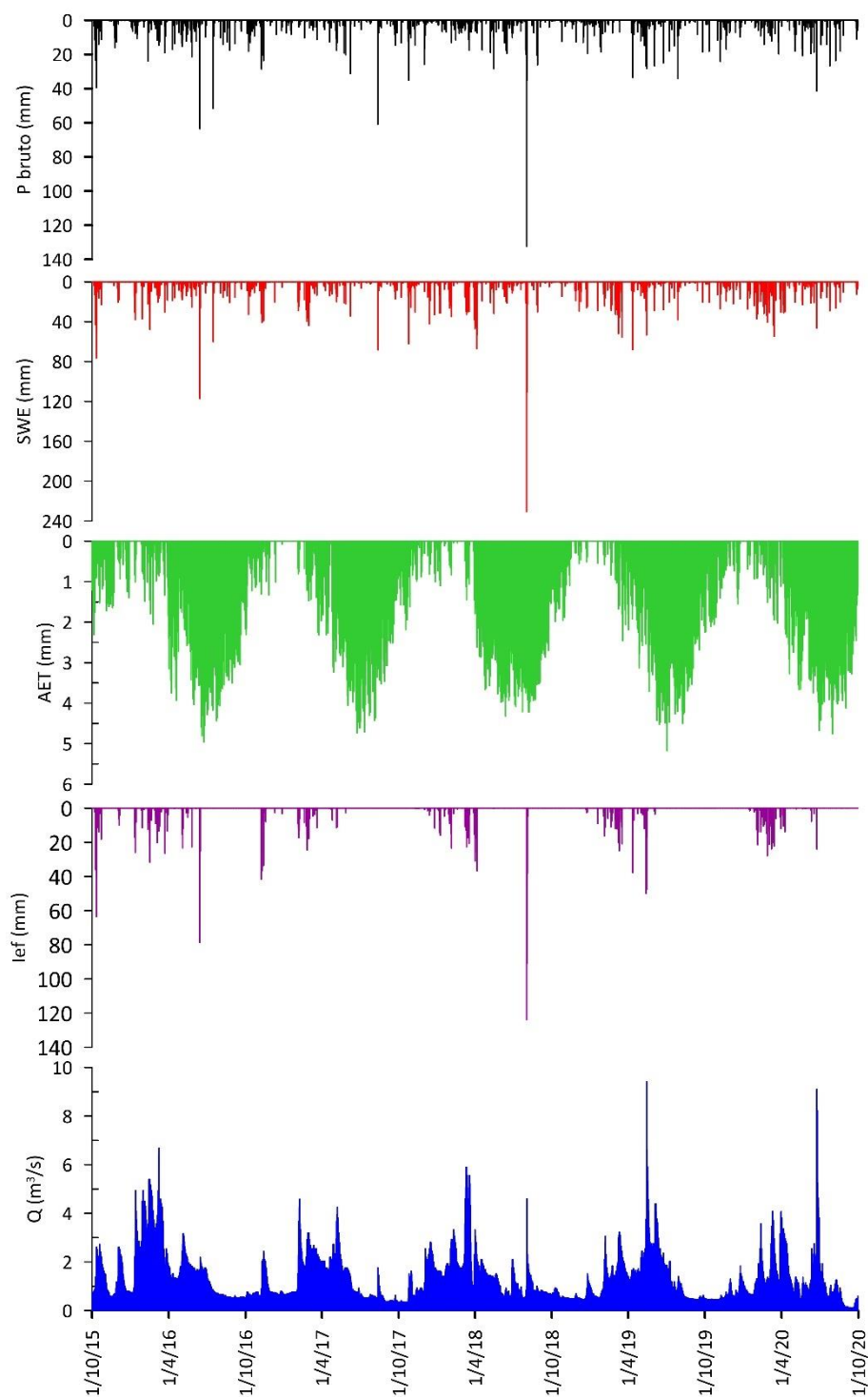
Tabela 6.29. Usporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Crni Vrh, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Mlave za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Mlave

	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	887,8	641,8	939,4	670,1	770,2	781,9
PgSWE (mm)	1415,3	1080,6	1957,3	1407,3	1632,9	1498,7
PgiSWE (mm)	1173,5	837,6	1372,7	904,8	1076,8	1073,1
PET (mm)	657,9	624,8	656,7	645,0	646,3	646,1
PET/Pbruto (%)	74,1	97,4	69,9	96,3	83,9	82,6
AETg (mm)	620,3	550,9	618,8	583,5	604,2	595,5
AETg/PgSWE (%)	43,8	51,0	31,6	41,5	37,0	39,7
AETveg (mm)	613,0	543,3	603,5	572,3	592,8	585,0
AETv/PgiSWE (%)	52,2	64,9	44,0	63,3	55,1	54,5
Wi (g) (mm)	926,5	573,0	1255,4	902,1	957,6	922,9
Wi (g) / PgSWE (%)	65,5	53,0	64,1	64,1	58,6	61,6
Wi (š) (mm)	719,9	340,1	662,8	434,8	409,3	513,4
Wi (š) / PgSWE (%)	61,3	40,6	48,3	48,1	38,0	47,8
Ief (mm)	740,6	363,4	722,1	481,5	464,2	554,4
Ief/Pbruto (%)	83,4	56,6	76,9	71,9	60,3	70,9
Ief/PgSWE (%)	52,3	33,6	36,9	34,2	28,4	37,0
Ief/PgiSWE (%)	63,1	43,4	52,6	53,2	43,1	51,7
Q_{sr} (m³/s)	1,78	1,28	1,47	1,35	1,2	1,41
Q (mm) (F = 115 km²)	491,50	349,10	403,20	370,42	328,60	388,6
ΔIef-Q (mm)	249,1	14,3	318,9	111,1	135,6	165,8
Q / Ief (%)	66,37	96,08	55,83	76,93	70,79	70,09

Vrednost efektivne infiltracije za slivnu površinu od 115 km² iznosi od 363,4 mm do 740,6 mm. Procentualni odnos efektivne infiltracije i padavina iznosi od 37% do 71% u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu, u zavisnosti da li se radi o izmerenim ili korigovanim vrednostima. Poslednji red tabele 6.29 pokazuje odnos efektivne infiltracije i količine istekle vode na vrelu. Ukupni odnos ove dve veličine pokazuje da prosečno isticanje na vrelu Mlave iznosi oko 70% infiltriranih voda u periodu 2015-2020 godina. Sličan red veličina javlja se pri analizi prosečnih hidroloških godina (2015-2016, 2018-2019, 2019-2020). Razlika od 30% koja se javlja pri prosečnim hidrološkim stanjima rezultat je zanemarivanja površinskog oticaja pri maksimalnim vodama koji se javlja u Suvom dolu i uopšte na prostoru Beljanice i slivnog područja Mlave, odnosno na prelivanju voda u susjedni sliv Belosavca. Ukoliko se posmatra hidrološka godina 2016-2017, koja je ocenjena kao sušna budući da ima najmanju sumu padavina u celom osmatračkom periodu, uočava se da je skoro 100% infiltrirane vode isteklo na vrelu Mlave, što je i logično budući da se u sušnim uslovima

najverovatnije ne formira površinski oticaj i da sva voda iz sistema gravitira ka Mlavi. Sa druge strane, u vlažnoj 2017-2018 godini, procenat istekle vode u odnosu na infiltriranu je najmanji (55,83%), što samo potvrđuje činjenicu da se pri velikim vodama sistem napuni toliko da se prazni ne samo na vrelu Mlave, već i u vidu površinskog i podzemnog oticaja u susedne slivove.

Uporedni prikaz dnevnih vrednosti ulaznih i izlaznih parametara karstnog sistema Mlave dat je na komparativnom dijagramu na sl. 6.66.



Sl. 6.66. Uporedni prikaz dnevnih vrednosti izmerenih padavina sa stanice Crni Vrh, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Mlave u periodu 2015 – 2020

Na sl. 6.66 date su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja sa vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja, identičan trend i zanemarljive razlike u vrednostima za područja bez ili sa retkom vegetacijom.

Sl. 6.66 pokazuje generalno poklapanje pikova efektivne infiltracije i pikova izdašnosti vrela Mlave. Međutim, jasno se uočava da maksimalne vrednosti efektivne infiltracije ne prouzrokuju maksimalne vrednosti isticanja podzemnih voda, što ukazuje na duboku sifonalnu cirkulaciju i veliki rezervoar u karstnom sistemu, koji ima značajnu sposobnost akumulacije podzemnih voda. To se najbolje može videti kada najveća vrednost efektivne infiltracije od 124 mm koja je bila avgusta 2018. nije izazvala apsolutni maksimum na vrelu, iako je skok izdašnosti bio 3,5 m³/s u samo jednom danu. Sa druge strane, mnogo manje vrednosti efektivne infiltracije su izazivale apsolutne maksimume od skoro 10 m³/s. Sve pomenuto ukazuje na veliki rezervoar i ascedentni mehanizam isticanja, odnosno da sistem reaguje na svaku značajnu efektivnu infiltraciju, dok jačina reakcije zavisi od trenutne napunjenosti sistema („piston efekat“).

6.4.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Analiza osnovnih statističkih parametara izvršena je za vremenske serije isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Mlave, prema podacima RHMZ Srbije (tabela 6.30). Vremenski period za koji su analizirani podaci je od 1. oktobra 2015. do 30. septembra 2020. godine, dakle na nivou hidroloških godina, kako bi pravilno korespondirali sa korigovanim podacima kiše i snega i proračunatom efektivnom infiltracijom.

Iz tabele 6.30 se vidi da je izdašnost karstnog vrela Mlave u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,11 m³/s do 9,42 m³/s, tako da je srednja vrednost 1,42 m³/s, medijalna 1,08 m³/s, odnosno modalna vrednost 0,53 m³/s, što bi predstavljala najfrekventniju vrednost vremenske serije. Takođe, uočava se da se minimalne vrednosti oscilirale od 0,11 do 0,532 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 4,06 do 9,42 m³/s. Vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju centralnu tendenciju vremenske serije isticanja vrela Mlave, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno. Vrelo Mlave prema koeficijentu varijacije pripada klasama *Umereno razvijeni sistemi*, u smislu površine koji zauzima, odnosno veličine karstifikacije. Pojedinačni komparativni dijagrami isticanja vrela Mlave i efektivne infiltracije za svaku hidrološku godinu 2015-2020. godina dati su na sl. 6.102.

Tabela 6.30. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mlave za period 2015 – 2020. godine (prema podacima RHMZ). Legenda: N – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} - srednja vrednost serije; Mdn – medijana; M – mod; Min – minimalna vrednost serije; Max – maksimalna vrednost serije; VAR – varijansa serije; σ - standardna devijacija; Cv – koeficijent varijacije; Cs – koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs	
		m ³ /s									
2015-2016	366	1,787	1,500	0,137	0,532	6,680	1,609	1,268	70,960	1,233	
2016-2017	365	1,273	0,767	0,767	0,340	4,580	0,770	0,877	68,928	1,116	
2017-2018	365	1,470	1,350	0,84	0,340	5,900	0,983	0,992	67,446	1,984	
2018-2019	365	1,351	0,962	0,491	0,449	9,420	1,131	1,063	78,732	2,484	
2019-2020	366	1,195	0,920	0,449	0,110	9,100	1,102	1,050	87,860	2,961	
2015-2020	1827	1,415	1,080	0,533	0,110	9,420	1,160	1,077	76,090	1,964	

Imajući u vidu da vrelo Mlave ima najduži niz osmatranja od svih vrela u Srbiji, mogu se izvući određeni zaključci o režimu isticanja od 60ih godina prošlog veka do danas. Stevanović (1987;

1991) navodi oscilacije dnevnih vrednosti ovog vrela u periodu 1971-1979 od 0,29 do 14,8 m³/s, dok Ristić (2007) navodi da srednje mesečne vrednosti isticanja vrela Mlave od 1961. do 2000. godine iznose od 0,32 do 10,72 m³/s. Milanović S. & Vasić (2014) navode srednju višegodišnju izdašnost vrela Mlave (period 1966-2010) od 1,96 m³/s, a srednje godišnje izdašnosti od 1,01 (1992. godina) do 3,17 m³/s (1967. godina). U periodu 2010-2015, prema podacima RHMZ i Vasić (2017), minimalne vrednosti izdašnosti vrela Mlave su iznosile 0,242 m³/s, a maksimalne 16,55 m³/s. Ukoliko se sve ove vrednosti uporede sa analiziranim periodom 2015-2020. godine (tab. 6.30), jasno se vidi trend opadanja srednje godišnje izdašnosti, kao i minimalne izdašnosti koja je u 2020. godini bila na nivou od svega 0,11 m³/s. Maksimalni izdašnosti vrela su se povećali, tako da su odnosi minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja sada veći nego što je bio slučaj npr. 60-ih i 70-ih godina prošlog veka. Sve pomenuto potvrđuje rezultate projekta *CCWaterS* (Stevanović et al. 2012) o uticaju klimatskih promena na režim karstnih podzemnih voda Beljanice. Naime, Ristić Vakanjac et al. (2012) navode rezultate uticaja klimatskih promena na režim isticanja vrela Mlave do 2100. godine, tako da su prognoze da će se srednje višegodišnje vrednosti izdašnosti ovog vrela u poslednje tri decenije 21. veka smanjiti za oko 10% u odnosu na period 1966-2010. godina, a da će sezonska disproporcija isticanja podzemnih voda biti još izraženija nego sada: tokom letnje sezone u poslednje tri decenije 21. veka očekuje se smanjenje za čak 40% u odnosu na istorijske vrednosti, dok se tokom zimskih meseci očekuje porast od oko 25%. Može se primetiti da se ove prognoze već sada delimično ostvaruju.

6.4.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

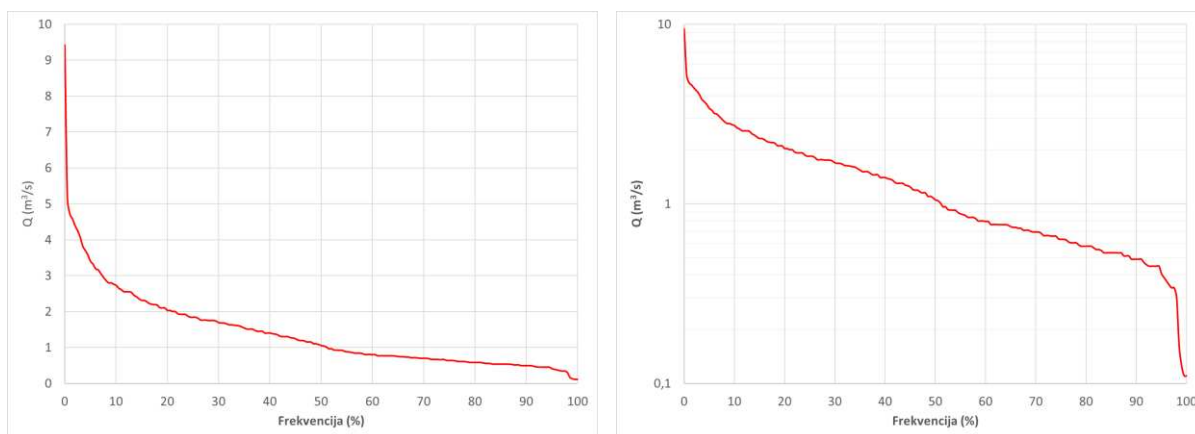
Rezultati analiza kriva trajanja protoka dati su u tabeli 6.31, kao i grafički na sl. 6.67 u vidu dijagrama normalne i log-normalne raspodele u cilju preciznije evaluacije minimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda na vrelu Mlave.

Iz tabele 6.31 može se uočiti da je u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) isticanje na vrelu iznosilo 1,05 m³/s, što u potpunosti korespondira sa medijalnom vrednošću. Za analizu sušnih perioda bitne su vrednosti $Q_{95} - Q_{100}$, dok su za analizu poplavnih perioda bitne veličine $Q_0 - Q_1$. Tako, tabela 6.31 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Mlave mogu očekivati vrednosti isticanja od 0,125 m³/s (Q_{99}) do 0,407 m³/s (Q_{95}), dok poplavni talasi, koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose 4,71 m³/s (Q_1). U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od 2,73 m³/s do 4,71 m³/s (Q_{10} do Q_1), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od 0,696 m³/s do 0,407 m³/s (Q_{70} do Q_{95}).

Tabela 6.31. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mlave na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m³/s

Period	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{30}	Q_{40}	Q_{50}	Q_{60}	Q_{70}	Q_{80}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{99}
2015-2020	4,71	3,4	2,73	2,03	1,69	1,4	1,05	0,797	0,696	0,58	0,491	0,407	0,125

Analizirajući krive trajanja protoka podzemnih voda na vrelu Mlave, uočava se veoma strm nagib krive za vrednosti frekvencije od 1 do 3%, što ukazuje na dominantan sifonski kanal kojim se vode doprema do vrela u turbulentnom režimu tečenja. Suprotno tome, u sušnim periodima godine, dakle sa učestalošću isticanja na nivou $Q_{95} - Q_{99}$, na dijagramu log-normalne raspodele jasno se uočava tačka infleksije nakon koje isticanje rapidno opada, što može ukazivati na veoma sporo isticanje kroz sifonski kanal u laminarnim uslovima, kada u sistemu ne postoji dovoljan pritisak koji će usloviti i veću izdašnost vrela.



Sl. 6.67. Krive trajanja protoka vrela Mlave za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) pokazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Mlave iznosi 2,14, ukazujući na nešto veću varijabilnost isticanja u periodu malih voda nego što je slučaj u prethodnim primerima. Sa druge strane, odnos Q_{90} / Q_{50} ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi suštinski bio indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema vrela Mlave, ovaj odnos je 0,467, što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela skoro 47% vode dolazi na račun baznog oticaja.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al., 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Mlave iznosi 5,56, što ovo vrelo svrstava u klasu vrela sa balansiranim vrednostima isticanja karstnih podzemnih voda. Ukoliko se ova veličina uporedi sa koeficijentom hidrodinamičke neravnomernosti od 85,6, što predstavlja odnos ekstremnih vrednosti isticanja vrela, može se ustanoviti da je koeficijent varijabilnosti vrela daje realniju sliku odnosa isticanja vrela pri velikim i malim vodama, budući da ne razmatra ekstreme, već učestalost minimalnih i maksimalnih pojava, te je oko 15 puta manji.

6.4.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Recesiona analiza karstnih podzemnih voda karstnog sistema vrela Mlave izvršena je za svaku hidrološku godinu zasebno, prema eksponencijalnoj jednačini Majea. Definisane periode isticanja podzemnih voda bez aktivnog prihranjivanja sistema je izvršeno na osnovu komparativne analize hidrograma vrela Mlave i dijagrama efektivnih padavina, datih na sl. 6.82, gde se jasno uočavaju vremenski periodi tokom letnjih meseci bez efektivne infiltracije. Sl. 6.82 pokazuje da, iako nije bilo efektivne infiltracije tokom izdvojenog recesionog perioda, padavine u vidu kiše su se javljale, ali su one uglavnom utrošene na zasićenje deficita vlage u zemljištu i na popunjavanje rezervi sistema.

Tabela 6.32 prikazuje rezultate analize recesionih krivih vrela Mlave za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.32. Rezultati recesione analize karstnog vrela Mlave za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* - zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} - ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

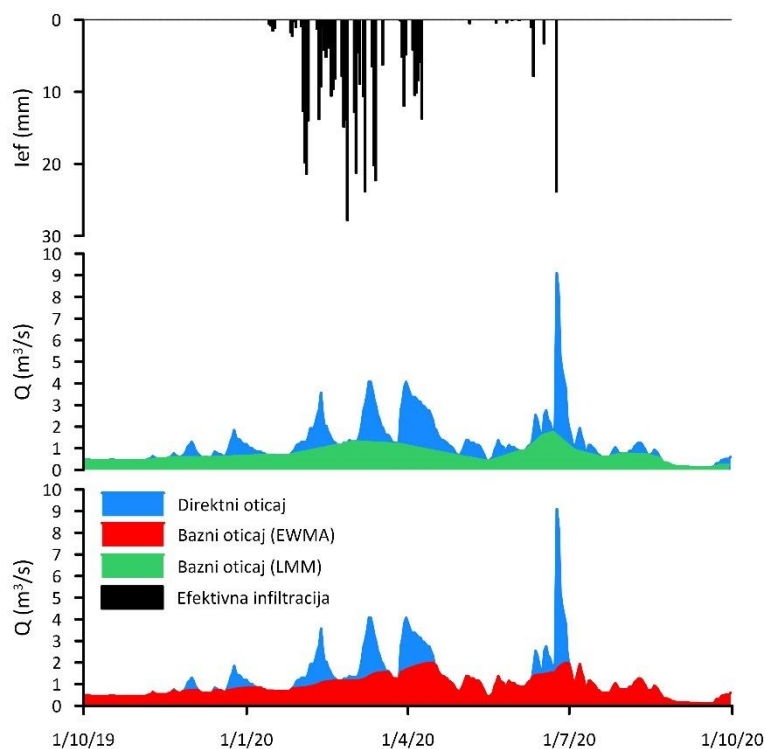
Godina	Recesioni period	Koefficient recesije		$V_0 \times 10^6$ (m ³)		$V^* \times 10^6$ (m ³)	$V_{total} \times 10^6$ (m ³)	t (dani)	
2015-2016	1.7. - 4.9.2016	1	α_1	0,0434	V_1	0,97	7,46	5,69	13
		2	α_2	0,0167	V_2	1,24			18
		3	α_3	0,0062	V_3	10,94			35
				ΣV_0	13,16	$\Sigma = 66$			
2016-2017	28.6. - 22.7.2017	1	α_1	0,1241	V_1	0,167	4,55	1,66	3
		2	α_2	0,0097	V_2	6,048			22
				ΣV_0	6,215	$\Sigma = 25$			
				ΣV_0	6,215	$\Sigma = 25$			
2017-2018	29.6. - 29.7.2018	1	α_1	0,0709	V_1	1,096	1,157	2,65	11
		2	α_2	0,0382	V_2	2,711			20
				ΣV_0	3,807	$\Sigma = 31$			
				ΣV_0	3,807	$\Sigma = 31$			
2018-2019	5.6. - 8.7.2019	1	α_1	0,047	V_1	2,64	7,905	9,3105	14
		2	α_2	0,017	V_2	14,57			20
				ΣV_0	17,21	$\Sigma = 34$			
				ΣV_0	17,21	$\Sigma = 34$			
2019-2020	18.8. - 20.9.2020	1	α_1	0,1341	V_1	0,468	0,516	0,889	13
		2	α_2	0,0184	V_2	0,937			21
				ΣV_0	1,405	$\Sigma = 34$			
				ΣV_0	1,405	$\Sigma = 34$			

Karakteristika karstnog sistema vrela Mlave je postojanje dva mikrorežima pražnjenja, od kojih prvi obično traje 10-ak, a drugi 20-ak dana, što znači da recesija obično traje ukupno 30-35 dana. Red veličina koeficijenata recesije u oba mikrorežima pražnjenja je reda veličine 10^{-2} , što ukazuje na slične, laminarne uslove tečenja. Vrednosti koeficijenata recesije prvih mikrorežima pražnjenja variraju od 0,0434 do 0,1341, dok drugi mikrorežimi pražnjenja osciliraju od 0,0097 do 0,0382. Izuzetno, recesija može trajati i dva meseca, ali takvi slučajevi su retki, te se rezultati analize recesije vrela Mlave generalno poklapaju sa rezultatima Stevanovića (1987; 1991), i to pogotovo za godinu 2018-2019, koja pokazuje vrlo slične vrednosti koeficijenata recesije za 1979. godinu. Zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine varira od 0,889 do $9,31 \times 10^6$ m³, tako da prosečna zapremina istekle vode iznosi $4,04 \times 10^6$ m³, što takođe korespondira sa rezultatima prethodnih analiza. Interesantni su rezultati predikcije recesionog perioda vrela Mlave za 2071. i 2097. godinu, kada je prognozirana recesija od 2 (septembar-oktobar 2071. god) i 4 meseca (jun-septembar 2097. god), pri kojoj na vrelu ističe prosečno 32 l/s (2071. god), tj. 22 l/s (2097. god), što ukazuje na to da vrelo ne presušuje ni u ovim ekstremno sušnim uslovima pod uticajem klimatskih promena (Ristić Vakanjac et al. 2012).

6.4.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

Analizom je ustanovljeno da nakon vrednosti $N=5$ nagib krive opada, tj. poprima praktično linearni karakter, te je ova vrednost uzeta pri razdvajanju baznog oticaja pomoću LMM metode. Primenom LMM metode, proračunate su dnevne vrednosti baznog oticaja za period 2015 – 2020. godina, kao i vrednosti indeksa baznog oticaja u vidu relacije Q_{bazno} / Q_{ukupno} . Analizom je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Mlave 3,14 m³/s, minimalna 0,11 m³/s, a srednja vrednost 1,03 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,12 do 1,

tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,8229 što znači da bazni oticaj karstnog sistema vrela Mlave prosečno čini 82,29% ukupnog oticaja ovog sistema, prema LMM metodi.



Sl. 6.68. Uporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema Mlave za 2019-2020 god.

Primena EWMA filtera uključila je srednju vrednost koeficijenta recesije poslednjih mikrorožima pražnjenja karstnog sistema vrela Mlave za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.32. Osrednjena vrednosti koeficijenta recesije poslednjih mikrorožima iznosi $\alpha_{av} = 0,018$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Primenom EWMA filtera sračunata je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Mlava od $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,02 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,874, što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema vrela Mlave prosečno čini 87,4% ukupnog oticaja. Ova vrednost je sličnog reda veličine kao vrednost dobijena primenom LMM metode.

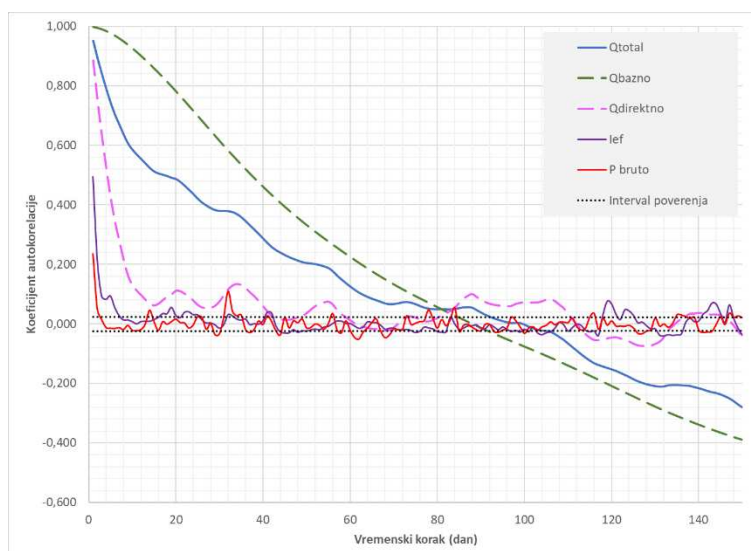
Rezultati primene prethodno pomenuta dva filtera razdvajanja hidrograma pokazuju veoma slične rezultate, što ukazuje na to da oko 80% voda koje ističu na vrelu Mlave potiče od baznog oticaja, tj. da je karstni sistem vrela Mlave dobro karstifikovan i strukturiran sa značajnim akumulacionim sposobnostima, koje omogućavaju formiranje značajnih rezervi podzemnih voda. Kao finalni kriterijum usvojena je LMM metoda, budući da grafički daje realnije rezultate od EWMA filtera. Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Mlave dati su na sl. 6.68, i to za hidrološku 2019-2020, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 770,2 mm.

6.4.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza je izvršena za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), kao i zasebno za sušnu (2016-2017) i vlažnu (2017-2018) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 150 dana za ukupni period razmatranja, odnosno 100 dana za sušnu i vlažnu godinu.

Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog vrela Mlave, kao i za bruto prispele padavine i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazan je na sl. 6.69, koja pokazuje visoku memoriju sistema, ukoliko se razmatraju bazni i ukupni oticaj. Takođe, uočava

se sinhroni pad autokorelacione funkcije baznog i ukupnog oticaja, što direktno ukazuje na dominaciju baznog oticaja u formiranju isticanja vrela Mlave, tj. na duboku sifonalnu cirkulaciju. Ukoliko se posmatra memorija sistema na bazi koeficijenata autokorelacije baznog oticaja vrela Mlave, može se zaključiti da koeficijenti posle 62 dana postaju statistički beznačajni ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 86 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja, dok koeficijenti autokorelacije ukupnog oticaja gube statističku značajnost posle 52 dana ($r_k < 0,2$), tj. 94 dana, posmatrajući intervale poverenja.



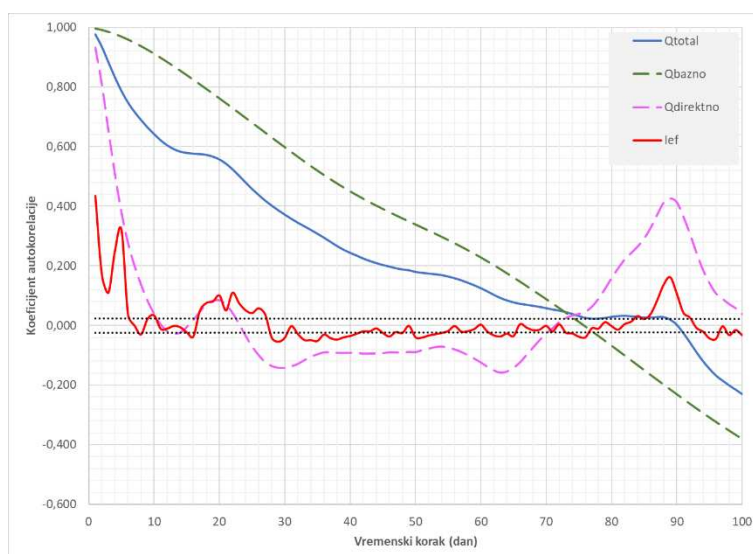
Sl. 6.69. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mlave, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

Autokorelogrami direktnog oticaja i efektivne infiltracije su sinhroni i pokazuju skoro identična poklapanja pikova, na osnovu čega se može zaključiti da efektivne infiltracije imaju uticaj na ovu komponentu hidrograma Mlave, u smislu da izazivaju pikove isticanja na vrelu, najčešće usled prenošenja pritiska novoinfiltrirane vode. Stoga, reakcija sistema na novoinfiltriranu vodu zavisi od jačine pritiska i trenutnog stanja rezervi u sistemu, te vrelo ne reaguje uvek istim intenzitetom na impulsni šok izazvan novom kišom.

Ukoliko se posmatra memorija sistema na bazi koeficijenata autokorelacije direktnog oticaja vrela Mlave, može se zaključiti da koeficijenti posle 8 dana postaju statistički beznačajni ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 43 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja. Period od 8 dana odgovara jednom talasu infiltracije, dok se na autokorelogramu mogu videti i pikovi koji nastaju naknadnom infiltracijom. Autokorelacija izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije pokazuje slučajnu prirodu ove promenljive, tako da statistička značajnost bruto padavina prestaje nakon samo dva dana, dok su koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije nešto viši. Takođe, može se primetiti da efektivna infiltracije nekoliko puta se vraća u opseg značajnosti, izazivajući i povećanje autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja.

Sl. 6.70 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Mlave, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2016 – 2017, koja je ocenjena kao sušna godina. Autokorelogram ukupnog i baznog oticaja vrela u sušnoj godini pokazuju sinhroni pad, dok je očigledna zavisnost direktnog oticaja od efektivnih infiltracija. Jasno se uočavaju pikovi 19. i 89. dana. Memorija sistema je vrlo duga za vremenske serije baznog i ukupnog oticaja, tako da tek nakon 45 dana (bazni oticaj), tj. 63 dana (ukupni oticaj) gube statističku značajnost za ($r_k < 0,2$), odnosno 77 dana za obe serije posmatrajući intervale poverenja. Situacija je drugačija za direktni oticaj, koji gubi statističku značajnost posle 7 dana ($r_k < 0,2$), tj. 10 dana za intervale

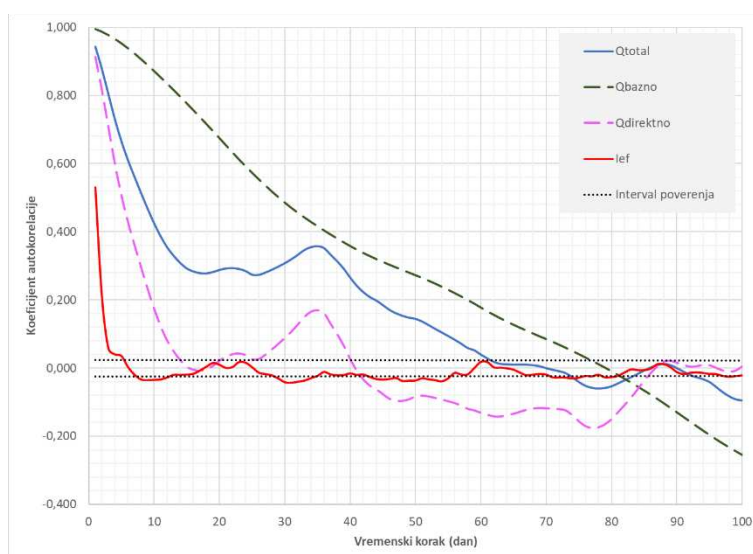
poverenja, izvan kojih nekoliko puta izlazi, odnosno kada god se infiltrira nova voda i poraste pritisak u sistemu.



Sl. 6.70. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mlave i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2018 – 2019)

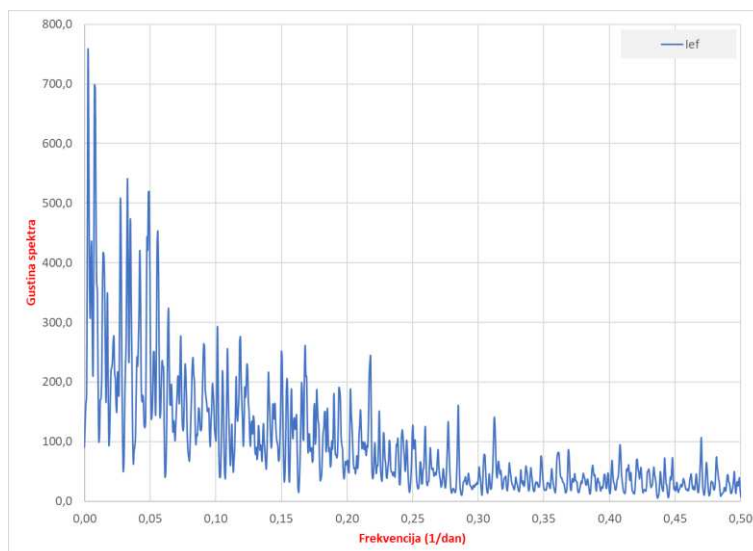
Sl. 6.71 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Mlave, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2017 – 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina.

Sa pomenutog dijagrama vidi se takođe, da ukupni i bazni oticaj generalno imaju sličan nagib autokorelograma, s tim da je uočljiv veći uticaj direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj, što je i logično imajući u vidu da je reč o vlažnoj hidrološkoj godini. Naime, tokom vlažne godine, sistem je akumulirao veću količinu vode i reakcija sistema na pritisak izazvan novoinfiltriranim vodom je veća i osetnija nego tokom sušne godine, kada ima manje vode u sistemu. Statistička značajnost direktne komponente je 9 dana, bazne 43 dana, a ukupnog oticaja 57 dana za $r_k < 0,2$, dok posmatrajući intervale poverenja prag značajnosti je na nivou 14 dana za direktnu, 62 dana za baznu komponentu hidrograma, tj. 78 dana za ukupni oticaj.



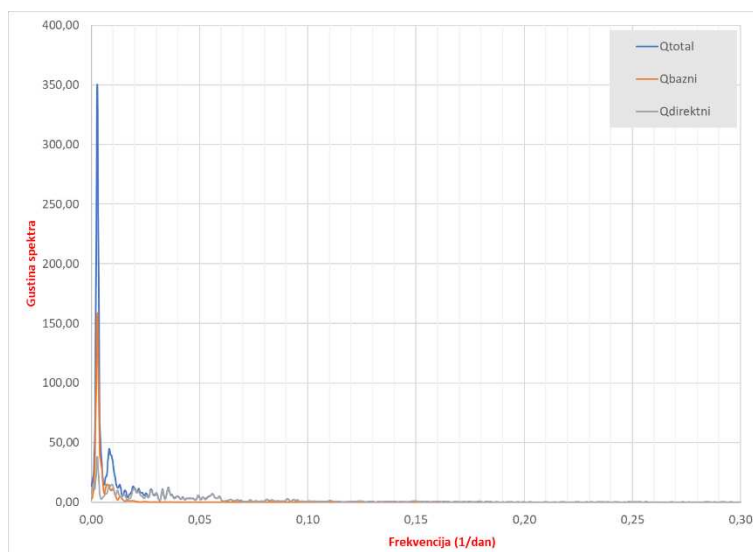
Sl. 6.71. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Mlave i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Mlave prikazana je na sl. 6.72, sa koje se mogu uočiti 5 najfrekventnijih pikova koji pokazuju cikličnost vremenske serije. To su vrednosti 0.002738, 0.007667, 0.032859, 0.047645 i 0.048740 dan⁻¹, koji odgovaraju vremenskim periodima od 365 dana, 130 dana, 30 dana i 20 dana, tj. godišnjem, četvoromesečnom i mesečnom periodu. Frekvencije iznad od 0.1 dan⁻¹ predstavljaju slučajni karakter efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Mlave.



Sl. 6.72. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Mlave za period 2015 – 2020

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja za ceo period osmatranja (2015 – 2020) i prikazan je na sl. 6.73.

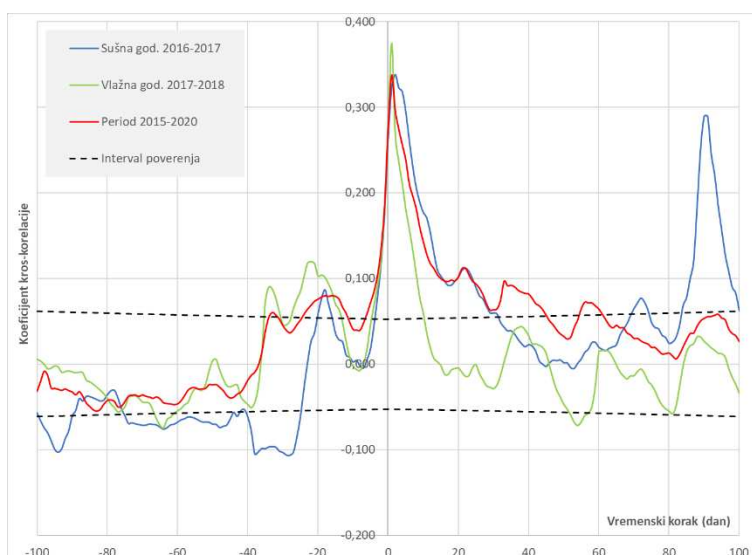


Sl. 6.73. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema vrela Mlave u periodu 2015 – 2020 godina

Sa dijagrama 6.73 se jasno vidi značajno poklapanje spektralne gustine ukupnog i baznog oticaja pri niskim i srednjim frekvencijama, dok se samo u višim frekvencijama javlja poklapanje spektra ukupnog i direktnog oticaja, sve do frekvencije 0.11 dan⁻¹. Karakteristični pikovi za ukupni oticaj su 0.002738, 0.003286, 0.004381, 0.008215 i 0.009310 za odgovarajuće periode od 365, 304, 228, 121 i 107 dana, dok se skoro identični pikovi javljaju u spektru baznog oticaja. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine direktnog oticaja ima pikove (0.001095, 0.002738, 0.003286, 0.008215 i 0.020263) koje odgovaraju broju dana od 913, 365, 304, 121 i

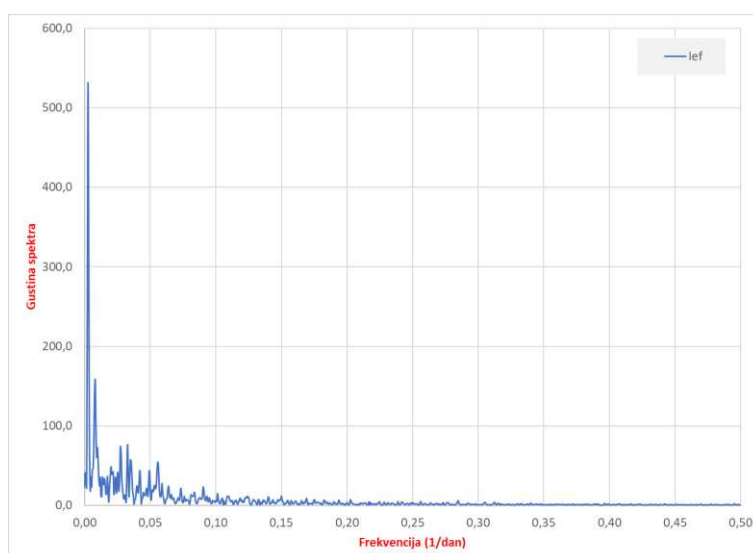
49. Dakle, može se zaključiti da se vrednosti baznog oticaja javljaju u dužim ciklusima koji odgovaraju dvoipogodišnjim, godišnjim i četvoromesečnim i mesečnim ciklusima. Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od $0.018072 \text{ dan}^{-1}$, spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi statistički značaj, što odgovara broju dana od 55, dok statistička značajnost direktnog oticaja prestaje nakon frekventnog opsega od 0.111 dan^{-1} , što odgovara periodu od 9 dana, što su praktično isti rezultati koje daje autokorelaciona funkcija.

Kros-korelogram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Mlave prikazan na sl. 6.74, daje rezultate kros-korelacione analize za sušnu i vlažnu godinu, kao i za ceo period razmatranja. Pozitivna asimetrija kros-korelograma je prisutna u svim slučajevima, a interesantni rezultati dobijaju se u zavisnosti od vlažnosti hidrološke godine. Naime, najveći koeficijenti korelacije javljaju se u vlažnoj godini, kada sistem reaguje na kišu posle samo jednog dana, što je odlika i kros-korelograma ukupnog perioda. Sa druge strane, reakcija sistema u sušnoj godini je 2 dana, što se može objasniti praznijim sistemom u sušnoj godini, koji se prvo napuni, pa onda krene sa povišenim isticanjem na vrelu, kada i pritisak poraste dovoljno da iznese veću količinu vode kroz sifonski kanal. Kros-korelogram u sušnoj godini gubi statističku značajnost posle 9 dana, u vlažnoj godini posle 5 dana, odnosno 7 dana za ceo period ($r_k < 0,2$).



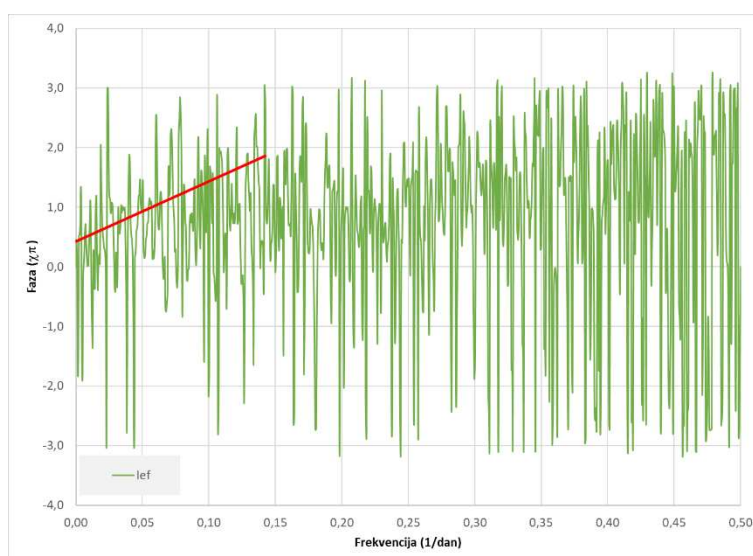
Sl. 6.74. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Mlave za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

Kros-amplitudna funkcija koja uključuje vremenske serije efektivne infiltracije i izdašnosti karstnog vrela Mlave prikazana je na sl. 6.75. Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,3 \text{ dan}^{-1}$. Pikovi u visokofrekventnom opsegu ($f > 0.1$) pokazuju značajan uticaj efektivne infiltracije na direktan oticaj i njegovu funkciju u formiranju ukupne izdašnosti vrela Mlave, kao i na mogućnost amortizacije jakog impulsnog signala (visokih vrednosti efektivnih infiltracija) nakon inicijalnog uticaja direktnog oticaja na sistem. Frekvencije koje se javljaju u visokofrekventnom opsegu i koje odgovaraju direktnom oticaju su 0.101314 i 0.150055 koje odgovaraju periodu od 9.87 i 6.67 dana. Sa druge strane, visoke oscilacije pikova u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, odnosno ukazuju na značajne rezerve u sistemu. U okviru niskofrekventnih opsega mogu se uočiti pikovi od 0.002738 , 0.008215 , 0.032859 , 0.056407 koje odgovaraju periodima od 365 dana (godišnji ciklus), 121 dana (četvoromesečni ciklus), 30 i 18 dana (mesečni ciklus).



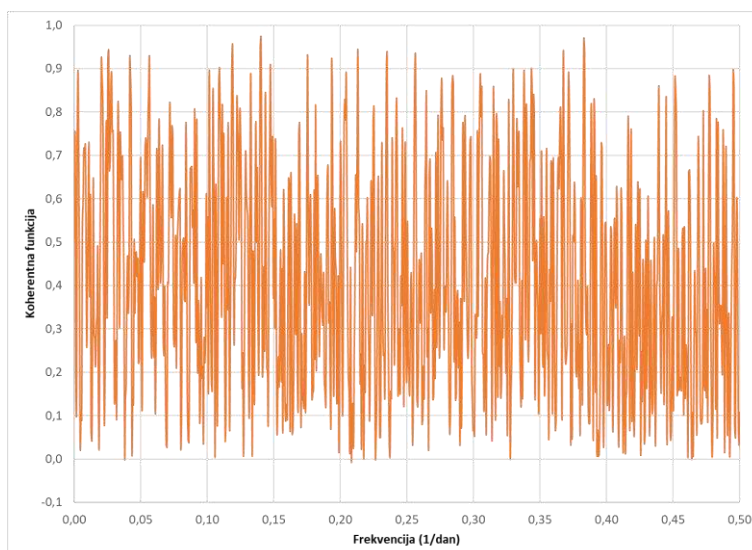
Sl. 6.75. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Mlave za period 2015 – 2020. godina

Fazna funkcija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Mlave prikazana je na sl. 6.76, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri visokim frekvencijama ($f > 0.15$), dok se izvestan pozitivan linearni trend javlja pri niskim i srednjim frekvencijama. Ovaj pozitivni trend prikazan je na sl. 6.76 crvenom linijom, tako da obuhvata frekventni opseg od 0 do 0.141840, što odgovara periodu od 7.05 dana, tako da pomenuti period odgovara kašnjenju odziva sistema na impulsni signal, što se generalno slaže sa rezultatima dobijenim kros-korelacionom analizom za ukupni period osmatranja i kros-amplitudnom analizom.



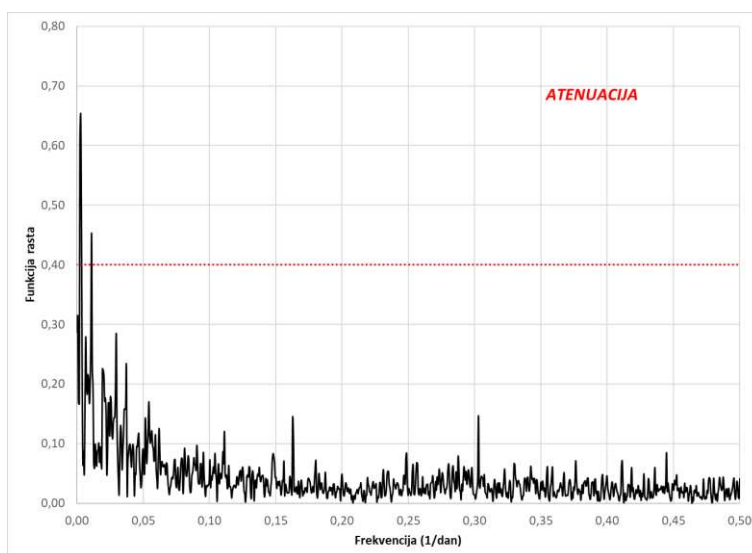
Sl. 6.76. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mlave za period 2015-2020

Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mlave, prikazana na sl. 6.77, ukazuje na izrazito nelinearan karakter karstnog sistema, tako da srednja koherentna vrednost 0.41 ukazuje na značajnu akumulativnu sposobnost i dobro strukturiran i karstifikovan karstni sistem vrela Mlave, koji akumulira velike rezerve podzemnih voda. Koherentna funkcija pokazuje da značajne količine podzemnih voda velikim delom ističu na vrelu u vidu baznog oticaja, čime su dokazani i rezultati analize baznog oticaja, koji su pokazali da bazni oticaj vrela Mlave čini 87,4% ukupnog oticaja na vrelu. Značajan pad koherentne funkcije dešava se pri frekvenciji od $0.096933 \text{ dan}^{-1}$, što se poklapa sa rezultatima prethodnih analiza po pitanju perioda reakcije direktnog oticaja na ukupni hidrogram vrela Mlave.



Sl. 6.77. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mlave za period 2015-2020

Sl. 6.78 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Mlave, pokazujući da su sve vrednosti funkcije ispod 1, što potvrđuje dominantnu ulogu baznog oticaja u formiranju rezervi podzemnih voda karstnog sistema Mlave.



Sl. 6.78. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema Mlave za period 2015-2020

Poslednji pik iznad 0.4, koji pokazuje uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, nakon čega karstni sistem u potpunosti vrši atenuaciju ulaznog signala i formira bazni oticaj (Padilla & Pulido-Bosch 1995) javlja pri frekvenciji od 0.010953 što odgovara periodu od 91.3 dana. Međutim, ova vrednost se ne može uzeti kao period uticaja direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj, s obzirom na veoma dugačak vremenski korak. Kao reprezentivi uticaja direktnog oticaja mogu se uočiti pikovi od 0.162651 i 0.302848 koji odgovaraju periodima od 6.15 i 3.3 dana, što se uklapa u prethodne rezultate uticaja direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj podzemnih voda karstnog sistema Mlave. Takođe, uočava se da je funkcija rasta sortirana i jasno se vidi atenuacija impulsnog signala, što odgovara amortizaciji efektivnih infiltracija i formiranju rezervi podzemnih voda i baznog oticaja, kao rezultat duboke sifonalne cirkulacije i dobro razvijenog sistema Mlave.

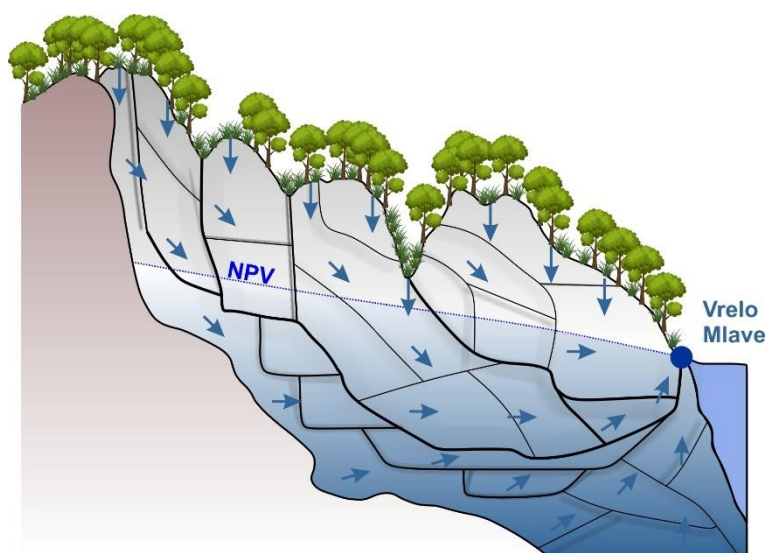
Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se uočiti da je karstni sistem vrela Mlave dobro karstifikovan, sa dubokim zaleganjem sifonskog kanala, tj. dubinskom sifonalnom

cirkulacijom podzemnih voda. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 1073,1 mm na područjima sa vegetacijom, do 1498,7 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 554,5 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2020 iznosi 646,7 mm, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 585 mm do 595,5 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 39,7% na području bez vegetacije, tj. 54,5% na prostoru sa vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,88, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 52,9%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 47,1% (61,6% na prostoru bez vegetacije, tj. 47,8% na prostoru sa vegetacijom).

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 0,11 m³/s do 9,42 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 1,08 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 4,71 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 0,125 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti dva mikrorežima pražnjenja, koji se javljaju u sličnim uslovima cirkulacije, tj. laminarnom režimu tečenja. Recesija obično traje oko 30-35 dana. Prosečna zapremina istekle vode iznosi 4,04 x 10⁶ x m³/s. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema LMM metodi iznosi 1,03 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 82,3% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Analiza vremenskih serija isticanja i efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Mlave ukazala je na mehanizam funkcionisanja ovog karstnog sistema. Naime, jasno se uviđa zavisnost baznog i ukupnog oticaja, u smislu potpune sinhronizovanosti nagiba njihovih autokorelograma, što ukazuje na dominaciju baznog oticaja pri formiranju isticanja vrela. Takođe, direktni oticaj ima funkciju u formiranju izgleda hidrograma, ali ipak je očigledno da se najveći deo isticanja vrela formira kao bazni oticaj, što je potvrđeno rezultatima analize baznog oticaja (indeks baznog oticaja od 0,823). Reakcija sistema na efektivnu infiltraciju nije uniformna, tj. zaključuje se da najveća vrednost efektivne infiltracije ne izaziva najveću reakciju vrela, što se može videti sa komparativnog dijagrama isticanja i efektivne infiltracije. To znači da se radi o dubokoj sifonalnoj cirkulaciji, tako da sistem ima mogućnost amortizacije veće količine vode koja izaziva reakciju na vrelo tek u uslovima povećanja hidrostatičkog pritiska, kada se prvo na vrelo pojavljuje voda koja je u sistemu, pa tek onda „nova“ voda. Ova pretpostavka se poklapa i sa rezultatima izotopskih analiza, koje su pokazale starost voda karstnog sistema Mlava-Belosavac-Belosavac 2 od 6 godina i hijerarhiju karstnih kanala u ovom sistemu kojima se voda doprema do vrela Mlave (Vasić, 2017; Vasić et al. 2020). Hijerarhija kanala predstavljena je na konceptualnom modelu sistema (Sl. 6.79) sa koga se vidi dominantan, glavni karstni kanal koji brzo doprema vodu do vrela u uslovima aktivnog prihranjivanja i drugi, sporedni kanal koji preuzima dominaciju u recesionim uslovima (Vasić, 2017; Vasić et al. 2020).

Analizom hidrogramâ vrela Mlave, ustanovljeno je da se pri kritičnim vrednostima isticanja nižim od Q_{kr} = 0,3 m³/s sigurno javljaju laminarni uslovi tečenja, što je na nivou vrednosti Q₉₅, odnosno onima koje se javljaju u 95% vremena. Kritične vrednosti efektivne infiltracije koje prouzrokuju reakciju na vrelo pokazale su da skok izdašnosti iznosi 1,98% infiltrirane vode nakon recesionog perioda tokom 2015-2020 godine.



Sl. 6.79. Konceptualni model karstnog sistema vrelo Mlave (prema Vasić, 2017; Vasić et al. 2020, modificirano)

6.4.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrelo Mlave

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrelo Mlave izvršena je na osnovu skraćenih i kompletnih hemijskih analiza, izvršenim tokom 2015. i 2016. godine, prema podacima (Milanović S. & Vasić, 2015; 2016).

Hemijske analize pokazuju da su podzemne vode karstnog sistema vrelo Mlave izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, budući da su svi hemijski parametri u svim analizama ispod maksimalno dozvoljene koncentracije. To su vode izuzetnih fizičko-hemijskih karakteristika, bez boje, ukusa i mirisa, a jedini hemijski parametar koji je iznad dozvoljenih granice je mutnoća, koja se obično povećava pri nailasku velikih vrednosti efektivne infiltracije uzrokovane obilnim kišnim epizodama ili otapanjem snežnog pokrivača. Vrednosti mutnoće variraju od 1,2 u julu 2016. godine do 5 NTU što je zabeleženo tokom maja 2015. godine (Milanović S. & Vasić, 2015; 2016).

Mikrobiološke analize su pokazale da su podzemne vode karstnog sistema Mlave bakteriološki ispravne, tj. da je količina bakterija u podzemnim vodama ispod maksimalno dozvoljenih koncentracija u većini analiza. Uočeno je prisustvo ukupnih koliformnih i aerobno mezofilnih bakterija, čija se količina generalno povećava u periodu velikih voda, zajedno sa povećanjem mutnoće (Milanović S. & Vasić, 2015; 2016).

Kolebanje hemijskih parametara ukazuje i na mehanizam funkcionisanja karstnog sistema Mlave. Temperatura vode u periodu 2015-2016 oscilirala je 8,1°C (januar 2015. god) do 10,8°C (početak septembra 2015. god). Slične vrednosti navodi i Vasić (2017), upoređujući ih sa temperaturom vode ponorske zone Suvi Do, sa kojom je potvrđena veza vrelo.

Varijacija pH vrednosti praktično odsustvuje, budući da je uvek u granicama neutralnosti i da je oscilirala od 7,2 do 7,85. Specifična provodljivost je varirala u granicama od 385 do 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je ukupna mineralizacija podzemnih voda karstnog sistema Mlave reda veličine 255,3 mg/l, što ukazuje da se radi o malomineralizovanim vodama. Oscilacije rastvorenog kiseonika su od 3,8 do 9,1 mg/l, a redoks potencijala od 312 do 418 mV. U analizama nisu detektovani gvožđe, mangan i amonijak, a pojava nitrita je retka i obično iznosi od 0,01 do 0,02 mg/l (Milanović S. & Vasić, 2015; 2016).

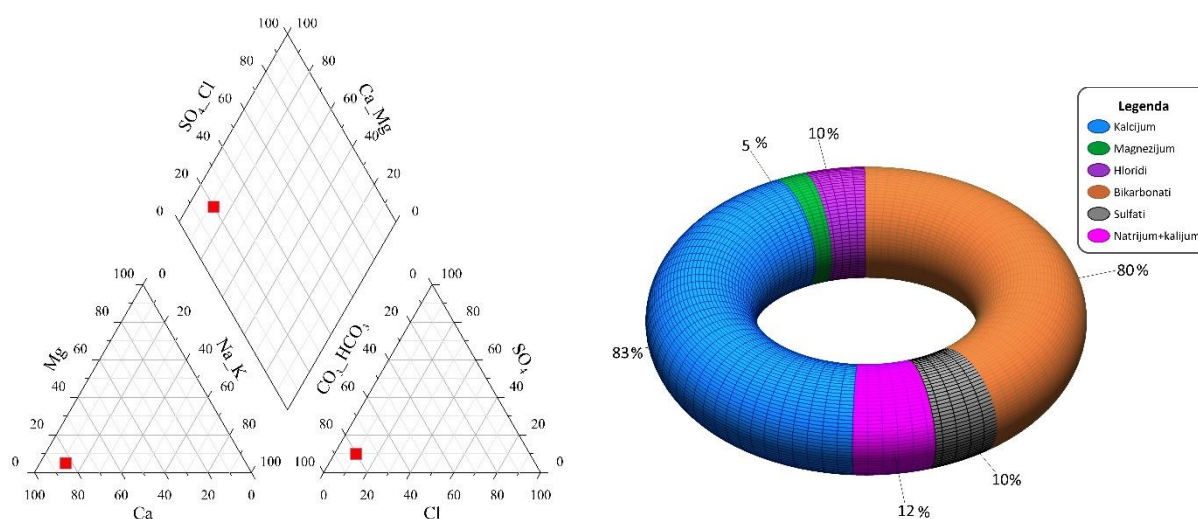
Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (195,25 – 305,1 mg/l ili prosečno 80%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 77 do 111 mg/l, tj. prosečno 83%ekv. Od ostalih makrokomponenti ističu se natrijum+kalijum (15,27 mg/l ili 12%ekv) od katjona, tj. sulfati (23 mg/l ili prosečno 10%ekv) (Milanović S. & Vasić, 2014).

Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Mlave, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2015-2016, dat je na Pajperovom i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.80), kao i formulom Kurlova (6.4) (Milanović S. & Vasić, 2014; 2015; 2016).

$$CO_{10,56}^2 M_{0,255} \frac{HCO_{80}^3}{Ca_{83} Mg_5 Na + K_{12}} pH_{7,5} TV_{8,9} T_{9,2} Q_{1080} \quad (6.4)$$

Na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema Mlave, koje su izrađene u periodu 2015-2016 godine, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom ispravnošću i sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema. Na osnovu izotopskih analiza, Vasić (2017) potvrđuje duboku sifonalnu cirkulaciju podzemnih voda karstnog sistema Mlave, uz definisanje glavnih kanala za koje je vezana brza cirkulacija i propagacija podzemnih voda nakon prihranjivanja, odnosno čitavog niza manjih pukotina i kanala ispod glavnih kanala koji obezbeđuju usporenu, sifonalnu cirkulaciju. Ovakav mehanizam isticanja uslovljava i specifičan hemijski i izotopski sastav podzemnih voda karstnog sistema Mlave (Vasić, 2017; Vasić et al. 2020).

Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu Mlave, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 8 ovog rada.



Sl. 6.80. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Mlave na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (prema podacima Milanović S. & Vasić, 2014; 2015; 2016).

6.5 Karstni hidrogeološki sistem vrela Oko Bijeje

Hidrogeološka istraživanja šireg slivnog područja vrela Oko Bijeje bila su predmet regionalnih istraživanja početkom 70-ih godina prošlog veka kada Burić (1976) vrši regionalna istraživanja sliva Drine u Crnoj Gori i njihovih podslivova. Nakon toga, kao rezultat istraživanja posle zemljotresa u Crnoj Gori 1979. godine, publikovana je Hidrogeološka karta Crne Gore razmere

1:100.000 (Radulović, M. & Radulović, V. 1982) i krupnije razmere 1:5.000 u cilju ocene seizmičke aktivnosti urbanih sredina (Radulović, M. 1996). Veoma korisni podaci objavljeni su u doktorskoj disertaciji i monografiji koja je iz nje objavljena, a koje tretiraju karstne terene Crne Gore (Radulović, M. 1996; 2000), odnosno magistarskom radu i monografiji Hrvačevića (1999; 2004). Najnovije hidrogeološke informacije predmetnog terena mogu se naći u monografiji Stevanovića & Blagojevića (2021), gde Kovács (2021) daje prikaz simulacije i predikcije isticanja karstnog vrela Oko Bijele, odnosno prognozu ponašanja ovog karstnog sistema na klimatske promene. Svi pomenuti podaci su konsultovani prilikom istraživanja i analize podataka o hidrogeološkim karakteristikama sliva vrela Oko Bijele.

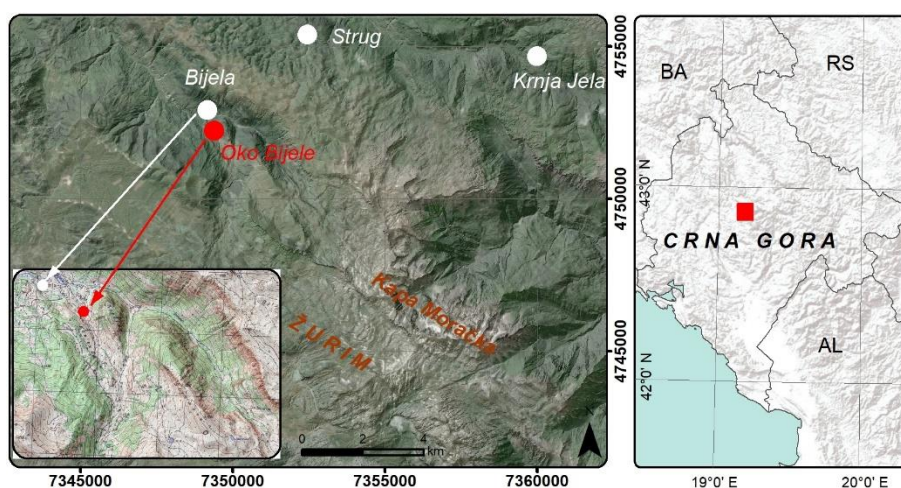
6.5.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Oko Bijele nalazi se u selu Gornja Bijela u centralnom delu Crne Gore, oko 12,5 km jugoistočno od Šavnika (Sl. 6.81). Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Dinaridima Crne Gore, i to onom delu koji hidrografski pripada Crnom moru, tako da Oko Bijele, kao i reka Bijela koja se formira nizvodno od vrela pripada slivovima većih reka – Komarnice, Pive, Drine i Dunava.

Selo Gornja Bijela, administrativno pripada Opštini Šavnik. Procena je da selo Gornja Bijela ima nešto manje od 90 stanovnika, dok sama Opština Šavnik prema popisu iz 2011. godine ima 2 070 stanovnika (MONSTAT, 2011). Ova administrativna jedinica je najređe naseljena opština u Crnoj Gori, gde navedeni broj stanovnika živi na 555 km², što ukazuje na gustinu stanovništva od svega 3,74 st/km².

Značajno je napomenuti da šire područje, izvan sliva vrela Oko Bijele, sadrži nekoliko kulturno-istorijskih spomenika u vidu manastira posvećenim sv. Vasiliju Ostroškom u Donjoj Bijeli, odnosno sv. Georgiju u Strugu, kao i manastir Podmalinsko. Takođe, treba istaći i vodopad Crnjak (ili Bećirovića mlini) koji se nalazi oko 300 m nizvodno od mesta isticanja podzemnih voda ovog sistema.

Gornja Bijela povezana je asfaltnim putem sa magistralom Šavnik – Nikšić, koja ujedno predstavlja i glavni putni pravac ka Boki Kotorskoj na jug, odnosno ka jugozapadnoj Srbiji, ako se krene na sever. Do samog vrela moguće je stići desetominutnim hodom od kraja puta u Gornjoj Bijeloj, pa rekom Bijelom uzvodno. Stanovništvo ovog područja tradicionalno se, pored poljoprivrede bavi stočarstvom i drvnom industrijom.



Sl. 6.81. Geografski položaj vrela Oko Bijele (crvena boja) na karti Crne Gore i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Boan T148-1-2

6.5.2 Klimatske karakteristike

Šire slivno područje vrela Oko Bijele odlikuje prelaznim tipom klimata, tj. sadrži kontinentalni i planinski tip, sa veoma hladnim i oštrim zimama i čestim mrazovima, niskim temperaturama i debljinom snežnog pokrivača koji može dostići i pet metara, i blagim letima, koja su vlažna i relativno hladna.

Analiza klimatskih karakteristika ovog područja izvršena je na osnovu podataka sa najbliže klimatološke stanice za period 2015 – 2020 god. za koju postoji najduži niz osmatranja – stanice Žabljak, koja se nalazi oko 35 km severoistočno od vrela Oko Bijele. Meteorološka stanica Žabljak predstavlja sinoptičku stanicu sa dnevnim merenjima padavina, temperature vazduha, visine snežnog pokrivača i brzine i pravca vetra. Period 2015-2020. godina bio je diktiran raspoloživošću podacima o izdašnosti vrela Oko Bijele.

U tabeli 6.33 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Žabljak.

Tabela 6.33. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Žabljak u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	195,8	106,5	132,1	84,5	40,8	86,1	46,8	71,3	70,5	299,9	187,1	0,1	1321,5
2016	145,6	260,9	268,9	76,4	173,6	101,9	138	60,2	81,6	150,9	180,6	11,4	1650
2017	80,7	158,6	90,8	95,8	95,6	88,2	94,8	12,9	92,8	89,5	245,6	419	1564,3
2018	74,6	221,4	323	92,9	156,1	194,2	76,3	137,6	20,2	161,6	282,3	95,3	1835,5
2019	113,8	107,7	47,2	91,5	148,3	73,1	112,1	39,3	63,3	49	448,7	172	1466
2020	57,8	72,8	199,4	65,4	91,2	129,7	71,3	118,2	133,4	271,1	21,8	286,1	1518,2
Prosek	111,4	154,7	176,9	84,4	117,6	112,2	89,9	73,3	77,0	170,3	227,7	164,0	1559,3

Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom sumom padavina bio novembar 2019. godine sa 448,7 mm pale kiše, dok je mesec sa minimalnom vrednošću pale kiše decembar 2015. godine sa svega 0,1 mm kiše. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 1321,5 mm 2015. godine do 1835,5 mm, koliko je ukupno palo 2018. godine. Prosečna vrednost padavina koja u periodu 2015 – 2020 mesečno padne na prostor MS Žabljak je 129,9 mm, dok je prosečna godišnja suma padavina za isti period 1559,3 mm/god.

U tabeli 6.34 dat je prikaz maksimalnih mesečnih i srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnjih vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina sa stanice Žabljak. Iz tabele se uočava da je mesec sa maksimalnom vrednošću ukupnog snega bio mart 2015. godine sa 156 cm ukupnog snega. Može se primetiti da na području na kome se nalazi stanica, i u maju može doći do snežnih padavina, kao što je bio slučaj u 2016, 2017. i 2019. godini. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom novembra i decembra, mada se sneg i u oktobru često može javiti, ali ne u obimu kao u novembru i decembru. Snežne padavine se javljaju u talasu od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u februaru. Srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina variraju od 25,1 cm 2016. godine do 72,1 cm 2015. godine, dok je prosečna srednjegodišnja vrednost ukupnog snega u periodu 2015 – 2020. godina 47,1 cm, uz napomenu da je proračun palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.34. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Žabljak u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje sumarne vrednosti ukupnog snega (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	80	102	156	115	0	0	0	0	0	7	25	20	72,1
2016	51	18	46	29	7	0	0	0	0	0	12	13	25,1
2017	70	61	48	27	1	0	0	0	0	29	12	75	40,4
2018	74	115	114	20	0	0	0	0	0	0	31	50	67,3
2019	93	96	84	14	2	0	0	0	0	0	0	18	51,2
2020	26	34	33	29	0	0	0	0	0	7	10	47	26,6
Prosek	65,7	71,0	80,2	39,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	7,2	15,0	37,2	47,1

U tabeli 6.35 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Žabljak.

Tabela 6.35. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Žabljak u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Pr.
2015	-2,5	-3,1	-0,7	2,7	10,6	13,1	18,3	16,5	12,2	6,8	3,1	-0,9	6,34
2016	-2,5	2,5	0,3	7,2	7,9	14,2	15,5	13,9	10,1	5,9	1,6	-3,7	6,07
2017	-8,8	-0,2	2,1	3,6	9,6	15,1	16,3	16,9	10,5	5,4	1,0	-2,2	5,79
2018	-0,9	-3,1	0,8	8,4	11,5	12,9	15,1	15,8	11,2	7,9	3,2	-3,0	6,65
2019	-5,4	-3,1	1,5	5,2	7,0	15,9	15,4	16,7	11,6	7,9	5,3	-0,5	6,46
2020	-3,3	-0,7	0,3	4,5	9,4	12,5	15,1	15,5	12,2	6,9	2,3	0,8	6,31
Prosek	-3,9	-1,3	0,7	5,3	9,4	13,9	15,9	15,9	11,3	6,8	2,8	-1,6	6,27

Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 18,3°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -8,8°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 5,79°C 2017. godine do 6,65°C, koliko je bilo 2018. godine, tako da prosečna višegodišnja vrednost temperature vazduha u periodu 2015-2020 iznosi 6,27°C.

Brzina i čestina kretanja vazdušnih masa osmatra se na dnevnom nivou na stanici Žabljak. U tabeli 6.36 date su prosečne mesečne vrednosti brzina vetra (u m/s), dok su čestine date prema pravcima iz kojih duvaju. S obzirom da se brzine vetra ne osmatraju prema pravcima, nije moguće prikazati ružu vetrova prema brzini vetra, već samo prema čestini, tj. broju dana tokom kojih duvaju vetrovi određenog pravca. Takva ruža vetrova prikazana je na sl. 6.82, sa koje se vidi da južni vetar duva najveći broj dana na prostoru Žabljaka.

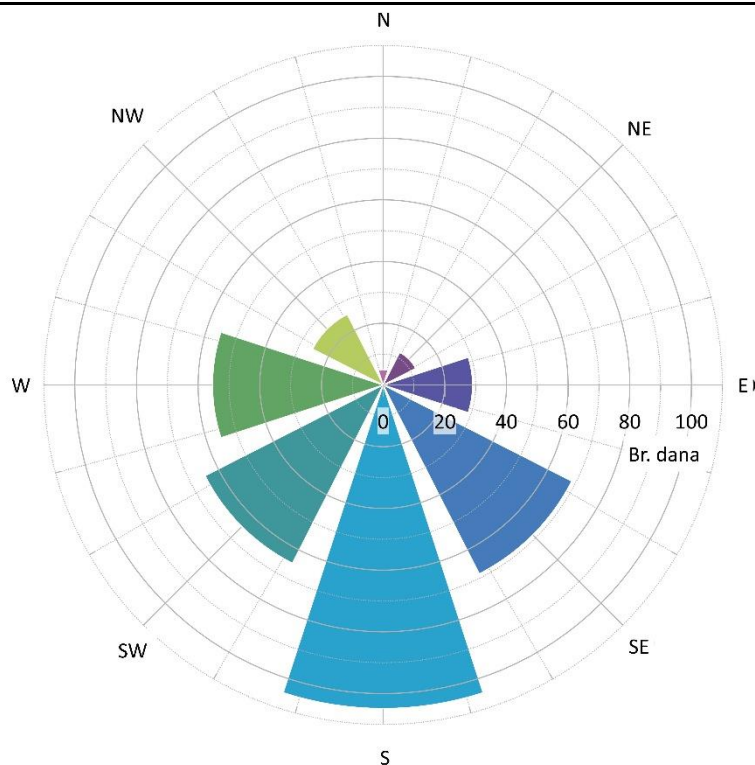
Tabela 6.36. Prosečne mesečne i godišnje brzine vetra (u m/s) i čestina vetra (broj dana) prema pravcima za stanicu Žabljak za period 2015-2020. god. (prema podacima ZHMS)

BRZINA VETRA (m/s)													
	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	3,20	2,83	2,92	3,21	2,96	2,83	2,31	2,09	2,44	2,28	2,61	2,02	2,64
2016	3,50	3,97	2,57	3,17	3,07	3,00	2,43	2,22	2,21	2,45	2,83	2,63	2,84
2017	2,32	2,81	3,05	3,07	2,99	2,87	2,66	2,52	2,82	2,31	1,95	3,00	2,70
2018	2,54	2,18	2,81	2,28	2,01	2,09	2,52	1,43	1,73	2,32	1,63	2,15	2,14

2019	2,33	2,34	1,94	2,04	2,22	1,66	2,02	1,85	1,87	1,77	3,13	3,24	2,20
2020	1,94	2,95	2,04	2,05	3,29	2,41	1,85	1,85	2,07	2,70	1,57	2,40	2,26

ČESTINA PRAVCA (u danima)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2015	1	5	26	58	112	61	71	31
2016	1	3	38	75	105	67	52	25
2017	1	7	24	62	106	64	71	30
2018	14	32	28	75	90	54	55	17
2019	11	14	36	74	107	67	31	25
2020	2	10	22	68	109	76	52	26
Prosek	5	12	29	69	105	65	55	26



Sl. 6.82. Ruža vetrova za stanicu Žabljak za period 2015-2020. god. (prema podacima ZHMS)

6.5.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

Sliv vrela Oko Bijele pripada slivu Pive, tj. Crnomorskom slivu. Nalazi se na samoj granici sa Jadranskim slivom, budući da planina Vojnik predstavlja granicu Jadranskog i Crnomorskog sliva, a ujedno i lokalnu vododelnicu sliva vrela Oko Bijele.

Najznačajniji rečni tokovi na širem istražnom prostoru su reka Bijela u centralnom delu i reka Tušinja na samom istoku područja. Reka Bijela nastaje od karstnog vrela Oko Bijele, odakle se formira površinski tok, u koji se oko 500 m nizvodno uliva povremeni potok Šorojevac. Spajanjem ova dva površinska toka formira se reka Bijela koja teče na severozapad da bi se u Šavniku ulila u Komarnicu. Reka Bijela dobila je svoj naziv po svom izrazito bujičnom karakteru, kada reka u maksimumu peni i dobija belu boju. Oko 300 metara nizvodno od Oka Bijele, u selu Gornja Bijela nalazi se vodopad Crnjak (ili Bećirovića mlini) koji je nekada korišćen za pokretanje lokalne vodenice. Idući još nizvodnije od vrela i vodopada, u samom centru sela Gornja Bijela nalazi se automatska hidrološka stanica na kojoj se meri nivo reke, a samim tim i izdašnosti vrela Oko Bijele, s obzirom na to da se potok Šorojevac uliva nizvodno od stanice.

Reka Bijela na svom putu na Šavniku i ušću u Komarnicu, prima veći broj levih i desnih pritoka, koje su u najvećem broju slučajeva povremenog karaktera. Ipak, sve one doprinose ukupnom proticaju Bijele, koja se oko 900 m nizvodno od Odovog mosta uliva u Komarnicu.

Generalno, hidrografska mreža kako na prostoru sliva Oka Bijele, tako i na širem istražnom prostoru je veoma slabo razvijena, što je uzrokovano značajnim prisustvom karbonatnih stena. Stoga, može se zaključiti da je ovaj prostor bogatiji podzemnim nego površinskim vodama. Jako karstifikovani krečnjaci i dolomiti usloveli su odsustvo površinskog oticaja, tako da se najveći deo atmosferskih padavina direktno infiltrira u podzemlje. Ipak, postoji određen broj površinskih tokova povremenog karaktera, koji formiraju površinski oticaj samo pri kišama jakog intenziteta. Jedan od takvih tokova je i povremeni tok uzvodno od Oka Bijele koji je aktivan samo pri velikim kišama i otapanju snežnog pokrivača, odnosno kada se nivo podzemnih voda karstne izdani toliko podigne da se aktiviraju fosilne tačke isticanja. Delineacija podslivova podzemnih voda je pogotovo kompleksna, imajući u vidu velike fluktuacije nivoa vode u karstnoj izdani, te se stoga na ovom prostoru moraju smatrati hipotetičnim, promenljivim zonama (Stevanović et al. 2021).

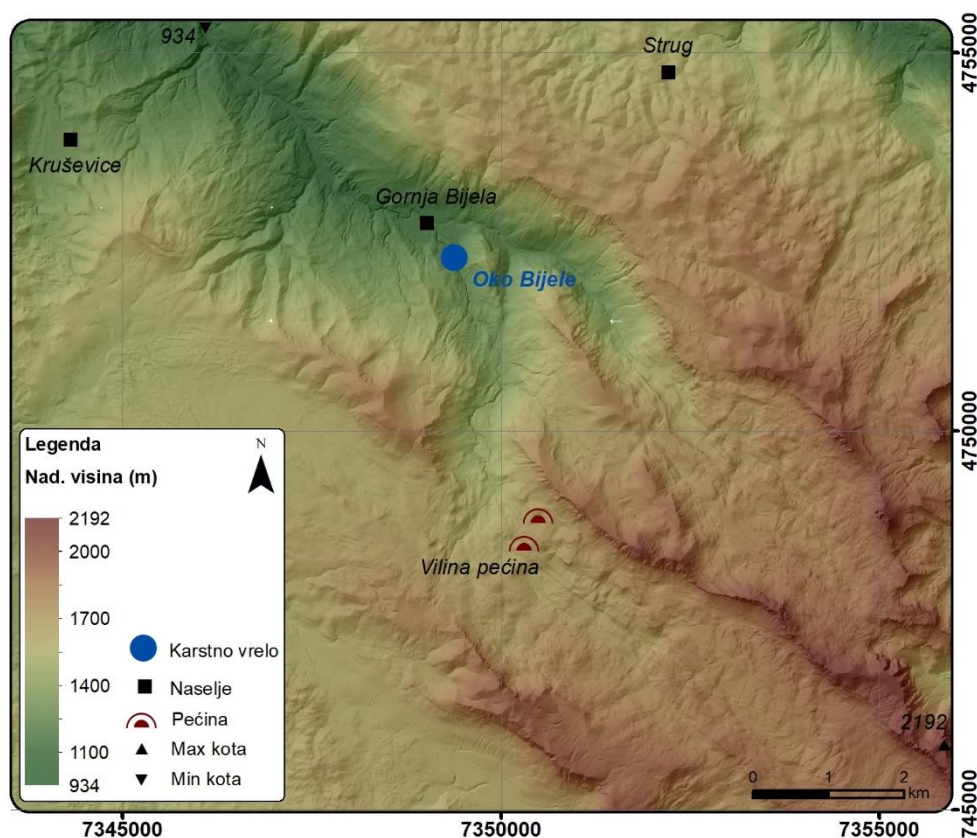
6.5.4 Geomorfološke karakteristike

Geomorfološke odlike šireg slivnog područja vrela Oko Bijele uzrokovane su tektonskom aktivnošću. Prema Raduloviću M. (1996), sliv vrela Oko Bijele pripada *Oblasti zaravni i visokih planina*. Ova oblast karakteristična je po veoma visokim planinskim vrhovima (Sl. 6.83), među kojima se na istražnom području ističu V. Žebalac (2129 mnm) koji pripada planini Lola, Žurim (2035 mnm) i vrhovi Moračkih planina (2192 mnm). Oblast zaravni i visokih planinskih vrhova je takođe poznata i po klisurama i kanjonima koji odvajaju visoke planine, međutim, na istražnom području ih nema, budući da mreža površinskih tokova praktično odsustvuje. Na severozapadnim delovima područja može se uočiti da nadmorske visine opadaju, budući da se teren spušta ka platou Šavnika, ka kome gravitira i reka Bijela. Rečno korito ove reke je u određenim delovima usečeno u krečnjake.

Na širem slivnom području vrela Oko Bijele nadmorske visine su od 934 mnm, koliko iznosi najniža tačka na severozapadu istražnog područja do 2192 mnm, što predstavlja najviši vrh istražnog područja na jugoistočnom delu karte, a koji pripada Moračkim planinama (Sl. 6.83).

Među dominantnim geomorfološkim procesima ističe se karstni proces, dok je u geološkoj istoriji bio aktivan i glacijalni proces, budući da se u Oblasti zaravni i visokih planina često mogu sresti glacijalni geomorfološki oblici poput valova i cirkova. Među površinskim karstnim oblicima najviše su rasprostranjene vrtače, kao levkasta udubljenja u krečnjacima, koja su najčešće ispunjena crvenicom (Sl. 6.83).

Podzemni geomorfološki karstni oblici (pećine i jame), slabo su rasprostranjene na istražnom terenu, tako da su na topografskim kartama uočene samo dve pećine od kojih je jedna imenovana kao Vilina pećina. Odsustvo pećina na površini terena verovatno je uzrokovano zaravnjenošću terena, te je veća verovatnoća za pojavom jama, kao vertikalnih karstnih kanala, koje se obično nastavljaju ispod vrtača.



Sl. 6.83. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Oko Bijele na kome su vrtače uočljive u vidu sivih tačaka u okviru slivnog područja vrela

6.5.5 Geološke karakteristike

Širi prostor sliva vrela Oko Bijele prema geološkoj rejonizaciji pripada Dinaridima i odlikuje se veoma složenom geološkom građom terena, što je posljedica intenzivne tektonske aktivnosti ovog područja u geološkoj historiji. Na prostoru koji je obuhvaćen slivom vrela Oko Bijele nalaze se stene mezozojske i kenozojske starosti. Među stenama mezozojske starosti ističu se donjokredni i gornjokredni sedimentni kompleksi, dok stene kenozojske starosti čine isključivo sedimenti kvartarne starosti u vidu glacijalnih i deluvijalnih sedimenata, kao i sipara.

Donja kreda na širem istražnom području predstavljena je valendijsko-otrivskim krednim krečnjacima, dolomitičnim krečnjacima i dolomitima ($K_1^{1,2}$). Sedimenti gornje krede su najrasprostranjeniji na širem istražnom području. Senon (K_2^3) je predstavljen sa dve facije – krečnjačkom i flišnom. Senonski fliš, poznat i kao Durmitorski fliš (Bešić, 1948) ima dinarski pravac pružanja, predstavljen je bazalnim brečama i konglomeratima ($^1K_2^3$) i laporovito-peskovitom facijom ($^2K_2^3$). Krečnjačku faciju senona ($^3K_2^3$) čini formacija izgrađena od krečnjaka, laporovitih krečnjaka, krečnjačkih breča i laporaca, dok se preko njih nalazi krečnjačka serija koja pripada mastrihtu ($^4K_2^3$).

Kenozojske stene predstavljene su kvartarnim tvorevinama glacijalnog porekla, kao i deluvijumom i siparima. Sastav morena, tj. glacijalnih sedimenata direktno je uzrokovan sastavom podloge kojom su se kretali lednici, te stoga u morenama najviše ima krečnjačkih blokova, a nešto manje pešćara, laporaca, eruptiva, breča i konglomerata (Kalezić et al. 1966).

Prema tektonskoj rejonizaciji Crne Gore, prostor kome pripada sliv vrela Oko Bijele nalazi se u Kučkoj tektonskoj jedinici (Bešić, 1948; Kalezić et al. 1966). Kučka tektonska jedinica ima

pravac pružanja severozapad-jugoistok i karakteristična je po dvema jedinicama nižeg reda – složeni antiklinalni oblik Vojnika, Maganika i Morače i sinklinorijum gornje Morače i Bijele, koji obuhvata sliv vrela Oko Bijele. Sinklinorijum gornje Morače i Bijele je širine od 3 do 15 km, dužine preko 40 km, a ispunjen je sedimentima laporovito-peskovite i krečnjačke facije gornjokrednog senonskog fliša (Bešić, 1948; Kalezić et al. 1966). Intenzivna tektonska aktivnost na ovom terenu kao rezultat je dala veliki broj nabora različitih vrsta i dimenzija. Najmarkantniji razlomni oblik na ovom prostoru je kraljuš Ljuta – Lebršnik duž koje su raskinuti i navučeni sedimenti laporovito-peskovite facije preko krečnjačke, dužine 12 km i sa veoma strmom ravni navlačenja od 30° do 70° (Kalezić et al. 1966).

6.5.6 Hidrogeološke karakteristike

Širi prostor istraživanja obuhvata karstni i intergranularni tip izdani, kao i uslovno – bezvodne terene (Prilog 9). Karstni tip izdani dominantan je i na ovom lokalnom nivou, ali i na prostoru cele Crne Gore budući da karbonatni sedimenti (čija debljina može ići i preko 5 000 m) pokrivaju oko 60% teritorije Crne Gore (Sekulić & Radulović M.M, 2019).

Na istražnom terenu diferencirana su dva podtipa karstne izdani – veće i manje izdašnosti. Karstni tip izdani veće izdašnosti formiran je u masivnim i slojevitim krečnjacima donje krede valendijsko-otrivskog kata i bankovitim i slojevitim krečnjacima gornje krede senonske starosti (kampan), koja predstavlja krečnjačku faciju Durmitorskog fliša. Ovaj tip izdani može se svrstati u kategoriju *Srednje do dobro karstifikovani krečnjaci kavernozno – pukotinske poroznosti*, prema klasifikaciji Radulovića M. (1996). Sa druge strane, karstni tip izdani manje izdašnosti formiran je u laporovitim i peskovitim krečnjacima donje krede senonske starosti (mastiht), koja predstavlja tipičnu faciju senonskog Durmitorskog fliša. Ovaj tip izdani može se svrstati u kategoriju *Slabo karstifikovani krečnjaci pukotinske i ređe kavernozne poroznosti*, prema klasifikaciji Radulovića M. (1996).

Osnovni vid prihranjivanja karstne izdani na istražnom području je direktnom difuznom infiltracijom atmosferskih padavina u podzemlje. Uslovi prihranjivanja karstnih podzemnih voda na ovom području su izuzetno povoljni, imajući u vidu da su krečnjaci dobro karstifikovani i da je vrednost padavina visoka. Najveća efektivna infiltracija voda je na ogolićenim krečnjačkim terenima koji su direktno izloženi na površini terena, tako da se u veoma skaršćenim i ogolićenim (holo)karstnim terenima sa izraženim površinskim i podzemnim karstnim oblicima vrši skoro potpuna infiltracija atmosferskih voda, odnosno nema površinskog oticaja (Radulović M. 1996; Hrvačević, 2004). Sa druge strane, na terenima koji su pokriveni vegetacijom, efektivna infiltracija je niža i procenjuje se na 50-70%, budući da se veliki deo padavina gubi u vidu evapotranspiracije ili zasićenja zemljišne vlage, posebno pri padavinama slabijeg intenziteta. Najintenzivnije prihranjivanje karstne izdani vrši se krajem zime, tj. tokom prolećnih meseci, u periodima otapanja snežnog pokrivača. Tada je čest slučaj da efektivna infiltracija uključuje vode potekle od otopljenog snega, ali i od kiša jakog intenziteta. Pomenuto vodi i do povećanja oticaja površinskih tokova, odnosno reke Bijele na istražnom području, kada može doći i do plavljenja okolnih terena, s obzirom na njen bujični karakter.

Cirkulacija karstnih podzemnih voda odvija se kroz formirane prsline, pukotine, pećinske kanale i kaverne, dok su pravci kretanja karstnih izdanskih voda posledica geološke građe i tektonike terena, stepena karstifikacije i lokalnih hidrogeoloških uslova. Dominantan pravac kretanja podzemnih voda jeste duž regionalnih raseda. Hidraulički režim tečenja najčešće je turbulentni tokom čitave hidrološke godine, osim u periodima recesije, kada režim cirkulacije postaje laminaran. Turbulentni režim tečenja karstnih podzemnih voda uslovljava brzu propagaciju i velike filtracione brzine izdanskih tokova. Pravac kretanja podzemnih voda

istražnog područja je od jugoistoka ka severozapadu, odnosno ka reci Bijeloj koja je glavni erozioni bazis ovog područja.

Radulović M. (1996) navodi da je izvršen samo jedan opit trasiranja na predmetnom području, kada je traser ubačen na Krnovskoj glavici 2. oktobra 1975. godine, koji se pojavio posle 19 dana (21.10.) u reci Bijeloj. Radulović M. (1996) ističe visinsku razliku između lokacije ubacivanja i pojave trasera od 485 m, kao i pravolinijsko rastojanje od 3500 m, na osnovu čega fiktivna brzina tečenja podzemnih voda na ovom prostoru iznosi 3,74 cm/s, koja se može očekivati i u sistemu Oko Bijeje.

Dreniranje karstnih podzemnih voda istražnog područja vrše se na hipsometrijski najnižim tačkama, kada nivo podzemnih karstnih voda dostigne hidrogeološku barijeru. Na širem istražnom području najznačajnije karstno vrelo je Oko Bijeje, koje ističe tokom cele hidrološke godine. Iako postoje još neki karstni izvori, ovo vrelo je jedino stalno, sa stabilnim isticanjem podzemnih voda. Karstno vrelo Oko Bijeje ističe iz senonskih krečnjaka, na kontaktu sa flišnom senonskom serijom. Vrelo na samom mestu isticanja formira levkasto udubljenje (Sl. 6.84), što može ukazivati na sifonski dovodni kanal.



Sl. 6.84. Karstno vrelo Oko Bijeje pri visokim vodama (levo, novembar 2021. god.) i niskim vodama (desno, jul 2018. god., foto: Z. Stevanović)

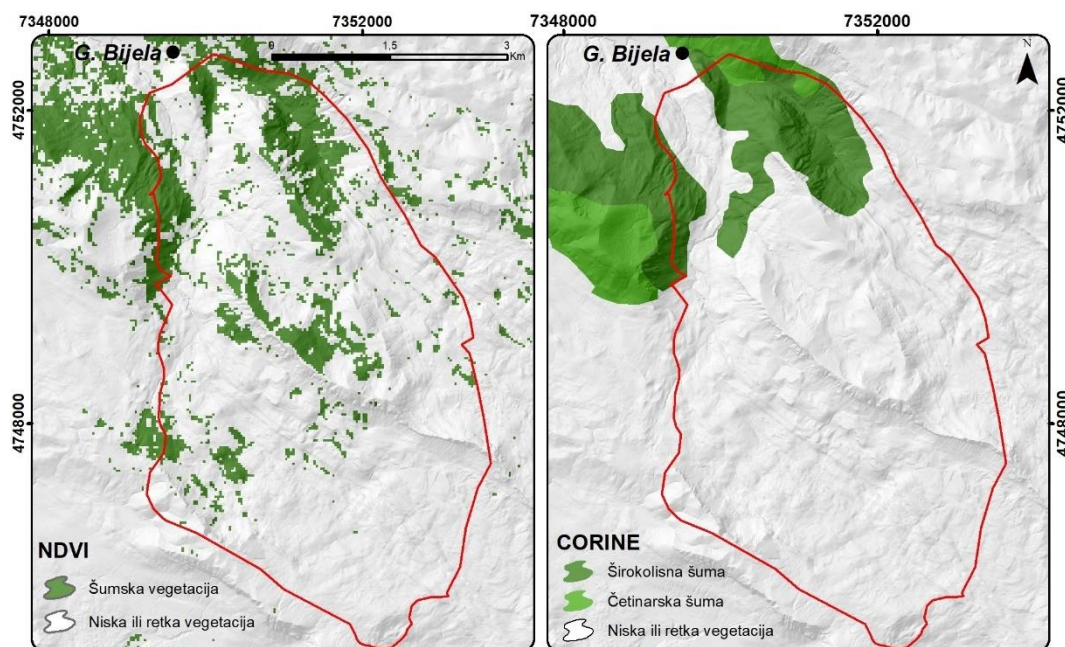
Prihranjivanje se vrši isključivo na račun atmosferskih padavina koje se infiltriraju na visokoplaninskim predelima i zaravnima u zaleđu vrela. Vrelo Oko Bijeje nije kaptirano, a ekstremne vrednosti izdašnosti osciliraju od svega 10-ak l/s tokom letnjih meseci do skoro 30 m³/s koliko iznosi maksimalna izdašnost tokom perioda prolećnih maksimuma uzrokovanih otapanjem i infiltracijom voda od snežnog pokrivača, odnosno jesenjih maksimuma uzrokovanih obilnim kišnim epizodama. Iz pomenutog se može uočiti da je u pitanju vrelo sa veoma visokim koeficijentom hidrodinamičke neravnomernosti, što ukazuje na vrlo dinamičan režim karstne izdani vrela Oko Bijeje. Površina sliva vrela Oko Bijeje procenjuje se na oko 25 km², sa prosečnom efektivnom infiltracijom od 56% (Stevanović & Blagojević, 2021). Ukoliko se izvrše korekcije kiše i proračuna otopljeni sneg, površina sliva vrela Oko Bijeje se procenjuje na 23 km², pri čemu se dobija efektivna infiltracija od 84%. Istovremeno, sa usvojenom slivnom površinom od 23 km², dobija se da skoro 80% infiltriranih voda istekne na vrelo, što bi značilo da ostatak od 20% istekne najverovatnije u vidu površinskog oticaja. To i jeste logično, budući da se pri velikim vodama formira površinski tok Šorojevac, koji se uliva u reku Bijelu neposredno ispod merne stanice Oka Bijeje, dok se i u zaleđu vrela formiraju povremeni površinski tokovi, kada se aktiviraju paleotačke isticanja podzemnih voda.

6.5.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Oko Bijele

6.5.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Za slivno područje vrela Oko Bijele na karstnom masivu Lole i Žurima, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 17% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 13% sliva (Sl. 6.85). Stoga, finalni vegetacioni indeks je procenjen na 0,15, što bi značilo da finalna vrednost efektivne infiltracije je sačinjena od 15% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 85% viška vode dolazi sa otvorenih područja sa niskom ili retkom vegetacijom.

Kalibracija deficita vlage, površine sliva i efektivne infiltracije je pokazala da maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje vrela Oko Bijele iznosi 150 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Ova vrednost se mora uzeti sa rezervom, budući da je osrednjena za ceo period osmatranja. Najveći deficit vlage u zemljištu je tokom letnjih i ranih jesenjih meseci, dok se najmanji deficit dostiže tokom prolećnih meseci, kada dolazi do značajnijih kišnih padavina i otapanja snežnog pokrivača.



Sl. 6.85. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva vrela Oko Bijele (prema USGS, snimak zabeležen 3. avgusta 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva vrela Oko Bijele (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Oko Bijele prikazana je crvenom linijom

Tabela 6.37 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabelâ 6.33-6.36), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu Oko Bijele. Takođe, date su i procentualne vrednosti parametara evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega. Iz tabele 6.37 uočava se da je vrednost korigovanih padavina i na područjima sa niskom ili retkom vegetacijom i na područjima pod vegetacijom bitno veća od izmerenih na stanici Žabljak, tako da je ukupna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom prosečno veća za 1835,2 mm od izmerenih vrednosti kiše, dok je na području sa vegetacijom ona veća za 1347,9 mm. Značaj porast korigovanih vrednosti kiše je u tome što je pri korekciji uzet u obzir vetar, koji je značajan klimatski faktor na prostoru Žabljaka. Ipak,

najveći uticaj na ovoliku razliku izmerenih i korigovanih padavina imaju snežne padavine, po kojima je ceo prostor Durmitora poznat, budući da ukupne korigovane padavine uključuju i sneg preračunat u vodeni ekvivalent.

Tabela 6.37. Usporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Žabljak, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Oko Bijeje za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Oko Bijeje

	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	1794,2	1120,7	2050,4	1335,5	1608,9	1581,9
PgSWE (mm)	3720,5	4345,4	3567,4	2172,3	3279,9	3417,1
PgiSWE (mm)	3146,5	3679,4	3038,6	2025,8	2759,0	2929,9
PET (mm)	501,3	512,7	514,4	512,7	509,8	510,2
PET/Pbruto (%)	27,9	45,7	25,1	38,4	31,7	32,3
AETg (mm)	474,4	418,2	482,6	449,1	478,4	460,5
AETg/PgSWE (%)	12,8	9,6	13,5	20,7	14,6	13,5
AETveg (mm)	468,4	408,6	469,9	429,9	472,2	449,8
AETv/PgiSWE (%)	14,9	11,1	15,5	21,2	17,1	15,4
Wi (g) (mm)	3252,3	3917,8	3120,8	1700,2	2787,2	2955,7
Wi (g) / PgSWE (%)	87,4	90,2	87,5	78,3	85,0	86,5
Wi (š) (mm)	2685,7	3285,1	2588,2	1583,5	2254,3	2479,4
Wi (š) / PgSWE (%)	85,4	89,3	85,2	78,2	81,7	84,6
Ief (mm)	3167,3	3822,9	3040,9	1682,7	2707,2	2884,2
Ief/Pbruto (%)	176,5	341,1	148,3	126,0	168,3	182,3
Ief/PgSWE (%)	85,1	88,0	85,2	77,5	82,5	84,4
Ief/PgiSWE (%)	100,7	103,9	100,1	83,1	98,1	98,4
Qsr (m³/s)	1,75	1,17	2,32	1,31	1,48	1,61
Q (mm) (F = 23 km²)	2412,5	1608,0	3188,7	1791,7	2040,6	2208,3
Δ Ief-Q (mm)	754,8	2214,8	-147,8	-109,0	666,6	675,9
Q / Ief (%)	76,17	42,06	104,86	106,48	75,38	76,57

Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 501,3 mm do 514,4 mm. Vrednost PET je dosta manja od izmerenih i korigovanih vrednosti padavina, što ukazuje na značajnu infiltraciju padavina u karstni sistem vrela Oka Bijeje. Vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa vodenim ekvivalentom snega se kreću od 418,2 mm do 482,6 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 408,6 mm do 472,2 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u pojedinim hidrološkim godinama iznosilo od 9,6% do 20,7% za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom, odnosno od 11,1% do 21,2% za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **13,5%**, dok je za područja pod vegetacijom **15,4%**, što još jednom dokazuje da se velike količine prispelih padavina u vidu kiše i snega infiltriraju u podzemlje.

Ukupni višak vode u zemljištu iznosi od 1700,2 mm do 3917,8 mm (ili 78,2% do 90,2% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 1582,5 mm do 3285,1 mm (ili od 78,2% do 89,3% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **84,6%**, dok je za područja pod vegetacijom **86,5%**. Procentualne vrednosti korespondiraju sa vrednostima stvarne evapotranspiracije, te se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan. Može se zaključiti da je vrednost efektivne infiltracije na području sliva vrela Oko Bijele izuzetno visoka, čak 85%, što bi značilo da se taj procenat pale kiše i snega u nekom trenutku infiltrira u karstni sistem. Međutim, realna vrednost je verovatno manja za oko 10-ak procenata, što opet predstavlja visoku efektivnu infiltraciju ovog karstnog sistema.

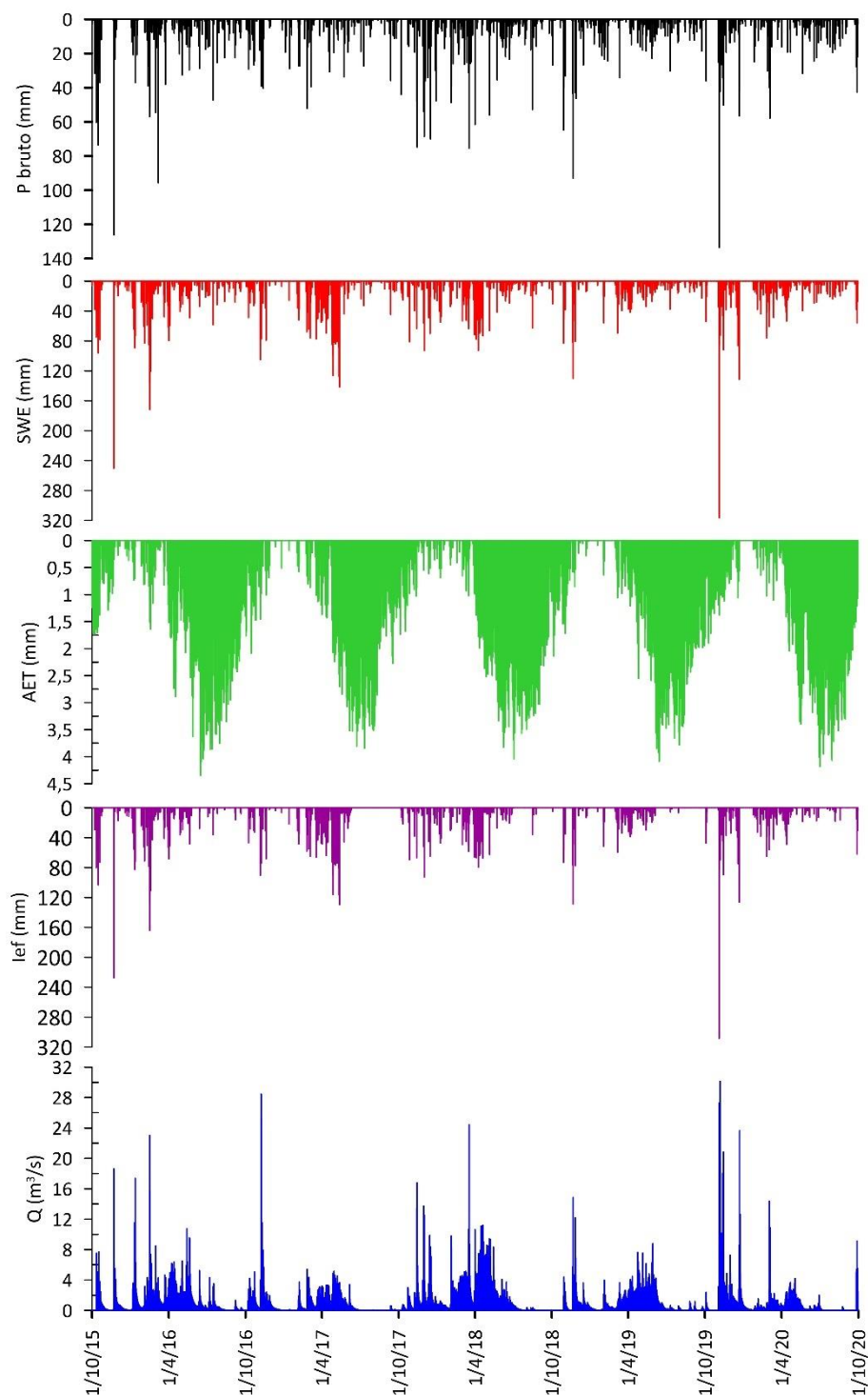
Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 1682,7 mm do 3822,9 mm u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu. Površina sliva vrela Oko Bijele od 23 km² usvojena je prilikom kalibracije efektivne infiltracije, zemljišne vlage i površine sliva. S tim u vezi, dobijeno je da u periodu 2015-2020 godina prosečno istekne oko 77% infiltrirane vode, dok se ostatak voda drenira preko površinskog oticaja, odnosno akumulira u vidu rezervi u sistemu. Uočava se da je tokom hidrološke godine 2016-2017 (koja je ocenjena kao sušna) isteklo na vrelu samo 42% infiltriranih voda, dok je tokom hidroloških godina 2017-2018 i 2018-2019 isticalo oko 5-6% više vode nego što je infiltrirano. Posledica niskog procenta istekle vode u odnosu na infiltriranu vodu tokom sušne godine, može se objasniti velikom dubinom do nivoa podzemnih voda, koji može biti i preko 300 m, ali i podzemnim oticajem. Naime, tokom sušne godine, infiltrirana voda duže putuje kroz sredinu, tako da se znatan deo verovatno izgubi podzemnim oticajem dok dođe do nivoa podzemnih voda vrela. Sa druge strane, tokom vlažne godine, nivo podzemne vode je viši, infiltrirana voda se brže transportuje od zone prihranjivanja i manje vode se gubi lateralnim podzemnim oticajem.

Grafički prikaz dnevnih vrednosti izmerenih količina padavina za meteorološku stanicu Žabljak, vrednosti vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Oko Bijele dat je na uporednom dijagramu 6.86. Na pomenutom dijagramu prikazane su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja koja su sa niskom ili retkom vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja.

Sa pomenutog dijagrama uočljiva je pojava ciklusa stvarne evapotranspiracije, sa izraženim pikovima tokom vegetacionog perioda u prolećnim i letnjim mesecima. Uočava se da vrednosti efektivne infiltracije dostižu maksimum na kraju vegetacionog perioda, odnosno tokom prolećnih i letnjih meseci, dok praktično odsustvuju tokom letnjih, sušnih meseci. Isto tako, uočljivo je da vrednosti izdašnosti vrela Oko Bijele korespondiraju sa pikovima efektivne infiltracije, što se može videti i u periodu visokih i u periodu niskih voda. Uočljivo je i da vrelo reaguje na svaku promenu efektivnih infiltracija, čak i nakon recesionog perioda, što može ukazivati na slabe retencione sposobnosti karstnog sistema, odnosno na njegov relativno mali rezervoar, koji se ne popunjava nakon recesije, već novoinfiltrirane vode odmah ističu na vrelu.

Sl. 6.86 pokazuje intenzivnu efektivnu infiltraciju tokom prolećnih meseci, koja je najuočljivija u 2017, 2018. i 2019. godine, što zapravo odgovara periodu topljenja snega, tako da se sistem očigledno prihranjuje najviše iz ovog resursa, a manjim obimom preko direktno pale kiše. Interesantno je da se u tom periodu ne javljaju apsolutni maksimumi, već podzemna voda kontinuirano ističe u velikim količinama na vrelu. Apsolutni pikovi se javljaju kao reakcije na pojedinačne kišne epizode, kada je očigledno da se sistem prihranjuje na račun kiše, a ne otopljenog snega. Takva situacija javlja se i nakon recesionog perioda u svakoj hidrološkoj godini, što još jednom upućuje na pretpostavku o slabim akumulativnim sposobnostima sistema. Osim toga, na sl. 6.86 mogu se uočiti i periodi odsustva efektivne infiltracije, i to

najčešće tokom letnjih meseci, kada vrednosti kiše isparavaju ili se troše na zasićenje zemljišne vlage, a izostaje prihranjivanje karstnog sistema, što se i vidi na hidrogramu vrela, kada apsolutni minimumi izdašnosti iznose svega 3 – 6 l/s. Na to ukazuju sumarni dijagram na sl. 6.86 pokazujući da, iako je bilo kiše u tim periodima godine, efektivna infiltracija odsustvuje.



Sl. 6.86. Uporedni prikaz dnevni vrednosti izmerenih padavina sa stanice Žabljak, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Oko Bijeje za 2015 – 2020. god.

6.5.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Vremenski period za koji su analizirani podaci je od 1. oktobra 2015. do 30. septembra 2020. godine. Važna napomena je da je vremenska serija isticanja u periodu 2015-2020 obuhvatala

prekid osmatranja u intervalu 7.2. – 14.3.2018. godine usled neispravnosti automatske stanice, tako da podaci u tom vremenskom periodu ne postoje. Radi konzistentnosti vremenske serije isticanja podzemnih voda vrela Oko Bijeje, ali i mogućnosti analize u sklopu kvantitativne karakterizacije, kreiran je kros-regresioni model na osnovu koga je popunjen nedostajući niz. Ovaj model uključuje simulaciju dnevnih vrednosti isticanja na osnovu dnevnih vrednosti efektivne infiltracije. Kros-regresionim modelom 4. reda simulirane su vrednosti isticanja za hidrološku godinu 2016-2017 ($r_k = 0,51$), tako da su parametri modela iskorišćeni za popunjavanje vremenske serije isticanja u nedostajućem periodu 2018. godine na osnovu jednačine (6.5):

$$Q_t = 0.4602 + 0.04347Ief_{t-1} + 0.0185Ief_{t-2} + 0.0155Ief_{t-3} - 0.005Ief_{t-4} \quad (6.5)$$

Tabela 6.38 prikazuje osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja karstnih podzemnih voda vrela Oko Bijeje, i to za svaku pojedinačnu hidrološku godinu, kao i za celokupni period osmatranja 2015 – 2020. godina.

Tabela 6.38. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda sistema Oko Bijeje za period 2015 – 2020. godine (prema podacima ZHMS Crne Gore). Legenda: N – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} – srednja vrednost serije; Mdn – medijana; M – mod; Min – minimalna vrednost serije; Max – maksimalna vrednost serije; VAR – varijansa serije; σ – standardna devijacija; Cv – koeficijent varijacije; Cs – koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
				m^3/s						
2015-2016	366	1,75	0,75	0,0642	0,00429	23,03	7,16	2,68	152,46	3,70
2016-2017	365	1,17	0,34	0,0120	0,01036	28,46	5,72	2,39	203,85	7,35
2017-2018	365	2,33	1,04	0,0043	0,00429	24,44	9,70	3,11	133,92	2,43
2018-2019	365	1,31	0,48	0,0028	0,00285	14,87	3,46	1,86	142,32	2,71
2019-2020	366	1,48	0,39	0,0062	0,00426	30,14	12,00	3,46	233,35	5,14
2015-2020	1827	1,61	0,60	0,0062	0,00285	30,14	7,76	2,79	173,12	4,46

Tabela 6.38 pokazuje da je izdašnost karstnog vrela Oko Bijeje u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,00285 m^3/s do 30,14 m^3/s , tako da je srednja vrednost 1,61 m^3/s , medijalna 0,6 m^3/s , odnosno modalna vrednost 0,0062 m^3/s , što bi bila najfrekventnija vrednost vremenske serije. Minimalne vrednosti oscilirale su od 0,00285 do 0,01036 m^3/s , dok su maksimumi u opsegu 14,87 do 30,14 m^3/s . Visoke vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju velike razlike između minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda ovog sistema, kao što se i može videti iz tabele 6.38, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno.

Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini karstnog sistema (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020), tako da vrelo Oko Bijeje pripada klasama *Visoko* i *Veoma visoko* razvijeni sistemi, ukoliko se posmatraju pojedinačne hidrološke godine, dok ako se uzme ceo period, onda vrelo pripada klasi *Visoka razvijenost* sistema, u smislu veličine karstifikacije.

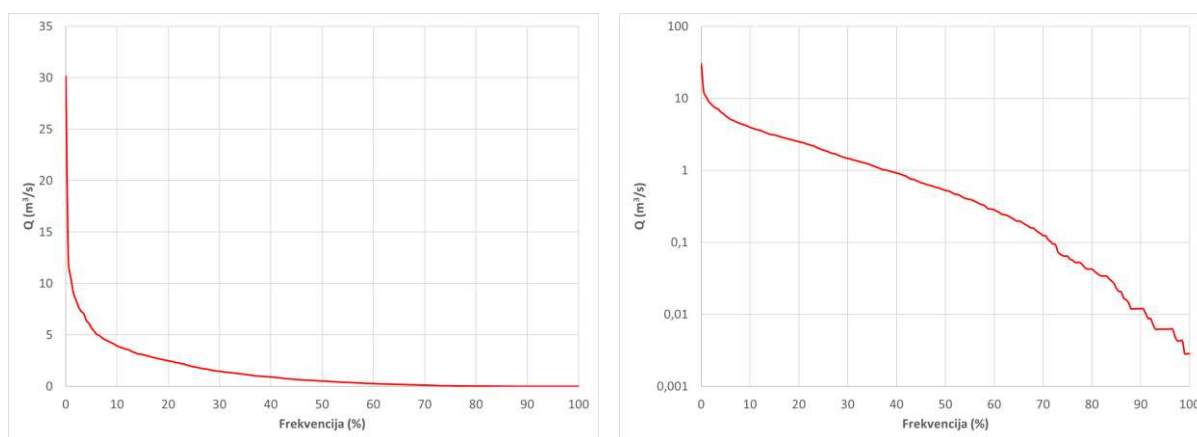
6.5.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

Krive trajanja dnevnih protoka na vrelu, analizirane su za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), a rezultati su dati u tabeli 6.39, kao i grafički na sl. 6.87 preko dijagrama normalne i log-normalne raspodele u cilju preciznije evaluacije, pre svega minimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda na vrelu Oko Bijeje.

Tabela 6.39. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Oko Bijeje na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m³/s

Period	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₃₀	Q ₄₀	Q ₅₀	Q ₆₀	Q ₇₀	Q ₈₀	Q ₉₀	Q ₉₅	Q ₉₉
2015-2020	10,50	5,70	3,95	2,50	1,46	0,92	0,53	0,28	0,12	0,04	0,01	0,01	0,003

Iz tabele 6.39 može se uočiti da vrednost je u 50% vremena osmatranja (Q₅₀) isticanje na vrelu iznosilo 0,53 m³/s, što generalno korespondira sa medijalnom vrednošću. Za analizu sušnih perioda bitne su vrednosti Q₉₅ – Q₁₀₀, dok su za analizu poplavnih perioda bitne veličine Q₀ – Q₁. Tako, tabela 6.39 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Oko Bijeje mogu očekivati vrednosti isticanja od 0,003 m³/s (Q₉₉) do 0,01 m³/s (Q₉₅). Pomenute ekstremne vrednosti ukazuju na skoro presušivanje vrela, s obzirom na jako male vrednosti isticanja. Sa druge strane, poplavni talasi koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose 10,5 m³/s (Q₁) na vrelu. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od 3,95 m³/s do 10,50 m³/s (Q₁₀ do Q₁), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od 0,01 m³/s do 0,12 m³/s (Q₉₅ do Q₇₀).



Sl. 6.87. Krive trajanja protoka vrela Oko Bijeje za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Analizirajući krive trajanja protoka podzemnih voda na vrelu Oko Bijeje, uočava se izrazito strm nagib krive za vrednosti frekvencije od 1 do 10%, što ukazuje na dobro razvijen karstni sistem koji transportuje vodu u turbulentnom režimu tečenja kroz karstne kanale i pukotine ka zoni isticanja. Sa druge strane, u sušnim periodima godine, dakle sa učestalošću isticanja na nivou Q₉₅ – Q₉₉, na dijagramu log-normalne raspodele na nivou celokupnog perioda osmatranja (Sl. 6.87) nije uočljiva tačka infleksije, što ukazuje na dominantno isticanje podzemnih voda sistema Oko Bijeje kroz karstne kanale, dok je isticanje kroz matriks krečnjaka ili kroz manje karstne kanale minimalno. Ovaj fenomen, koji je različit od prethodnih primera, jasno ukazuje na mali rezervoar sistema, odnosno na brzu propagaciju novoinfiltrirane vode kroz karstne kanale, tako da se ne očekuje značajnija akumulacija vode u sistemu.

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q₅₀ / Q₉₀) ukazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Oko Bijeje iznosi čak 53, čime je definisana veoma visoka varijabilnost isticanja ovog vrela. Sa druge strane, odnos Q₉₀ / Q₅₀ ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema Oko Bijeje, ovaj odnos je 0,022, što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela svega 2% vode dolazi na račun baznog oticaja. Ovako niska vrednost se

verovatno ne može uzeti kao udeo baznog oticaja u formiranju hidrograma vrela Oko Bijeles, budući da je ona sigurno znatno veća, ali takođe ukazuje na nisku akumulativnost sistema.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al., 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Oko Bijeles iznosi čak 395, tako da ovo vrelo svrstava u klasu vrela sa veoma nestabilnim isticanjem karstnih podzemnih voda. Ovako sračunata varijabilnost isticanja vrela daje logičnije i realnije vrednosti od onih koje bi se dobile odnosom ekstremnih maksimalnih i minimalnih vrednosti. Ukoliko bi se one razmatrale, dobio bi se koeficijent hidrodinamičke neravnomernosti od preko 10 000, što je 27 puta više od odnosa koji se dobije relacijom Q_{10} / Q_{90} .

6.5.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Na sl. 6.86 jasno se uočavaju vremenski periodi tokom letnjih meseci bez efektivne infiltracije, pokazujući da iako nije bilo efektivne infiltracije tokom izdvojenog recesionog perioda, bruto padavine su zabeležene na stanici Žabljak. Bruto padavine koje su pale u recesionom periodu na slivnom području vrela nisu bile transformisane u efektivnu infiltraciju, već su isparile ili bile „potrošene“ na zasićenje zemljišne vlage. Na taj način, može se konstatovati da je za karstni sistem vrela Oko Bijeles ispunjen teorijski uslov o odsustvu aktivnog prihranjivanja tokom odabranih recesionih perioda. Detaljnijom analizom dijagrama može se ustanoviti da se nakon recesionog perioda veoma brzo javljaju reakcije sistema u vidu isticanja na vrelo, što bi ukazalo na pretpostavku da sistem ima slabe retencione sposobnosti i da se novoinfiltrirana voda veoma brzo transportuje od zone prihranjivanja do zone isticanja, bez duže akumulacije u sistemu.

Tabela 6.40 prikazuje rezultate analize recesionih krivih vrela Oko Bijeles za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.40. Rezultati recesione analize karstnog vrela Oko Bijeles za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

Godina	Recesioni period	Koeficijent recesije			$V_0 \times 10^6$ (m^3)	$V^* \times 10^6$ (m^3)	$V_{total} \times 10^6$ (m^3)	t (dani)	
2015-2016	17.7. - 5.9.2016	MIKROREŽIMI PRAŽNENJA	1	α_1	0,3537	V_1	0,04	1,84	3
			2	α_2	0,1401	V_2			5
			3	α_3	0,0623	V_3			43
			ΣV_0			1,89			$\Sigma = 51$
2016-2017	6.6. - 8.9.2017	MIKROREŽIMI PRAŽNENJA	1	α_1	0,3841	V_1	0,21	1,65	4
			2	α_2	0,0837	V_2			44
			3	α_3	0,0048	V_3			47
			ΣV_0			1,86			$\Sigma = 95$
2017-2018	23.6. - 1.8.2018	MIKROREŽIMI PRAŽNENJA	1	α_1	0,2072	V_1	0,31	1,25	4
			2	α_2	0,0966	V_2			33
			3	α_3	0,0096	V_3			3
			ΣV_0			1,56			$\Sigma = 40$
2018-2019	6.6. - 24.8.2019	MIKROREŽIMI PRAŽNENJA	1	α_1	0,1587	V_1	0,0059	3,629	9
			2	α_2	0,0693	V_2			63
			3	α_3	0,0115	V_3			8
			ΣV_0			3,68			$\Sigma = 80$
2019-2020	29.6. - 24.9.2020	MIKROREŽIMI PRAŽNENJA	1	α_1	0,4045	V_1	0,111	0,587	4
			2	α_2	0,2282	V_2			14
			3	α_3	0,0048	V_3			70
			ΣV_0			0,698			$\Sigma = 88$

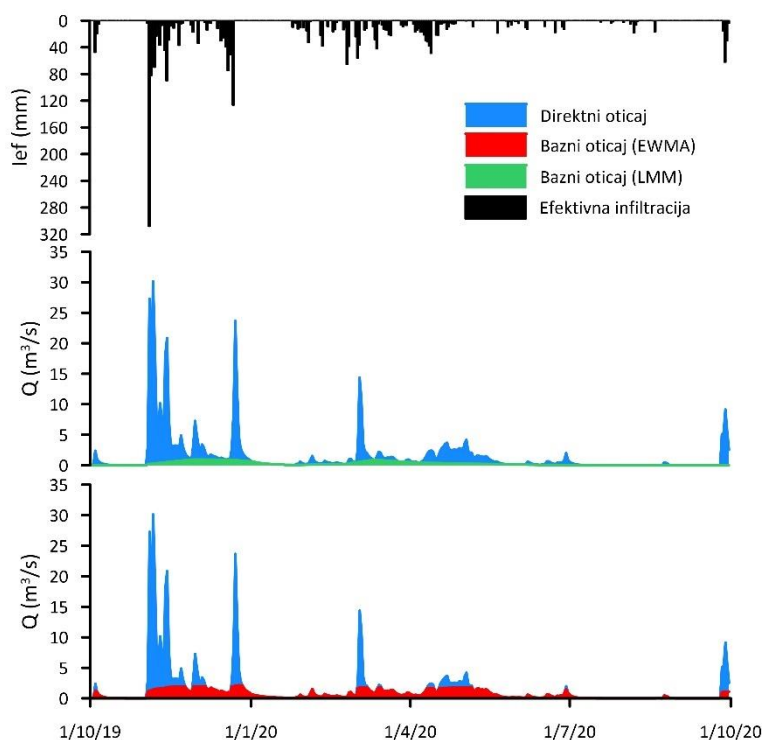
Posmatrajući celokupni period osmatranja od 2015. do 2020. godine, može se zaključiti da se karstni sistem vrela Oko Bijele može aproksimirati sa tri mikrorežima pražnjenja tokom perioda recesije, što je odlika dobro karstifikovanog sistema. Prvi mikrorežimi pražnjenja najčešće se ne pokoravaju Majeovoj eksponencijalnoj jednačini, budući da se dešavaju u turbulentnom režimu tečenja, te je korektnije definisati ih kao β režim. Na to ukazuje i red veličine koeficijenta recesije od 10^{-1} u skoro svim recesionim perioda, koji osciliraju od 0,1587 do 0,4045. Sa druge strane, laminarni režim cirkulacije najverovatnije se dešava samo tokom trećih mikrorežima pražnjenja kada izdašnost vrela padne i ispod 10 l/s. Koeficijenti recesije poslednjih mikrorežima pražnjenja su reda veličine 10^{-2} do 10^{-3} , oscilirajući u dijapazonu od 0,0048 do 0,06. Zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine varira od 0,58 m³ do 3,63 m³, tako da prosečna zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine iznosi $1,79 \times 10^6$ m³.

6.5.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

Primena LMM metode uključila je parametar f od 0,9, i parametar N koji u slučaju vrela Oko Bijele iznosi $N=6$. Primenom LMM metode, proračunate su dnevne vrednosti baznog oticaja za period 2015 – 2020. godina, kao i vrednosti indeksa baznog oticaja u vidu relacije Q_{bazno} / Q_{ukupno} . Analizom je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Oko Bijele 3,74 m³/s, minimalna 0,00285 m³/s, a srednja vrednost 0,494 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,5802 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Oko Bijele prosečno čini 58,02% ukupnog oticaja ovog sistema, prema LMM metodi.

Primena EWMA filtera uključila je srednju vrednost koeficijenta recesije trećih mikrorežima pražnjenja karstnog sistema Oko Bijele za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.40, budući da je ocenjeno da se treći mikrorežimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena vrednosti koeficijenata recesije trećih mikrorežima iznosi $\alpha_{3av} = 0,0186$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Oko Bijele 2,9 m³/s, minimalna 0,00285 m³/s, a srednja vrednost 0,741 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,827, što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Oko Bijele prosečno čini 82,7% ukupnog oticaja ovog sistema, prema EWMA filteru.

Poredeći vrednosti indeksa baznog oticaja za vrelo Oko Bijele, proračunate na osnovu LMM metode i EWMA filtera, vidi se značajna razlika u dobijenim rezultatima. Imajući u vidu lokalne hidrogeološke karakteristike slivnog područja vrela Oko Bijele, kao i činjenicu da je veoma velika razlika između minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja ovog vrela, kao reprezentativniji kriterijum je usvojeno razdvajanje hidrograma na osnovu LMM metode. Iako ova metoda sadrži određenu dozu subjektivnosti pri odabiru parametra N , ona ipak daje niže vrednosti baznoj komponenti oticaja vrela Oko Bijele, što se čini realnijom slikom uslova koji vladaju u sistemu. Drugim rečima, pretpostavka je da direktni oticaj ima glavnu ulogu pri formiranju pikova hidrograma vrela, kao i da se radi o malom rezervoaru podzemnih voda u okviru ovog karstnog sistema. Stoga, usvojena je vrednost baznog oticaja od 58%, što bi značilo da 58% voda dolazi na račun akumulirane vode u sistemu, dok se ostatak od 42% formira na račun brze propagacije vode koja se infiltrira. Ovo ukazuje na veliki uticaj direktne komponente hidrograma na isticanje podzemnih voda u okviru sistema Oko Bijele, odnosno na pretpostavku da sistem ima dominantan karstni kanal kojim se voda brzo transportuje do vrela. Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Oko Bijele dati su na sl. 6.88, i to za hidrološku 2019-2020, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 1608,9 mm.



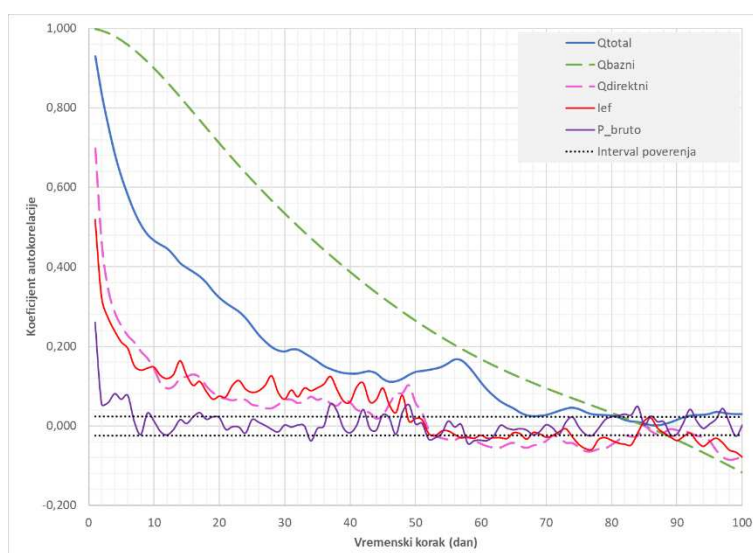
Sl. 6.88. Uporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema Oko Bijeje za 2019-2020 god.

6.5.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog vrela Oko Bijeje, kao i za bruto izmerene padavine na stanici Žabljak i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazan je na sl. 6.89. Autokorelogram pokazuje visoku autokorelisanost vremenskih serija isticanja podzemnih voda ovog vrela, tako da autokorelogram baznog oticaja ima veoma blagi nagib, ukazujući na dugačku memoriju sistema u pogledu baznog oticaja, što pokazuju i veoma niske vrednosti isticanja koje se konstantno javljaju u malovodnom periodu. Koeficijenti autokorelacije baznog oticaja gube statističku značajnost nakon 57 dana, za $r_k < 0,2$, odnosno 81 dana ukoliko se posmatraju statistički intervali poverenja na bazi 95% verovatnoće. Visoke vrednosti koeficijenta autokorelacije baznog oticaja i niske vrednosti izdašnosti u malovodnom periodu i veoma blagi nagib autokorelograma baznog oticaja ukazuju na praktično proceđivanje podzemnih voda kroz matriks karbonata ovog sistema ili kroz manje kanale u uslovima veoma slabog hidrostatičkog pritiska.

Poređenjem autokorelograma ukupnog i direktnog oticaja može se zaključiti da direktna komponenta hidrograma ima veoma veliki uticaj na formiranje isticanja vrela Oko Bijeje, tj. da je isticanje podzemnih voda iz sistema direktno uzrokovano vrednostima efektivne infiltracije. Izgled autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja je sinhron, što je pokazatelj ispravnosti postupka disagregacije hidrograma.

Ukoliko se posmatra memorija sistema na bazi koeficijenata autokorelacije direktnog oticaja vrela Oko Bijeje, može se zaključiti da koeficijenti posle 8 dana postaju statistički beznačajni ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 51 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja. Period od 8 dana ukazuje na odziv hidrograma na prvi impuls efektivnih infiltracija, dok period od 51 dana uključuje i ostale reakcije direktnog oticaja na nadolazeće impulse efektivne infiltracije što je uočljivo na autokorelogramu 16, 30. i 49. dana. Strmi nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja (od 1.do 8. dana) ukazuje na brzu propagaciju novoinfiltrirane vode, tj. na brzo pražnjenje karstnog sistema kroz dominantne karstne kanale.



Sl. 6.89. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Oko Bijeje, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

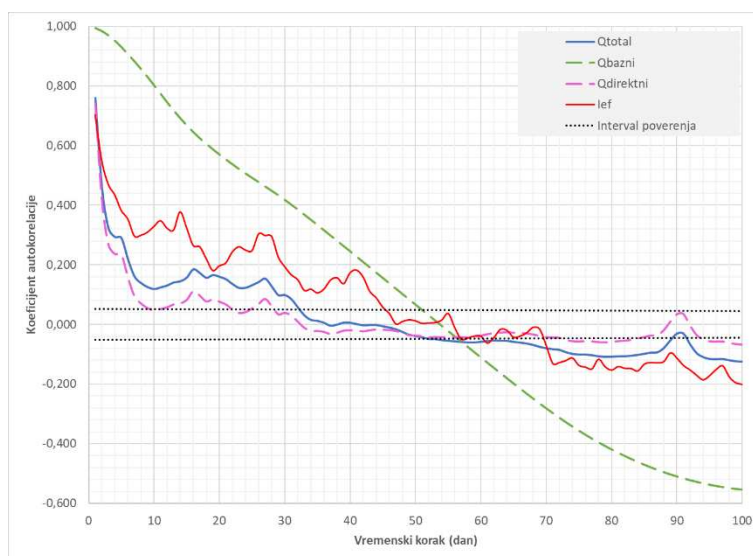
Statistička značajnost ukupnog oticaja vrela Oko Bijeje prestaje nakon 28 dana ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 81 dan ako se posmatraju intervali poverenja. Može se uočiti i da se autokorelogrami baznog i ukupnog oticaja seku 81. dana, što generalno ukazuje na to da kada prestane memorija baznog oticaja, prestaje memorija celog sistema. Ako se to uporedi sa navedenom memorijom direktnog oticaja od 51 dan, može se zaključiti da se memorija celog sistema (ukupnog oticaja) formira na račun direktnog oticaja do 51. dana, a sledećih 30, odnosno do 81. dana je pod uticajem memorije baznog oticaja, koji se praktično proceduje kroz matriks.

Najinteresantniji je izgled autokorelograma efektivnih infiltracija, koji pokazuje neočekivanu memoriju, odnosno odsustvo slučajnog karaktera. Memorija serije efektivnih infiltracija iznosi čak 8 dana ($r_k < 0,2$), odnosno čak 47 dana ako se posmatraju intervali poverenja. Velika memorija ove vremenske serije najverovatnije potiče od otapanja snežnih padavina, koje se sukcesivno rastvaranju pri povećanju temperature vazduha i brzo se infiltriraju u podzemlje. Zanimljiv je i skoro identičan izgled autokorelograma efektivne infiltracije i direktnog oticaja, što ukazuje na dominantnu ulogu direktne efektivne infiltracije u sistem, tj. na autogeno prihranjivanje sistema. Na osnovu prethodno iznetog, može se zaključiti da snežne padavine imaju presudnu ulogu u formiranju isticanja vrela Oko Bijeje, tako da se maksimalne vrednosti javljaju pri otapanju velike količine snega, dok padavine u vidu kiše imaju sekundarnu ulogu.

Sl. 6.90 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Oko Bijeje, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2016 – 2017, koja je ocenjena kao sušna godina. Sa pomenutog dijagrama je još uočljivija zavisnost ukupnog i direktnog oticaja od efektivne infiltracije, sa jasnim poklapanjem pikova izlaznih signala sa ulaznim 5, 15. i 28. dana. Na sl. 6.90 može se uočiti da autokorelogram ukupnog oticaja prvih 5 dana ($r_k < 0,2$) pokazuje strmi nagib dijagrama autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja, što ukazuje na brzi prolazak infiltrirane vode, da bi već posle 10. dana, autokorelacija direktnog oticaja postala statistički beznačajna, dok ukupni oticaj nastavlja da ističe pod zajedničkim dejstvom direktnog i baznog oticaja, sve do 32. dana. Autokorelogram baznog oticaja dobija blagi nagib, a postaje statistički beznačajna posle 42 ($r_k < 0,2$), odnosno 51 dana. Pomenute vrednosti su manje nego za ukupni period razmatranja, što je i logično imajući u vidu manje vode u sistemu tokom sušne godine.

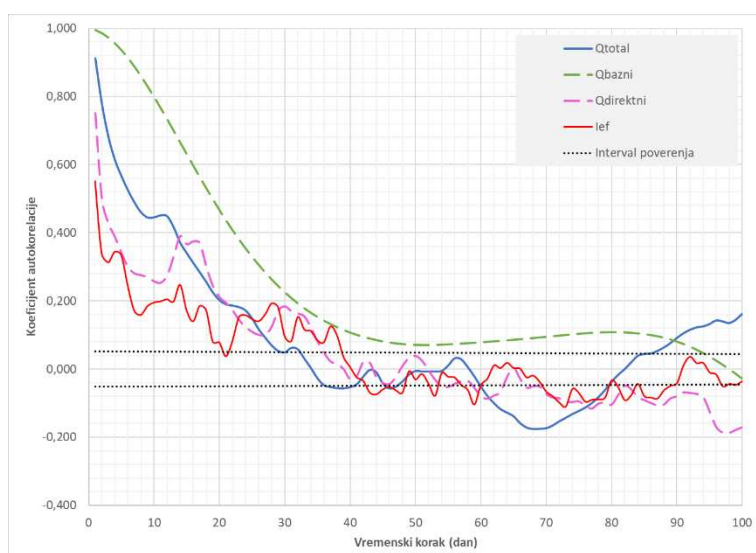
Najinteresantniji je opet autokorelogram efektivne infiltracije koji ima veće koeficijente autokorelacije od serije direktnog i ukupnog oticaja, što je prilično nelogično. Međutim, ukoliko se uporede autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja i efektivne infiltracije, uočava se

potpuna sinhronizovanost ovih dijagrama, što direktno ukazuje na njihovu uzročno-posledičnu vezu. Ne samo da se poklapaju pikovi ulaza i izlaza, već je i oblik i nagib njihovih autokorelograma praktično identičan, tako da se sa sigurnošću može zaključiti da jaka veza ulaznih impulsa i izlaznih signala traje sve do 40. dana. Zanimljiv je i pik koji se javlja 90. dana, odnosno reakcija direktnog i ukupnog oticaja na efektivnu infiltraciju, koja je i više nego očigledna. Ovako visoki koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije još jednom dokazuju da se prihranjivanje sistema u najvećoj meri vrši na račun otopljenog snega, tako da se vodeni ekvivalent konsekvantno povećava sa povećanjem temperature vazduha, odnosno sa smanjenjem ukupnog snežnog pokrivača. Takođe, snežne padavine su registrovane na stanici Žabljak čak i u maju 2017. godine, što je direktni pokazatelj značaja snega za sistem Oko Bije.



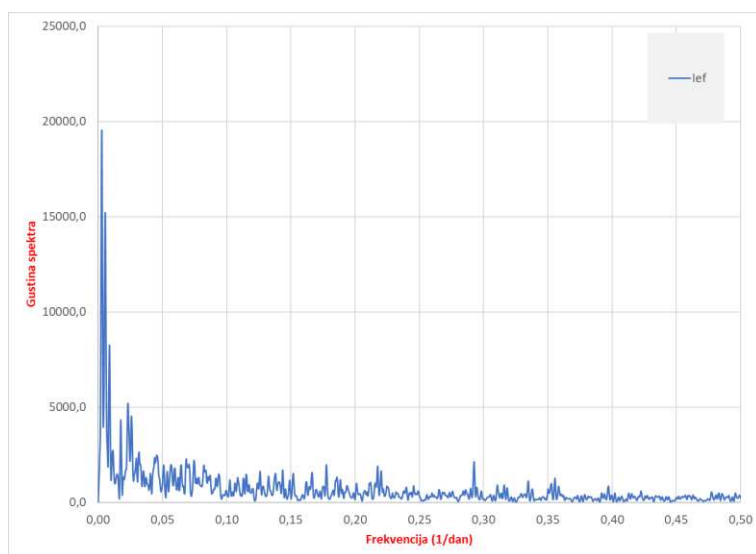
Sl. 6.90. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Oko Bije i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2016 - 2017)

Sl. 6.91 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Oko Bije, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2017 - 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina. Sa sl. 6.91 uočava se veoma brza propagacija isticanja podzemnih voda kroz karstne kanale tokom vlažne hidrološke godine, tako da je nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja strm u prvih 5 dana, ukazujući na vreme potrebno za reakciju direktnog i ukupnog oticaja na inicijalni ulazni impuls. Statistička značajnost se gubi posle 20 dana i za direktni i ukupni oticaj ($r_k < 0,2$), što pokazuje ukupno vreme uticaja direktnog oticaja na hidrogram vrela tokom vlažne godine. Ukoliko se posmatraju statistički intervali poverenja, ukupni oticaj postaje statistički beznačajan 32, a direktni 36. dana. I u vlažnoj hidrološkoj godini zanimljiv je izgled autokorelograma efektivne infiltracije, koji je u potpunosti sinhronizovan sa dijagramom direktnog oticaja, sa skoro pravilnim poklapanjem pikova i statističkom značajnošću, čime se i ovde dokazuje veza ove dve komponente. Autokorelogram baznog oticaja pokazuje nešto strmiji nagib do 32. dana ($r_k < 0,2$), da bi nakon toga koeficijenti autokorelacije postali praktično linearni što ukazuje na sporo proceđivanje vode u vidu baznog oticaja iz matriksa stene, sve do 95. dana kada gubi statističku značajnost.



Sl. 6.91. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Oko Bijele i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

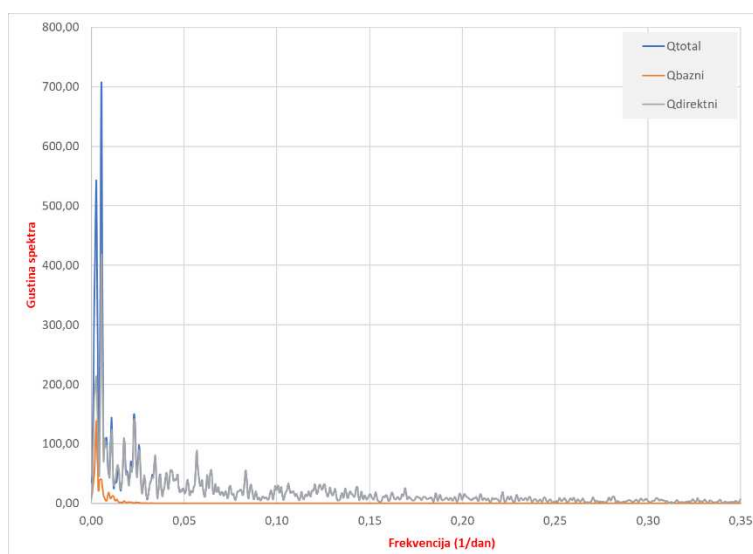
Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Oko Bijele prikazana je na sl. 6.92, sa koje se vidi da atipičan izgled funkcije za ulaznu komponentu, kao i visoke oscilacije pri niskim frekvencijama. To potvrđuje dobru autokorelisanost serije efektivne infiltracije, odnosno ponovo da je reč o značajnom uticaju snega na prihranjivanje.



Sl. 6.92. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Oko Bijele, period 2015 – 2020

Dijagram spektralne gustine pokazuje 5 najfrekventnijih pikova 0.002191, 0.002738, 0.005476, 0.008762 i 0.023001 dan⁻¹, koji odgovaraju vremenskim periodima od 456 dana, 365 dana, 182 dan, 114 dana i 43 dana. Drugim rečima, prvi pik 0.002191 koji odgovara vremenskom periodu od 456 dana pokazuje 15-mesečnu cikličnost efektivne infiltracije. Drugi (0.002738) odgovara periodu od 365 dana, a treći periodu od 304 dana, pokazujući godišnji ciklus, dok četvrti pik (0.008762) odgovaraju kvartalnom ciklusu. Poslednji pik (0.023001) koji odgovara periodu od 43 dana ukazuje na mesečni ciklus. S obzirom na značajan broj dana koje pokazuju prve 4 frekvencije, jasno je da se radi o dominantnom prihranjivanju na račun snega, s obzirom na sračunate cikluse. Samo poslednji, peti pik frekvencije može donekle odgovarati ciklusima pale kiše. Frekvencije iznad od 0.1 dan⁻¹ predstavljaju slučajni karakter efektivne infiltracije karstnog sistema Oko Bijele.

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu metode lokalnog minimuma za ceo period osmatranja (2015 – 2020) i prikazan je na sl. 6.93.



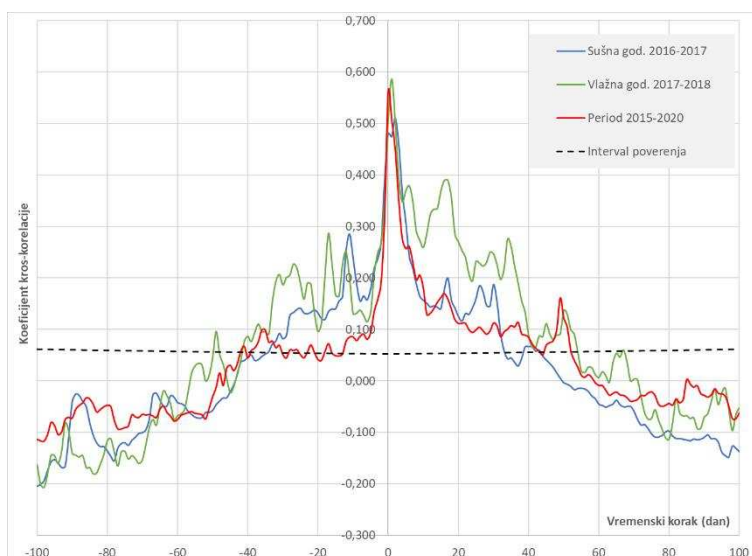
Sl. 6.93. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema Oko Bijeleske u periodu 2015 – 2020 godina

Sa dijagrama 6.93 može se videti da se pikovi direktnog i ukupnog oticaja javljaju pri niskim, srednjim i visokim frekvencijama, dok se spektralna funkcija baznog oticaja nalazi samo u niskim frekvencijama. Tako, spektralna funkcija ukupnog i direktnog oticaja se javlja u frekventnom opsegu ispod $0,2 \text{ dan}^{-1}$, sa karakterističnim pikovima za ukupni oticaj od 0.001643, 0.002738, 0.005476, 0.010953 i 0.023001 za odgovarajuće periode od 608, 365, 182, 91 i 44 dana, respektivno. Ove vrednosti i periodi ukazuju na 18-mesečni, godišnji, polugodišnji i tromesečni i mesečni ciklus ukupnog oticaja. Identični pikovi u istom frekventnom opsegu se javljaju i za direktnu komponentu hidrograma, dok su oni veoma slični frekvencijama spektralne funkcije gustine efektivne infiltracije. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine baznog oticaja pokazuje nešto niže frekvencije (0.001643, 0.002738, 0.004381, 0.005476 i 0.009310) koje odgovaraju broju dana od 608, 365, 228, 182 i 107, respektivno. Dakle, može se zaključiti da se određeni ciklusi direktnog, ukupnog i baznog oticaja poklapaju (npr. 18-mesečni, godišnji, polugodišnji), dok su za bazni oticaj posebno karakteristični 8-mesečni i kvartalni ciklusi. Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od $0,02 \text{ dan}^{-1}$, spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi statistički značaj, što odgovara broju dana od 50, dok statistička značajnost direktnog oticaja prestaje nakon frekventnog opsega od $0,2 \text{ dan}^{-1}$, što odgovara periodu od 5 dana. Pomenute vrednosti se u potpunosti slažu sa memorijom sistema za direktni, bazni i ukupni oticaj koji je analiziran autokorelacionom funkcijom. Na osnovu prethodno navedenog, može se zaključiti da direktni oticaj ima dominantan uticaj u spektralnom opsegu ukupnog oticaja vrela Oko Bijeleske.

Kros-korelacija efektivne infiltracije sa isticanjem vrela Oko Bijeleske tokom sušne (2016-2017) i vlažne (2017-2018) godine, kao i tokom celokupnog perioda osmatranja (2015-2020) prikazana je na sl. 6.94. Kros-korelogram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Oko Bijeleske prikazan na sl. 6.94 pokazuje zanimljive rezultate koji se ogledaju u centriranosti, odnosno pozitivnoj asimetriji funkcije u zavisnosti od hidrološke godine.

Kros-korelogram prikazan na sl. 6.94 pokazuje centriranost funkcije za ceo period osmatranja što ukazuje na generalno instantnu reakciju sistema na ulazni impuls, tj. sa vremenskim korakom od 0 dana. To se može objasniti relativno malim rezervoarom karstnog sistema tako da se novoinfiltrirana voda u prosečnim hidrološkim godinama veoma brzo transportuje do

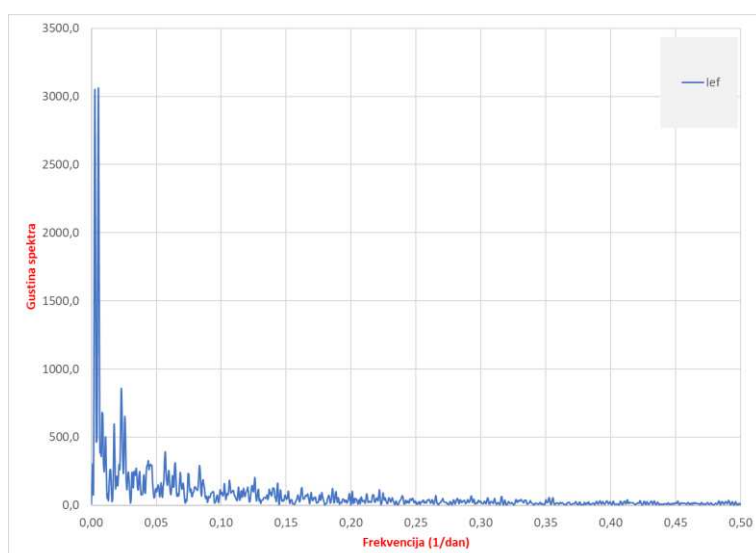
mesta isticanja, s obzirom na male rezerve podzemnih voda u tom periodu. Kros-korelogram je pozitivno asimetričan tokom sušne i vlažne godine, kada se primećuje kašnjenje odziva vrela na ulazni impuls od 2 dana u sušnoj i 1 dan u vlažnoj godini. To može ukazivati da su tokom ekstremnih hidroloških godina, dva dana dovoljna da se sistem napuni da bi se izazvala reakcija na vrelu u sušnoj godini, dok u vlažnoj godini se reakcija javlja sa jednim danom zakašnjenja što ukazuje na činjenicu da je sistem pun i da amortizuje talas novoinfiltrirane vode sa 1 danom zakašnjenja, praveći tzv. *buffer* efekat.



Sl. 6.94. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Oko Bijeles za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

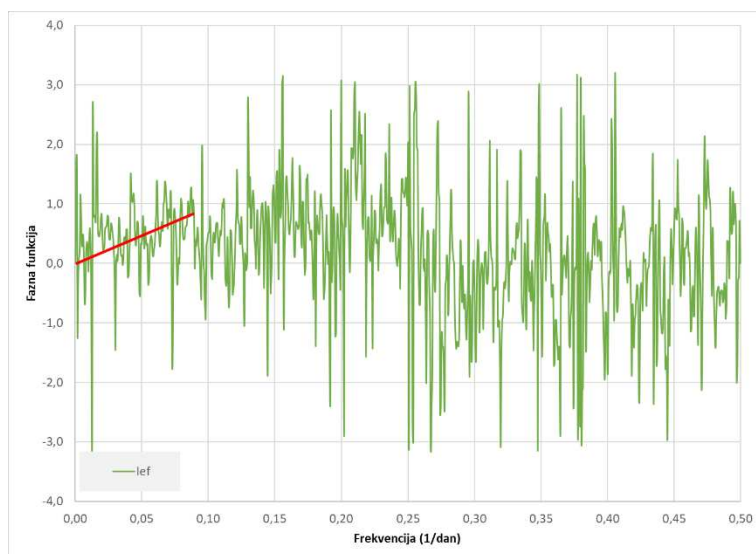
Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0,2 (Mangin, 1984; Ristić Vakanjac, 2015), statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 7 dana, u vlažnoj godini nakon 23 dana, dok tokom celog perioda značajnost prestaje nakon 10 dana, što pokazuje na vreme reakcije slivnog područja na intenzivnu kišnu epizodu. Pikovi na kros-korelogramu za vlažnu godinu jasno ukazuju na promptnu reakciju vrela na efektivnu infiltraciju.

Kros-amplitudna funkcija koja uključuje vremenske serije efektivne infiltracije i izdašnosti karstnog vrela Oko Bijeles (Sl. 6.95) pokazuje stepen filtriranja impulsnog signala od strane karstnog sistema Oko Bijeles, što se na dijagramu može videti u zoni visokih frekvencija. Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,35 \text{ dan}^{-1}$ (3 dana), što govori o periodu potrebnom za prigušenje signala, odnosno na dominantan uticaj direktne komponente hidrograma. Pikovi u visokofrekventnom opsegu ($f > 0.1$), kao i široki spektralni opseg nedvosmisleno ukazuje na postojanje i veliki značaj direktne komponente hidrograma na formiranje isticanja karstnog vrela Oko Bijeles. Visoke vrednosti spektra, kao i pikovi u srednje- i visokofrekventnom opsegu ukazuju na slabu mogućnost sistema da priguši jak ulazni impuls (efektivnu infiltraciju), što ukazuje na slabu akumulativnu moć karstnog sistema. To se može potvrditi i jednostavnim uvidom u hidrogram, na kome se uočavaju ogromne razlike između maksimalnih i minimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda. Frekvencije koje se javljaju u visokofrekventnom opsegu i koje odgovaraju direktnom oticaju su 0.106791, 0.125958 i 0.162103 koje odgovaraju periodu od 9, 8 i 6 dana, što odgovara i vrednosti dobijenim autokorelacionom funkcijom. Sa druge strane, visoke oscilacije pikova u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, gde se mogu uočiti od 0.002738, 0.005476 i 0.023549 koje odgovaraju periodima od 365 (godišnji ciklus), 182 dana (polugodišnji ciklus) i 44 dana (mesečni ciklus).



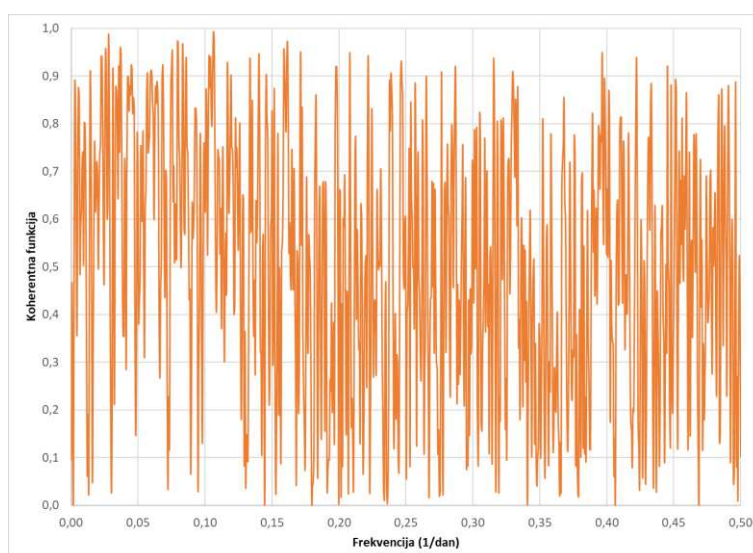
Sl. 6.95. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Oko Bijeje za period 2015 – 2020. godina

Fazna funkcija isticanja prikazana je na sl. 6.96, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri visokim frekvencijama ($f > 0.1$), dok se pozitivan linearni trend javlja pri frekvencijama od 0 do 0.088171, što odgovara periodu od 11 dana. Period od 11 dana pokazuje srednje kašnjenje reakcije vrela na ulazni impuls, što je skoro identičan broj dana dobijem u okviru kros-korelacione i kros-amplitudne analize.



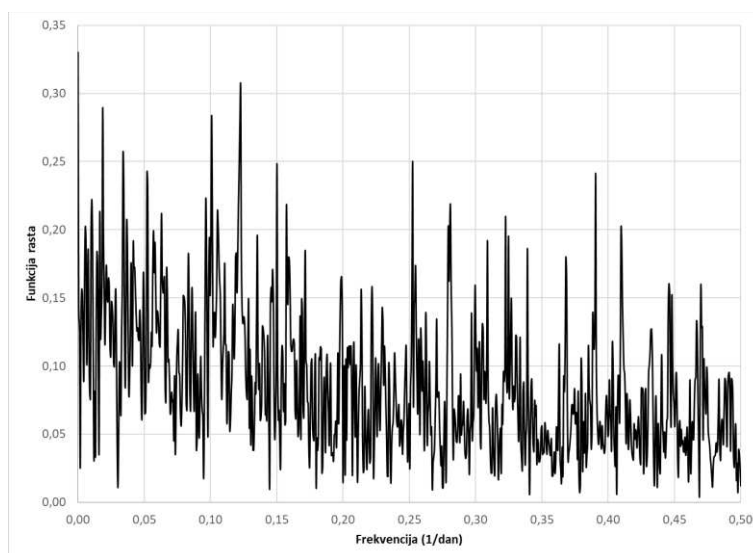
Sl. 6.96. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeje za period 2015-2020

Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeje prikazana je na sl. 6.97, sa koje se vidi da vrednosti koherentne funkcije osciliraju u veoma širokom frekventnom opsegu, ukazujući na nelinearni karakter sistema Oko Bijeje. Srednja vrednost koherentne funkcije je 0,52 što ukazuje na izvestan uticaj baznog oticaja pri formiranju isticanja karstnog vrela. Može se primetiti i da ova vrednost korespondira sa indeksom baznog oticaja od 0,58 dobijenog primenom metode lokalnog minimuma. Sa dijagrama koherentne funkcije se može uočiti i značajan pad vrednosti pri frekvenciji od 0,0952 dan⁻¹ (tj. 10,49 dana), što odgovara uticaju direktnog oticaja na ukupni sistem, a što je takođe saglasno sa rezultatima prethodnih analiza. Na osnovu prethodno iznetog, može se zaključiti da je i koherentna funkcija potvrdila da sistem Oko Bijeje ima relativno mali rezervoar podzemnih voda, a da je dominantna uloga direktne komponente hidrograma pri formiranju ukupnog oticaja vrela.



Sl. 6.97. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke za period 2015-2020

Finalna funkcija koja je primenjena u sklopu bivarijantne analize isticanja podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke u frekventnom domenu je funkcija rasta, prikazana na sl. 6.98. Sa dijagrama 6.98 može se uvideti da su sve vrednosti manje od 1, odnosno 0.4 što bi teoretski ukazivalo na potpunu atenuaciju sistema. Međutim, funkcija rasta jasno pokazuje da je reč o potpuno nesortiranom i nefiltriranom signalu, što ukazuje na to da karstni sistem Oko Bijeke ima veoma nisku mogućnost prigušenja ulaznog impulsa, tj. efektivnih infiltracija u rezerve podzemnih voda i bazni oticaj, već da se one veoma brzo transportuju do vrela i ističu u vidu direktnog oticaja. To navodi na zaključak da je uloga direktne komponente hidrograma dominantna, odnosno da su pretpostavke o relativno malom rezervoaru podzemnih voda u sistemu Oko Bijeke, koji ima slabe mogućnosti filtriranja efektivne infiltracije potvrđene.



Sl. 6.98. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke za period 2015-2020

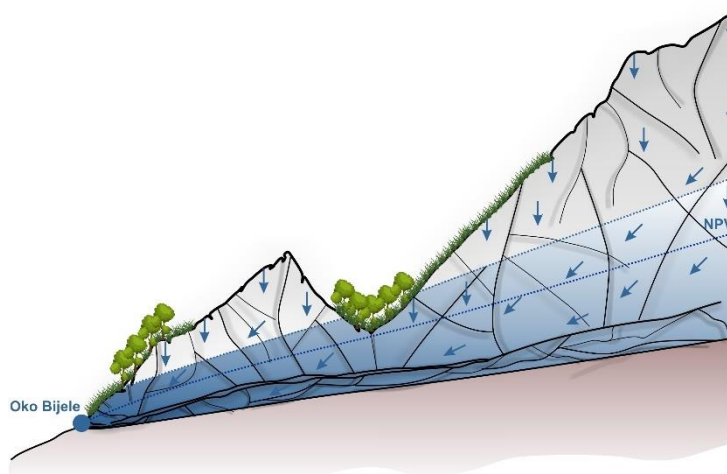
Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se uočiti da je karstni sistem vrela Oko Bijeke dobro karstifikovan, sa veoma brzom propagacijom voda od zone prihranjivanja do vrela. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 723,2 mm na područjima sa vegetacijom, do 820,7 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 417,4 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2020 iznosi

918,9 mm, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 317,2 mm do 356,2 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 43,4% na području bez vegetacije, tj. 43,9% na prostoru sa vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,88, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 43,5%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 56,5% (56,9% na prostoru vez vegetacije, tj. 56,5% na prostoru sa vegetacijom).

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 0,00285 m³/s do 30,14 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 0,6 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 10,5 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 0,003 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti tri mikrorežima pražnjenja, od kojih se prvi najčešće dešava u turbulentnom (β) režimu, dok se ostali mikrorežimi javljaju u laminarnom (α) režimu. Prosečna zapremina istekle vode iznosi 1,79 x 10⁶ x m³/s. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema LMM metodi iznosi 0,494 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 58,02% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Rezultati analize vremenskih serija isticanja daju mogućnost za izvođenje zaključaka o mehanizmu funkcionisanja karstnog sistema vrela Oko Bijele. Naime, kroskorelacione analize su pokazale veoma brzu reakciju vrela na efektivnu infiltraciju u prosečnim hidrološkim godinama, koja je praktično trenutna (kašnjenje je 0 dana). To ukazuje na pretpostavku da je sistem tako strukturiran da ima razvijen izrazito dominantan kanal kojim se voda veoma brzo transportuje od zone prihranjivanja do zone isticanja, što se može videti na konceptualnom modelu karstnog sistema (Sl. 6.99). Ipak, tokom ekstremnih hidroloških uslova, javljaju se određena zakašnjenja u transportu voda, koja mogu biti uzrokovana stanjem rezervi u sistemu. U sušnoj godini, zakašnjenje reakcije na vrelu je 2 dana, što ukazuje na to da je tokom sušne godine sistem toliko ispražnjen da je potrebno 2 dana da se dovoljno napuni kako bi se izazvala reakcija na vrelu nakon kišne epizode. Razlog za to može se tražiti i u mehanizmu isticanja, budući da se na osnovu izgleda vrela, može zaključiti da se verovatno radi o sifonskom kanalu, u kome ima malo vode u sušnoj godini, te je potrebno 2 dana kako bi se on napunio i povećao pritisak što bi izazvalo povećanje izdašnosti. Sa druge strane, u vlažnoj godini javlja se zakašnjenje od 1 dana, ali najverovatnije ne zbog vremena potrebnog da se sifonski kanal napuni, već zbog toga što je sistem prepunjen, pa se javlja uspor budući da sistem ne može da transportuje toliku količinu vode. Iako izgled vrela ukazuje na to da se radi o sifonskom kanalu, pretpostavka je da njegova dubina zaleganja nije velika, već da je on formiran usled kontakta sa flišnom formacijom koja predstavlja hidrogeološku barijeru, te je veoma velika količina vode pri isticanju mehaničkom i hemijskom erozijom formirala sifonski kanal pri isticanju na površinu, dok je u zaleđu reč o gravitacionoj cirkulaciji podzemnih voda, odnosno da je reč o prelivnom, barijernom tipu vrela.

Analize kros-spektralnih funkcija ukazuju na slabu mogućnost sistema da amortizuje uticaj efektivne infiltracije, tj. da slabe retencione sposobnosti sistema. Drugim rečima, sistem verovatno nema veliku akumulativnu moć, te se ne može očekivati akumulacija značajnijih rezervi podzemnih voda. To potvrđuje i činjenica da je tokom letnjih meseci (recesionog perioda) isticanje vrela reda veličine svega par litara u sekundi, dok maksimalne izdašnosti mogu iznositi i preko 100 m³/s. Dakle, minimalne izdašnosti od nekoliko litara u sekundi se formiraju praktično na račun proceđivanja kroz matriks stene, male pukotine i sifonski kanal. Dinamičke rezerve ovog karstnog sistema su male, srazmerne rezervoaru sistema.



Sl. 6.99. Konceptualni model karstnog sistema vrela Oko Bijeles

6.5.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Oko Bijeles

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Oko Bijeles izvršena je na osnovu potpunih i skraćenih hemijskih analiza koje su izvršene u periodu 2018 – 2021. godina (Stevanović et al. 2021). Hemijske analize su pokazale da su podzemne vode karstnog sistema Oko Bijeles izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, bez boje, ukusa i mirisa, budući da su svi glavni hemijski parametri u svim analizama ispod maksimalno dozvoljene koncentracije. Takođe, analize pokazuju da vrednosti pH minimalno odskakuju od granice neutralnosti, budući da imaju veoma blag prelaz ka alkalnim vodama, odnosno da je srednja vrednost zabeležena u periodu osmatranja 8,56, a granica neutralnosti je na 8,50. Takođe, primećena je i pojava povišene mutnoće od 1,34 NTU tokom novembra 2021. što se može smatrati jesenjim maksimumom. Povećanje mutnoće u navedenom periodu je očekivano u karstnim sredinama.

Hemijska analiza iz novembra 2021. godine ukazuje na povišen sadržaj nitrita u neznatno većoj količini u odnosu na maksimalno dozvoljene koncentracije. Verovatni uzrok pojave povišene koncentracije nitrita treba tražiti u antropogenim faktorima. Naime, tokom letnjih i ranih jesenjih meseci, veoma je aktivno stočarstvo u katunima koji se nalaze na platou u zaleđu vrela, odnosno u okviru slivne površine vrela Oko Bijeles, te je vrlo moguće da je povišena koncentracija nitrita takvog porekla, imajući u vidu da oni nastaju ili oksidacijom amonijaka ili redukcijom nitrata (Štrbački, 2022, pers. kom.). Takođe, detekcija nitrita u jesenjem uzorku iz 2021. godine takođe ukazuje na brzu propagaciju podzemnih voda i transformaciju efektivnih infiltracija u izdašnost podzemnih voda.

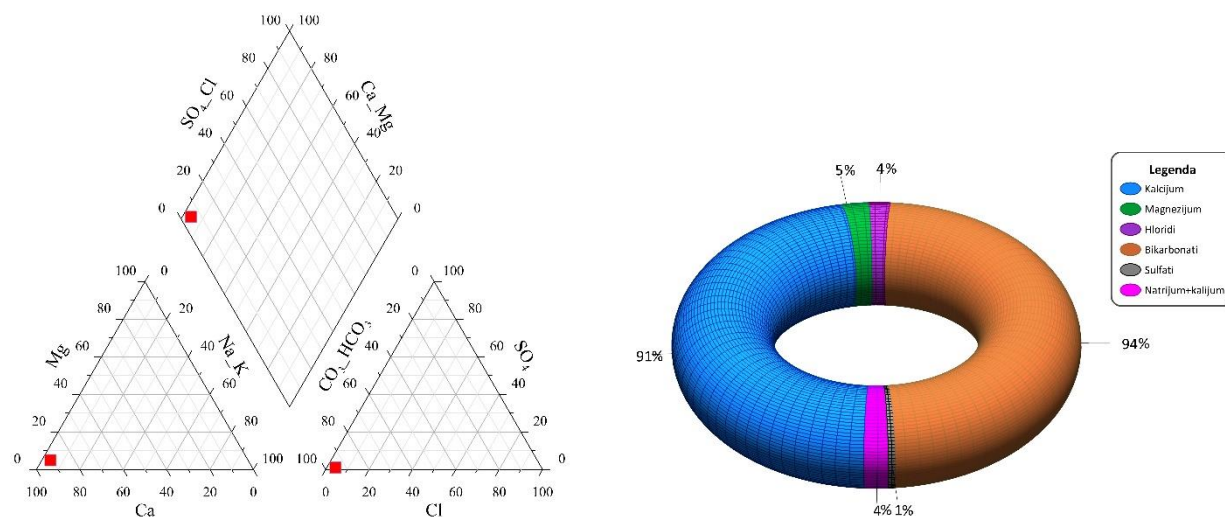
Neznatne oscilacije kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeles ukazuje na postojan kvalitet ovih voda, koje su uniformne u vremenu. Tako, temperatura vode oscilira od 6,09 do 6,7°C, što je u rangu srednje godišnje temperature vazduha ovog prostora. Ipak, radi se o jako hladnim vodama, sa konstantnom temperaturom tokom godine. Mutnoća podzemnih voda oscilira od 0,42 do 1,34, uz napomenu da se pojave povišene mutnoće mogu javiti tokom intenzivnih kišnih epizoda i povišenih vrednosti izdašnosti podzemnih voda u trajanju od nekoliko dana.

Varijacija pH vrednosti praktično odsustvuje, budući da je uvek reda veličine 8,5, odnosno da je na gornjoj granici neutralnosti, sa blagim prelazom ka alkalnim vodama, kako je već navedeno. Specifična provodljivost je takođe konstantna tokom celog perioda osmatranja i varira u granicama od 225 do 284 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ukupna mineralizacija podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeles oscilira od 139,43 mg/l do 162,02 mg/l, što ukazuje da se radi o malomineralizovanim vodama. Ovo može biti još jedan dokaz o brznoj cirkulaciji podzemnih voda kroz sistem, tako da

nemaju vremena da dođu u značajniju interakciju sa krečnjakom, koji bi ih geohemijskim reakcijama obogatio hemijskim komponentama. Sadržaj organske materije u podzemnoj vodi vrela Oko Bijeke iskazan kroz utrošak kalijum-permanganata sve vreme je ispod MDK i varira od 2,21 do 4,43 mg/l. Sadržaj analiziranih mikrokomponenti je ispod MDK, što ukazuje na neopterećenost podzemnih voda metalima. Prisustvo metala čak mnogo ispod granica detekcije vodilo je do toga da ove mikrokomponente nisu ni analizirane tokom perioda visokih voda, kada se njihovo prisustvo tek ne očekuje s obzirom na veliku izdašnost koja razblažuje hemijski sastav (Stevanović et al. 2021). Sve prethodno pomenuto dokazuje izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (116 – 192,5 mg/l ili prosečno 94%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 48,2 do 56,84 mg/l, tj. prosečno 91%ekv. Od ostalih makrokomponenti prisutni su magnezijum (0,82 – 2,05 mg/l ili prosečno 5%ekv) i natrijum (0,662 – 5,1 mg/l ili prosečno 4%ekv) od katjona, tj. sulfati (1,25 mg/l – 5 mg/l ili prosečno 1%ekv), odnosno hloridi od 0,58 do 8,9 mg/l, tj. prosečno 4%ekv.

Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2018-2021, dat je na Pajperovom i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.100), kao i formulom Kurlova (6.6).



Sl. 6.100. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (prema podacima Stevanović et al. 2021)

$$CO^2 M_{0,16} \frac{HCO_{94}^3}{Ca_{91} Mg_5 Na + K_4} pH_{8,55} TV_{21,54} T_{6,33} Q_{600} \quad (6.6)$$

Na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke, koje su izrađene u periodu 2018-2021 godine, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim dosta tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema, kao i sa povišenim sadržajem nitrita u jednom uzorku uzetom u periodu visokih voda. Niske oscilacije fizičko-hemijskih parametara, mikro- i makrokomponenti ukazuju na postojan hemizam voda u vremenu i izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda karstnog sistema Oko Bijeke.

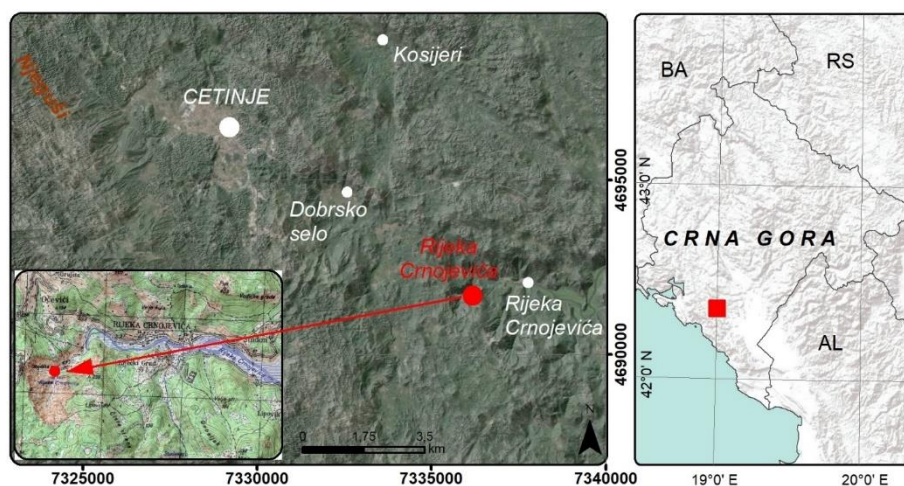
Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu Oko Bijeke, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 10 ovog rada.

6.6 Karstni hidrogeološki sistem vrela Rijeka Crnojevića

Karstni hidrogeološki sistem vrela Rijeka Crnojevića i Cetinjsko karstno polje intrigirali su stručnjake i istraživače dugi niz godina. Najintenzivnija hidrogeološka istraživanja vršena su nakon Drugog svetskog rata, a posebno nakon zemljotresa i poplava koje su zadesile Crnu Goru krajem 70-ih i početkom 80-ih godina prošlog veka. U radovima stručnjaka Zavoda za geološka i geofizička istraživanja (1971-1973), Mijatovića (1986), Radulovića M. & Vujisića (1989), Boškovića & Živaljevića (1986), Petrovića J. (1982), Vukotića (1986), Živaljevića (1992), Radulovića M. (1996; 2000), Radulovića M. M. (2012), Radulovića M.M. et al. (2012; 2015) daju se dragoceni podaci o hidrogeološkoj funkciji ovog karstnog sistema, koji su korišćeni delom kao ulazni podaci pri analizi za potrebe disertacije.

6.6.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića nalazi se u južnom delu Crne Gore, oko 3,5 km zapadno od naselja Rijeka Crnojevića, odnosno oko 18 km jugoistočno od Cetinja. Teritorijalno i administrativno pripada Prestonici Cetinje, kao jedno od 20 njenih prigradskih naselja. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Spoljašnjim Dinaridima Crne Gore (Sl. 6.101). Nizvodno od vrela formira se površinski tok Rijeka Crnojevića, koji pripada slivu Skadarskog jezera, u koje se uliva nakon 13 km toka.



Sl. 6.101. Geografski položaj vrela Rijeka Crnojevića (crvena boja) na karti Crne Gore i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Rijeka Crnojevića

Vrelo Rijeka Crnojevića drenira Cetinjsko karstno polje. Pored Cetinja i Rijeka Crnojevića, na slivnom području nalaze se i manja sela, poput Doborskog sela, Ulića, Lopičića, Ceklina i dr. Demografske karakteristike ovog područja pokazuju da Prestonica Cetinje prema popisu iz 2011. godine ima 16 657 stanovnika, dok naselje Rijeka Crnojevića ima svega 175 stanovnika (MONSTAT, 2011). Gledajući poslednjih nekoliko decenija, primetna je depopulacija ovog kraja, budući da se broj stanovnika za poslednjih 70 godina smanjio gotovo tri i po puta. Rijeka Crnojevića sadrži 20-40 st/km², što je čini naseljem sa niskom gustinom naseljenosti.

Rijeka Crnojevića predstavlja kulturno-istorijsko nasleđe Crne Gore, budući da je naselje formirano kao utvrđenje zetskog vladara Ivana Crnojevića u 15. veku, koje je korišćeno u borbama protiv Turaka, odnosno da je kasnije ovo bila jedna od najznačajnijih luka i trgovinskih centara Crne Gore. Takođe, znamenitosti poput Danilovog mosta na samom ulasku u naselje, koji je podigao knjaz Danilo polovinom 19. veka i kuće sv. Petra Cetinjskog, najstarijeg građevinskog objekta u ovom kraju predstavljaju nasleđe koje je neophodno čuvati. Osim izuzetnog kulturno-istorijskog nasleđa, površinski tok Rijeka Crnojevića odlikuje se i značajnim biodiverzitetom, budući da se ova reka odlikuje visokom količinom rastvorenog kiseonika i

stabilnom temperaturom tokom godine, što pogoduje ribljoj fauni, pre svega pastrmkama i šaranu (Mrdak et al. 2012). Takođe, Rijeka Crnojevića poznata je i po svom meandriranju na putu ka Skadarskom jezeru, a biološko i prirodno bogatstvo ovog područja pod najvećim je stepenom pravne zaštite, budući da se nalazi u sklopu Nacionalnog parka „Skadarsko jezero“.

6.6.2 Klimatske karakteristike

Južni deo Crne Gore, kome pripada i slivno područje vrela Rijeke Crnojevića, odlikuje se specifičnim klimatskim režimom, na koji poseban uticaj imaju Jadransko more i visoke planine, tako da se sa sigurnošću može reći da je ovo područje sa najintenzivnijim hidrološkim režimom u Evropi (Hrvačević, 2004). Slivno područje vrela Rijeka Crnojevića orografski je odvojeno od Jadranskog mora visokim planinskim vrhovima Lovćena i Orjena. Za ovo područje karakteristična je velika promena nadmorskih visina na relativnom malom prostoru (od 80 mm koliko iznosi nadmorska visina vrela Rijeke Crnojevića do 1600 mm koliko iznose planinski vrhovi Lovćena i Orjena), što takođe direktno utiče na pluviometrijski i temperaturni režim.

Analiza klimatskih karakteristika slivnog područja vrela Rijeka Crnojevića izvršena je na osnovu podataka izmerenih na klimatološkoj stanici Cetinje u periodu 2015 – 2020. godina. Ovaj period osmatranja je odabran kako bi korespondirao sa podacima o izdašnosti vrela, odnosno kako bi bio komparativan sa analizama koje su izvršene za ostale primere. Ova stanica se nalazi na 640 mm i po godišnjim sumama kiše reprezentativno predstavlja područje na kome se prihranjuje vrelo Rijeke Crnojevića.

U tabeli 6.41 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa meteorološke stanice Cetinje.

Tabela 6.41. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Cetinje u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označene maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	646,6	374,3	427,9	121,1	69,1	114,3	19,2	90,9	57,7	356,1	324,5	0	2601,7
2016	638	581,9	537,1	178,9	322,3	304,9	134,3	18	189,7	356,4	452,1	1,6	3715,2
2017	270,1	513,8	203,9	180,7	76,2	5,2	3,6	6,2	187,6	78,4	600,8	977,9	3104,4
2018	278,5	605,4	1013,8	48,1	160,8	102,4	40,1	57,4	34,3	283,9	583,7	234	3442,4
2019	414,9	205,4	55,1	261,4	376,8	23	183,4	5,3	166,3	75,4	745	684,6	3196,6
2020	142	108,8	438,5	103	83,2	49,9	17	108,9	470,4	394,5	13,0	753,1	2682,3
Pr.	398,3	398,3	446,1	148,8	181,4	99,9	66,3	47,8	184,3	257,5	453,2	441,8	3123,7

Iz tabele 6.41 se vidi da je mesec sa najvećom sumom padavina bio mart 2018. godine sa čak 1013,8 mm pale kiše, dok je mesec sa minimalnom vrednošću pale kiše decembar 2015. godine kada zapravo kiša nije ni zabeležena, dok ukoliko izumemo ovaj mesec kada nije bilo padavina, minimalna mesečna suma padavina je bila decembra 2016. godine, kada je palo 1,6 mm kiše. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 2601,7 mm 2015. godine do čak 3715,2 mm, koliko je ukupno palo 2016. godine, tako da prosečna suma padavina u navedenom periodu iznosi 3123,17 mm/god. Ovoliko velikoj količini padavina doprinosi uticaj Lovćena, koji predstavlja barijeru kretanja vazдушnim masama zasićenim vodenom parom sa Jadranskog mora, koje se na ovom prostoru kondenzuju i izlučuju u velikoj meri. Prosečne srednjemesečne padavine u periodu 2015 - 2020 variraju od 47,8 mm koje padnu u avgustu do 453,1 mm koje su karakteristične za novembar mesec.

U tabeli 6.42 dat je prikaz maksimalnih mesečnih i srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnjih vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina sa stanice Cetinje. Iz tabele se uočava da je mesec sa maksimalnom vrednošću ukupnog snega bio januar 2019. godine sa 57 cm snega, dok se vidi da i u aprilu može doći do snežnih padavina, kao što je bio slučaj u 2015. i 2020. godini, kada je zabeležena maksimalna vrednost ukupnog snega od 2, tj. 19 cm. Snežne padavine se ponovo aktiviraju najčešće tokom decembra. Može se zaključiti da se snežne padavine javljaju u talasu od novembra do aprila sa maksimalnim vrednostima u januaru. Srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina variraju od 3 cm 2016. godine do 31,3 cm 2019. godine, dok je prosečna srednjegodišnja vrednost ukupnog snega za period 2015 – 2020. godina bila 19,3 cm, uz napomenu da je proračun palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.42. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Cetinje u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom minimalne, a zelenom srednjemesečne i srednjegodišnje sumarne vrednosti kumulativnog snega (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	S
2015	42	23	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	21,3
2016	4	5	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3,0
2017	50	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	28,0
2018	6	41	34	0	0	0	0	0	0	0	0	6	21,8
2019	57	35	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,3
2020	0	2	10	19	0	0	0	0	0	0	0	0	10,3
Prosek	26,5	22,7	11,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,7	19,3

U tabeli 6.43 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Cetinje. Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2017. godine sa 22,7°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -3,4°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 10,7°C 2017. godine do 11,4°C, koliko je bilo 2018. godine, tako da je prosečna temperatura vazduha za period 2015-2020 godina 11°C.

Tabela 6.43. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Cetinje u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (ZHMS)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	1,4	2,2	5,1	8,8	15,0	18,7	22,7	20,9	16,4	11,0	6,6	1,6	10,9
2016	2,4	5,8	5,6	11,2	12,8	18,5	21,6	19,8	14,9	10,2	6,3	0,0	10,8
2017	-3,4	3,5	7,2	8,9	14,3	20,2	22,3	22,3	14,3	9,2	6,1	2,9	10,7
2018	2,8	2,2	5,5	12,9	16,3	18,7	20,4	21,0	15,7	11,7	7,5	1,9	11,4
2019	-1,2	2,6	6,6	10,1	11,1	20,4	21,1	21,3	16,3	11,2	9,8	4,6	11,2
2020	1,4	4,0	6,2	9,5	14,2	16,8	21,1	20,7	17,2	10,8	6,2	5,0	11,1
Prosek	0,6	3,4	6,0	10,3	13,9	18,9	21,5	21,0	15,8	10,7	7,1	2,7	11,0

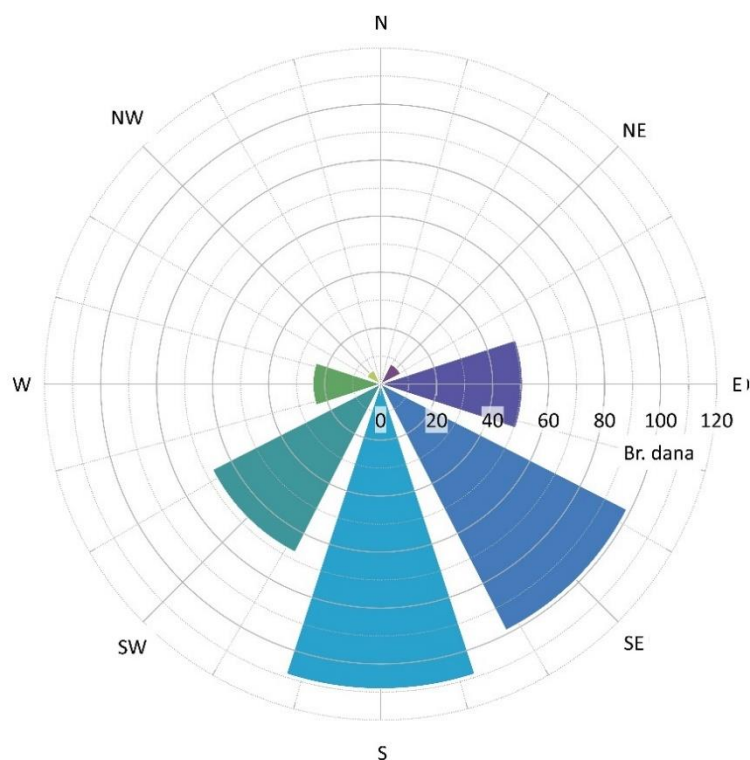
U tabeli 6.44 date su prosečne mesečne vrednosti brzina vetra (u m/s), dok su čestine date prema pravcima iz kojih duvaju, osmatrane na stanici Cetinje. S obzirom da se brzine vetra ne osmatraju prema pravcima, nije moguće prikazati ružu vetrova prema brzini vetra, već samo

prema broju dana tokom kojih duvaju vetrovi određenog pravca (Sl. 6.102), sa koje se vidi da južni i jugoistočni vetar duva najveći broj dana na prostoru Cetinja.

Tabela 6.44. Prosečne mesečne i godišnje brzine vetra (u m/s) za stanicu Cetinje za period 2015-2020. god. (ZHMS)

BRZINA VETRA (u m/s)													
	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	1,69	1,49	1,40	1,82	1,29	1,32	1,26	1,11	1,13	1,06	1,17	0,85	1,30
2016	1,77	1,84	1,58	1,53	1,45	1,15	1,09	1,11	1,02	1,13	1,48	1,13	1,36
2017	0,98	1,21	1,59	1,54	1,33	1,22	1,39	1,15	0,95	0,76	1,01	1,68	1,23
2018	1,32	1,40	1,69	1,40	1,11	1,22	1,27	0,91	1,03	1,22	1,09	0,96	1,22
2019	1,12	1,68	1,37	1,57	1,29	1,08	1,08	0,91	0,95	0,83	1,59	1,56	1,25
2020	1,07	1,58	1,49	1,52	1,28	1,21	1,23	0,97	1,10	0,84	0,70	1,19	1,18

ČESTINA VETRA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2015	1	14	44	109	113	53	23	8
2016	0	4	70	85	107	71	23	5
2017	3	13	63	97	80	81	20	8
2018	1	5	41	96	127	59	33	3
2019	2	2	51	103	111	63	26	4
2020	1	10	35	102	115	77	20	5
Prosek	1	8	51	99	109	67	24	6



Sl. 6.102. Ruža vetrova za stanicu Cetinje za period 2015-2020. god. (prema podacima ZHMS)

6.6.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

Celokupni istražni prostor hidrografski pripada Jadranskom slivu, tj. sve vode ovog područja se preko Skadarskog jezera i reke Bojane ulivaju u Jadransko more. Imajući u vidu da su jako

karstifikovani karbonatni sedimenti izrazito dominantni na širem istražnom području, sasvim je logično potpuno odsustvo drenažne mreže. Ipak, veoma mali broj rečnih tokova postoji na istražnom terenu. Najčešće je reč o povremenim rečnim tokovima, koji se aktiviraju pri kišnim epizodama jako velikog intenziteta, što je glavna karakteristika klime ovog kraja. Povremeni rečni tokovi koji se nalaze na širem istražnom terenu su: potok Borovik, južno od Cetinja, na samom južnom obodu Cetinjskog polja, koji posle 2 km toka ponire u jednom od brojnih ponora na obodu polja; Ljubin potok u blizini Ivanovih korita ispod Lovćena, Uganjski potok, formiran isticanjem Uganjskih vrela, ali bez prelivnih voda, budući da su Uganjska vrela kaptirana za vodosnabdevanje Cetinja.

Najznačajniji stalni rečni tok na istražnom prostoru je Rijeka Crnojevića. Izvire iz Obodske pećine, nakon čega formira svoj tok tekući na istok kraćim delom kao Obodska rijeka, da bi nizvodno postala Rijeka Crnojevića. Ova reka je nakon 3,5 km formirala meandar ka severu, koji se završava pravcem ka Skadarskom jezeru na jugoistok. Dužina rečnog toka je 13 km, a karakteristika Rijeke Crnojevića je da je ona plovna već posle 1 km od izvorišne zone. Područje oko Rijeke Crnojevića je plavnog karaktera, pa često dolazi do plavljenja rečne doline. Takođe, reka je pod direktnim uticajem fluktuacije nivoa Skadarskog jezera, tako da se pri srednjim i visokim vodama, tj. nivoima jezera javlja uspor u oticanju Rijeke Crnojevića, što utiče na plavljenje terena i formiranje močvarnog izgleda ovog područja.

Vodostaji i proticaji Rijeke Crnojevića osmatraju se od 1987. godine na hidrološkoj stanici *Brodsko njiva*, koja je u nadležnosti Zavoda za meteorologiju i hidrologiju Crne Gore. Kota „0“ hidrološke stanice geodetski je snimljena na 8,32 mnm, a procenjena površina sliva do hidrološke stanice je 83 km² (Mrdak et al. 2012). Hidrološka stanica nalazi se na nešto manje od 2 km od karstnog vrela iz koga se formira rečni tok, a sama stanica je izvan zone uspora, tako da se sa sigurnošću može reći da odražava režim Rijeke Crnojevića tokom cele godine. Nizvodno ne postoji nijedna stanica koja meri vodostaje i proticaje na profilu ili pri ušću reke u Skadarsko jezero, najverovatnije iz razloga što je reka često pod uticajem jezera, pa podaci ne bi bili reprezentativni, a i zbog nemogućnost rada stanice pri čestim poplavama. Prosečna vrednost proticaja Rijeke Crnojevića u periodu 2015 – 2020 iznosi 5,63 m³/s.

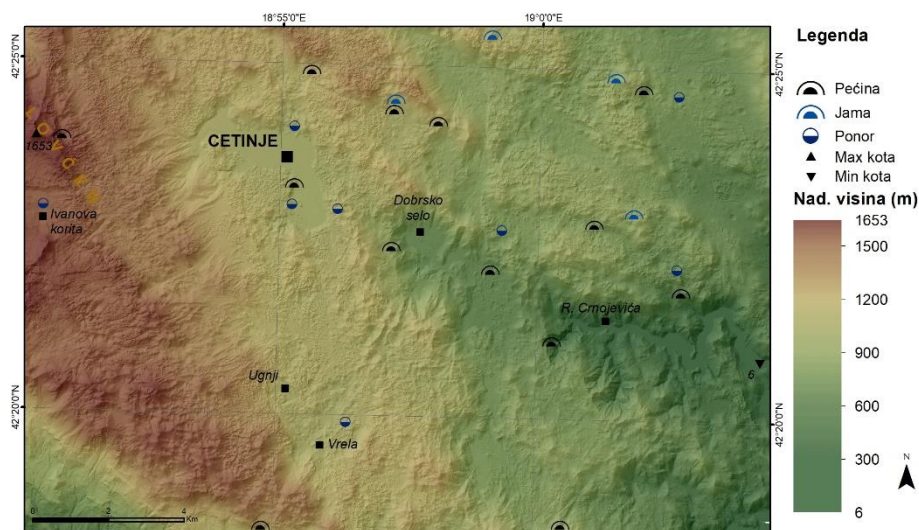
6.6.4 Geomorfološke karakteristike

Geomorfološke karakteristike šireg istražnog područja sliva vrela Rijeke Crnojevića uslovljene su burnom geološkom istorijom i intenzivnom tektonskom aktivnošću ovog prostora, odnosno povoljnim (paleo)klimatskim uslovima. Radulović M. (1996) pozicionira slivno područje vrela Rijeke Crnojevića u okviru *Starocrnogorske karste zaravni*.

Na širem slivnom području vrela Rijeka Crnojevića nadmorske visine variraju od 6 mnm, koliko iznosi najniža tačka na jugoistoku istražnog područja do 1653 mnm, što predstavlja najviši vrh istražnog područja na severozapadnom delu karte, a koji pripada Lovćenu (Sl. 6.103). Dominantan geomorfološki proces na ovom području je karstni proces i to sa fluvijalnim procesom koji mu je prethodio u geološkoj istoriji. Paleorekonstrukcijom hidrografskih uslova na terenu, može se ustanoviti postojanje paleotoka Cetinjske (ili Ceklinske) reke, koja se evolucijom i napredovanjem karstnog geomorfološkog procesa spuštala u podzemlje, formirajući stalno vlažnu, periodično vlažnu i suhu zonu. Potvrda o paleotoku Cetinjske reke evidentna je na osnovu pomenutih zona, tj. površinskih i podzemnih karstnih geomorfoloških oblika u vidu nekadašnjih tačaka isticanja podzemnih voda, zatim suvih i slepih rečnih dolina, vrtača, jama, pećina i ponora.

Prostor između Cetinja i Rijeke Crnojevića, iako male površine odlikuje se postojanjem praktično svih površinskih i podzemnih karstnih geomorfoloških oblika, što je prava retkost u svetu. Površinski karstni oblici obuhvataju karstno Cetinjsko polje, skaršćene suve doline

nekadašnje Cetinjske reke, vrtače i uvale. Cetinjsko polje je zatvoreno karstno polje, površine oko 4 km², sa nadmorskim visinama između 635 i 670 m. Polje je izgrađeno od kvartarnih glaciofluvijalnih sedimenata koji su se nataložili kretanjem lednika i glečera sa okolnih planinskih vrhova. Paleoreljef Cetinjskog polja čine krečnjaci i dolomiti gornjotrijaske i donjojurske starosti.



Sl. 6.103. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Rijeke Crnojevića na kome su vrtače uočljive u vidu sivih tačaka u okviru slivnog područja vrela

Karstna uvala u Dobrskom selu predstavlja nastavak Cetinjskog polja ka Rijeci Crnojevića i iste je geneze kao Cetinjsko polje. Zajednička karakteristika im je da se plave pri kišama ekstremnog intenziteta, kao i da se na obodima polja nalaze ponori koji primaju vodu i sprovode je ka Rijeci Crnojevića. Rasedna struktura pravca pružanja sever – jug predstavlja tektonski kontakt dolomita gornjotrijaske starosti i krečnjaka donjojurske starosti koji se nalazi na južnom obodu Cetinjskog polja. To je zona u kojoj se nalazi glavni Cetinjski ponor, na preseku ovog raseda sa glavnim Cetinjskim rasedom pravca pružanja jugozapad-severoistok. Na obodnim delovima uvale u Dobrskom selu se takođe nalaze ponori, na kontaktu propusnih i nepropusnih stena. Među ostalim ponorima koji se nalaze na širem istražnom području karakteristični su ponor Uganjskih vrela južno od Cetinja, kao i ponori Obzovice koji su u obliku bunarastih vrtača oformljenih u limnoglacijalnom nanosu.

Pećine imaju veliku ulogu u hidrološkom i hidrogeološkom funkcionisanju karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića. Osnovne karakteristike pećina ovog područja je da su najčešće vezane za fosilne rečne doline, koje su nekada predstavljale površinske tokove kao što je slučaj sa nekadašnjom Cetinjskom rekam, zatim da imaju prostrani ulaz i znatno veće galerije i dvorane od pećina formirane u krečnjacima, znatno su duže, bogatije pećinskim nakitima i najčešće su sa vodom (Radulović M. 1996). Najpoznatije pećine ovog područja su Cetinjska (dužina 1240 m), Lipska (3650 m) i Obodska pećina, koje su hidrološki povezane (Radulović V. 1974). Osim njih, na istražnom prostoru se nalaze i Strugarska pećina u ataru sela Ceklin, Miloševa pećina na Lovćenu u podnožju Njegoševog mauzoleja, Zapecka i Gradinska pećina u Bokovu, Ilijina pećina u Zagori i Brovska pećina u selu Gornja Brova.

Cetinjska pećina nalazi se na obodu Cetinjskog polja, u neposrednoj blizini Cetinjskog manastira. Ova pećina je zatvorena za posetioce, nije moguće dublje ući u nju, a pri ekstremnim kišnim pojavama funkcioniše kao jako karstno vrelo.

Lipska pećina nalazi se u zaseoku Lipa, oko 10 km jugoistočno od Cetinja. Pećina obiluje karstnim kanalima i dvoranama, svedočeci o evoluciji i razvijenosti karstnog geomorfološkog

procesa. Lipska pećina je većinom godine suva, budući da ona sada zapravo obuhvata suhu i periodično vlažnu zonu, a da se podzemna voda spustila na niže nivoe. Do sada je istraženo preko 3,5 km pećinskih kanala, dok je visinska razlika između najviše i najniže tačke u pećini 300 m (Prijestonica Cetinje, 2013). Lipska pećina obiluje pećinskim nakitom izuzetne lepote i vrednosti.

Obodska pećina se nalazi u selu Obod i predstavlja tačku isticanja Rijeke Crnojevića pri visokim nivoima podzemnih voda. Hidrološki je povezana za pećinskim sistemom Lipske i Cetinjske pećine.

Prema Raduloviću M. (1996) jame se na ovom prostoru najčešće pozicioniraju duž rasednih zona ili na dnu većih vrtača, relativno su duboke i karakterišu se vertikalnim kanalima koji se nastavljaju u kaverne i pukotine koje prožimaju stenske mase do lokalnih erozionih bazisa, a nekada i dublje. Ovi karstni oblici mogu biti značajni sa aspekta lokalnog vodosnabdevanja, odnosno za manja sela i zaseoke, kao što je slučaj sa Kašičkom jamom i jamom Jarčicom koja snabdeva vodom Župu Dobrsku, severno od Rijeke Crnojevića (Radulović M. 1996). Na tom prostoru, površine svega 1,5 km², locirano je čak 6 jama sa vodom, koje su formirane u dolomitima donjojurske starosti.

6.6.5 Geološke karakteristike

Najveće rasprostranjenje na terenu imaju mezozojski geološki kompleksi, od donjeg trijasa do gornje krede, uz postojanje prelazne flišne zone ka eocenu i kvartarnih sedimenata, kao najmlađih tvorevina.

Donjotrijaski sedimenti (T₁) su predstavljeni bankovitim dolomitima sa tankim proslojcima laporaca. Srednetrijaski sedimenti na istražnom terenu su razvijeni u krečnjačkoj i flišnoj faciji. Anizijski fliš (T₂¹) javlja se na prostoru od Cetinjskog antiklinorijuma do Skadarskog jezera, predstavljen je konglomeratima, peskovitim intrasparitima, alevrolitima, peskovitim laporcima. Krečnjačka facija anizijskog kata (T₂¹) izgrađena je od bankovitih do masivnih, krečnjaka sive boje. Serija ladinskih krečnjaka (T₂²) leži preko sedimentno-vulkanogenih tvorevina, pripada gornjem delu ladinskog kata, a locirana je na području Vrela, Obzovice i Brajića. Neraščlanjena srednje- i gornjotrijaska (T_{2,3}) serija sedimenata izgrađena je od slojevitih do bankovitih krečnjaka u smenama sa bancima dolomita i rožnaca.

Sedimenti gornjeg trijasa (T₃) imaju najveće rasprostranjenje na istražnom području, i predstavljaju najviše horizonte karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića. Ova serije obuhvata dolomite, dolomitične krečnjake i krečnjake, dok su u gornjim horizontima zastupljene i krečnjačko-dolomitske breče. Dolomiti predstavljaju dominantne sedimente u ovoj seriji. Cela gornjotrijaska serija je bogata faunom, dok su područja u podnožju Lovćena i Cetinja, u kojima su locirani megalodoni izdvojena kao posebna jedinica (¹T₃). Sedimenti noričkog i retskog kata (T₃²⁺³) se postepeno razvijaju iz sprudnih krečnjaka karnijskog kata u vidu grudvastih beličastih krečnjaka, dolomitičnih krečnjaka i dolomita trakastog izgleda (Mirković et al. 1968).

Donjojurske slojeve najčešće izgrađuju bankoviti, oolitični krečnjaci i dolomiti, laporci i laporoviti krečnjaci, breče, konglomerati i rožnaci, sa dva tipa razvića – prvi koji je predstavljen serijom krečnjaka i dolomita sa znatnim interkalacijama laporaca i rožnaca (²J₁), i drugi koji je predstavljen krečnjacima i dolomitima sa amonitima, posebno u oblasti Lovćena, Njeguša i Rijeke Crnojevića (¹J₁). Jurska serija koja pripada dogeru i malmu (J_{2,3}) izgrađena je od krečnjaka koji se lateralno smenjuju sa dolomitima, odnosno gornjojurska serija (J₃^{2,3}), predstavljena dolomitičnom facijom sa podređenom ulogom krečnjaka.

Donjokredni sedimenti (K₁) u okviru Budvansko-barske zone odlikuje se rožnacima sa malim udelom organogeno-detritičnih krečnjaka i breča, dok se donja krede (K₁) razvijena u zoni

Visokog krša odlikuje bankovitim krečnjacima i dolomitima. Kao posebna geološka jedinica u vidu bankovitih i slojevitih krečnjaka, dolomita i dolomitičnih krečnjaka, izdvojena je serija alb-cenoman ($K_{1,2}$). Gornjokredni sedimenti (K_2) koji pripadaju Budvansko-barskoj zoni predstavljeni su brečama i kalkarenitima sa proslojcima rožnaca ($K_2^{1,3}$) (Antonijević et al. 1969). Gornjokredni sedimenti koji pripadaju zoni Visokog krša predstavljeni su krečnjacima, dolomitičnim krečnjacima i dolomitima (K_2^2). Neraščlanjena kredno-paleogena (K-E) serija Budvansko-barske zone je predstavljena peščarima, laporcima i glincima.

Među najmlađim tvorevinama ističu se kvartarni sedimenti u vidu glacijalnih, fluvioglacijalnih i aluvijalnih sedimenata, kao i crvenice. Glacijalni sedimenti karakteristični su za predele nanosa morenskog materijala koji se deponovao tokom i nakon otapanja lednika sa visokih planinskih vrhova Lovćena, Orjena, Njeguša i dr., dok je fluvioglacijalni nanos deponovan pod uticajem fluvijalnog procesa. Crvenica je karakteristična za karstifikovane karbonate Visokog krša, gde su dna vrtača i uvala najčešće pokrivena ovim materijalom, čime su formirane jedine obradive površine na ovom prostoru.

Prema tektonskim karakteristikama, na istražnom području se nalaze dve geotektonske jedinice – Budvansko-barska zona i zona Visokog krša. Slojevi koji su formirani tokom geološke istorije obično imaju dinarski pravac pružanja, ali neretko su prisutni i poremećeni slojevi kao rezultat intenzivnog ubiranja i rasedanja. Istražni prostor pripada Starocrnogorskom antiklinorijumu u užem smislu, čija je osnovna karakteristika intenzivna izrasedanost. U ovoj zoni, rasedi su pretežno vertikalni i različitih pravaca pružanja, koji su deformisali prethodno stvorene strukture.

6.6.6 Hidrogeološke karakteristike

Na celom istražnom terenu mogu se izdvojiti zbijeni, pukotinski i karstni tip izdani (Prilog 11). Dominantan i najznačajniji tip izdani na istražnom prostoru je karstni, formiran u okviru krečnjaka anizijskog kata, kalkarenita i mikrita sa dolomitima srednjeg i gornjeg trijasa, dolomita i krečnjaka gornjeg trijasa, zatim u lijaskim krečnjacima, dolomitima i dolomitima sa amonitima, dolomitičnim krečnjacima i krečnjacima donje i gornje krede (Prilog 11).

Prema hidrogeološkoj klasifikaciji karstnih terena Crne Gore Radulovića M. (1996), karstni tip izdani izdvojen na istražnom prostoru pripada klasi *Srednje do dobro skaršćenih stena kavernožno-pukotinske poroznosti*. Osnovni vid prihranjivanja karstne izdani na istražnom području je infiltracija atmosferskih voda na otvorenim karstnim terenima, odnosno poniranje voda preko ponora na obodu Cetinjskog polja i uvale Dobrskog sela. Imajući u vidu dobro karstifikovane dolomite gornjotrijaske starosti na potezu od Cetinja do Rijeke Crnojevića, odnosno krečnjake jurske starosti na Lovćenu, kao i veliku količinu padavina koja se izluči na ovom prostoru (više od 3500 mm godišnje), može se zaključiti o veoma intenzivnom prihranjivanju karstne izdani istražnog područja.

Glavni pravac cirkulacije podzemnih voda predisponiran je Cetinjskim rasedom koji usmerava poniruće vode Cetinjskog polja ka glavnoj tački isticanja – vrelu Rijeke Crnojevića, dakle od severozapada ka jugoistoku. Dezintegracijom Cetinjske reke i njenim spuštanjem u podzemlje, razvijao se i karstni sistem o čemu svedoče i zone paleoisticanja karstnih podzemnih voda. Na taj način primarna zona isticanja pri formiranju karstnog sistema bila je Cetinjska pećina na koti 640 m, zatim Lipska pećina na koti oko 525 m pri spuštanju stalno vlažne zone, da bi današnju kotu isticanja podzemnih voda činila Obodska pećina na koti oko 80 m pri visokim nivoima podzemnih voda, odnosno današnji izvor Rijeke Crnojevića na koti oko 40 m preko koga stalno ističe karstna podzemna voda.

Osim horizontalnih kretanja podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića, treba istaći i vertikalnu fluktuaciju nivoa podzemnih voda ovog sistema, tako da pri ekstremnim vrednostima prihranjivanja, moguće je aktiviranje nekadašnjih tačaka isticanja na višim hipsometrijskim zonama, kao što je bio slučaj februara 1986. godine kada je ekstremnim skokom nivoa podzemnih voda, aktivirano isticanje Cetinjske pećine što je uslovalo veliku poplavu ovog kraja. Radulović M. (1996) navodi da je dubina do nivoa podzemnih voda u Cetinjskom polju u sušnom delu godine od 80 do 100 m, a u zoni Cetinjskog raseda do 200 m.

Na prostoru Cetinjskog polja izveden je značajan broj opita trasiranja karstnih podzemnih voda natrijum fluoresceinom, koji su potvrdili vezu ovog polja sa vrelom Rijeke Crnojevića. Radulović M. (1996) navodi opite obeležavanja Cetinjskog ponora 15. marta 1934. godine, kada se traser pojavio na vrelu Rijeke Crnojevića posle 62h (17. mart), tako da je uz visinsku razliku od 598 m i pravolinijsko rastojanje od 7 km, fiktivna brzina iznosila 4,05 cm/s. Živaljević (1992) navodi i podatak o opitu trasiranja karstnih podzemnih voda Cetinjskog polja iz 1973. godine, kada je 37 kg natrijum fluoresceina ubačeno u istražnu bušotinu dubine 205 m, koja je locirana u neposrednoj blizini Cetinjskog raseda. Traser se pojavio nakon 17 dana, isticao je od 28. jula do 2. avgusta, što bi značilo da je opit izveden sredinom jula meseca, budući da se ne navodi tačan datum i vreme ubacivanja trasera. Tokom opita i kvantitativne analize isteklog obeleživača ustanovljeno je da je isteklo oko 89% ubačenog trasera, dok je proračunata fiktivna brzina 1 cm/s, uz obaveznu napomenu da je pravolinijsko rastojanje između bušotine i vrela uvećano za 30% (Živaljević, 1992).

Dreniranje karstnih podzemnih voda istražnog područja vrši se na hipsometrijski najnižim tačkama. Na širem istražnom području najznačajnije karstno vrelo je vrelo Rijeke Crnojevića (Sl. 6.104), koje ističe tokom cele hidrološke godine, iz Obodske pećine pri velikim vodama, dok tokom srednjih i malih voda ističe dvadesetak metara nizvodnije.

Do pećine se može doći jedino peške, polusatnim hodom od hidrološke stanice Brodske njive, i to samo u periodu malih voda, dok do mesta stalnog isticanja podzemnih voda nije moguće doći, s obzirom da se nalazi u podnožju stenskog odseka, a i samo vrelo je maskirano vegetacijom. Vrelo Rijeke Crnojevića se prihranjuje infiltriranjem atmosferskih padavina na otvorenim karstnim terenima izgrađenim od ispucalih gornjotrijaskih dolomita, kao i poniranjem površinskog toka Borovik na obodu Cetinjskog polja i poniranjem povremenih površinskih tokova u uvali Dobrskog sela. Pravac cirkulacije je uslovljen Cetinjskim rasedom. Karstno vrelo Rijeke Crnojevića odlikuje se izuzetno velikim razlikama između ekstremnih vrednosti isticanja. Radulović M. (1996) navodi minimalne količine vode od 0,383 m³/s, a maksimalne od 188 m³/s, na osnovu čega koeficijent hidrodinamičke neravnomernosti iznosi čitavih 491. Živaljević (1992) analizira reakciju karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića na kiše različitog intenziteta, na osnovu čega zaključuje da je reakcija sistema izuzetno brza – samo 2h je dovoljno karstnom sistemu ovog vrela da reaguje na kišnu epizodu iznad 10 mm. Prema režimu isticanja u recesionim uslovima, ističe se brzo pražnjenje sistema tokom prvog mikrorežima (posle 30h), kada istekne i do 85% ukupne zapremine vode istekle tokom recesije (Živaljević, 1992).



Sl. 6.104. Obodska pećina kao vrelo Rijeke Crnojevića pri visokim nivoima podzemnih voda (levo); Suvo rečno korito Obodske reke koja se formira iz Obodske pećine samo pri visokim nivoima podzemnih voda (desno)

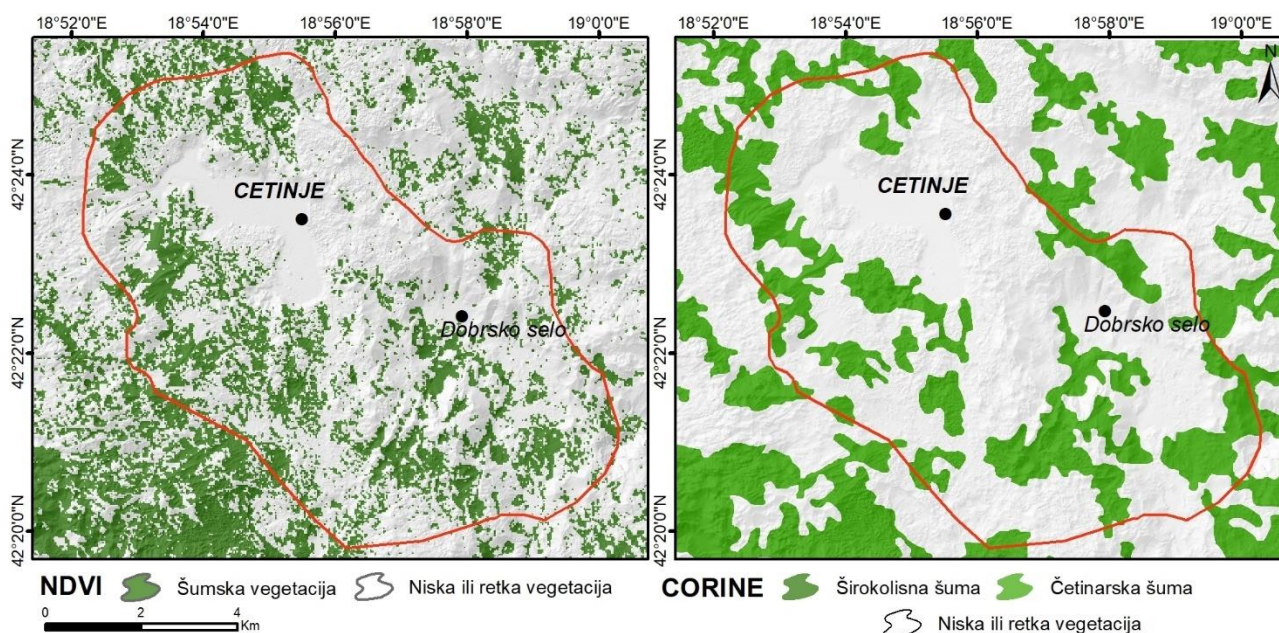
Određivanje površine sliva ovog vrela je izuzetno težak zadatak imajući u vidu visok koeficijent hidrodinamičke neravnomernosti. Stoga, u dosadašnjim podacima figuriše veličina od oko 79 km², koja se zapravo prevashodno odnosi na sliv HS Brodska njiva, tj. reč je o hidrografskom slivu. Takođe, ova površina uključuje i podslivove Uganjskih i vrela Obzovice koja su delom kaptirana, a nesumnjivo pripadaju hidrografskom slivu Rijeke Crnojevića i Skadarskom jezeru. Bilansiranjem korigovanih vrednosti padavina i isticanja podzemnih voda, usvojena je površina sliva od 69 km² (Prilog 11), pri kojoj oko 45% infiltriranih voda prosečno istekne kroz vrelo Rijeke Crnojevića, dok se ostatak vode od 55% drenira površinski i podzemno. Naime, s obzirom na značajnu visinsku razliku zone prihranjivanja (Cetinjsko polje je na visini od 660 do 760 m) i zone isticanja (Obodska pećina je na 81 m, a stalno vrelo oko 60 m) na relativno malom prostoru, zaključuje se i da je srednji nivo podzemnih voda na velikoj dubini. Tako, nailaskom intenzivne kišne epizode dolazi do podizanja nivoa podzemnih voda, čime se aktiviraju paleotačke isticanja, od kojih je prva Obodska pećina, a zatim idući zaleđem vrela Lipska, Cetinjska i Miloševa pećina. Na taj način, isticanje podzemnih voda tokom hidrološke godine se ne vrši samo na vrelu Rijeke Crnojevića, već i na svim navedenim tačkama, uz plavljenje uvale u Dobrskom selu i Cetinjskog karstnog polja, kao što je bio ekstremni slučaj 1986. godine. Pored toga, podzemno oticanje je vrlo verovatno prisutno i u okviru ovog karstnog sistema, dok se jedan deo voda svakako potroši na akumuliranje u samom sistemu.

6.6.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića

6.6.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Za slivno područje vrela Rijeke Crnojevića, sračunato je da šumska vegetacija i prema NDVI snimku i prema CORINE karti pokriva 28% sliva (Sl. 6.105), što je i usvojeno za finalni vegetacioni indeks, tako da je finalna vrednost efektivne infiltracije sačinjena od 28% viška

vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 72% viška vode je sa područja sa niskom ili retkom vegetacijom.



Sl. 6.105. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva vrela Rijeke Crnojevića (podaci USGS, snimak zabeležen 3. avgusta 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva vrela Rijeke Crnojevića (kodovi 311, 312 i 313) (EEA, 2018); Granica sliva vrela Rijeke Crnojevića prikazana je crvenom linijom

Kalibracija deficita zemljišne vlage, površine sliva i efektivne infiltracije je pokazala da maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje Rijeke Crnojevića iznosi 150 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Najveća vrednost deficita zemljišne vlage je tokom letnjih meseci, kada je i najveća temperatura vazduha, kao i vrednost evapotranspiracije, što dovodi do isušivanja zemljišta, odnosno do velike vrednosti isparavanja prispelih padavina. Sa druge strane, najmanji deficit zemljišne vlage javlja se u jesenjim i zimskim mesecima, kada je i najveća količina padavina na ovom području. Tada se najveći deo padavina infiltrira u podzemlje na zasićenje zemljišne vlage, odnosno na efektivnu infiltraciju karstnog sistema Rijeka Crnojevića.

Tabela 6.45 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabela 6.41-6.44), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu Rijeke Crnojevića. Date su i procentualne vrednosti evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

Iz tabele 6.45 uočava se da je vrednost korigovanih padavina i na područjima pod vegetacijom i na područjima sa niskom ili retkom vegetacijom značajno veća od izmerenih vrednosti padavina na stanici Cetinje, tako da je ukupna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom za 3118,2 mm prosečno veća od izmerenih vrednosti kiše, dok je na području sa vegetacijom ona prosečno veća za 3329,4 mm. Ovolike razlike javljaju se usled činjenice da su izmerene vrednosti manje od stvarno palih kiša usled uticaja vetra, koji je značajan faktor na prostoru Cetinja. Takođe, u obzir su uzete i snežne padavine koje na prostoru Cetinja i Lovćena mogu biti intenzivne.

Tabela 6.45. Usporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Cetinje, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Rijeke Crnojevića za period 2015 – 2020. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Rijeke Crnojevića

	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Prosek
P bruto (mm)	3585,7	2257,4	3997,9	2793,2	3026,7	3132,2
PgSWE (mm)	7292,1	4406,2	8834,3	4901,5	5817,7	6250,4
PgiSWE (mm)	7817,9	4500,8	8780,4	4878,5	6330,3	6461,6
PET (mm)	765,1	765,4	781,1	762,9	781,7	771,3
PET/Pbruto (%)	21,3	33,9	19,5	27,3	25,8	24,6
AETg (mm)	643,8	432,9	593,2	565,4	560,8	559,2
AETg/PgSWE (%)	8,8	9,8	6,7	11,5	9,6	8,9
AETveg (mm)	642,1	421,1	583,0	556,8	531,0	546,8
AETv/PgiSWE (%)	8,2	9,4	6,6	11,4	8,4	8,5
Wi (g) (mm)	6668,4	3963,2	8313,7	4264,9	5248,6	5691,8
Wi (g) / PgSWE (%)	91,4	89,9	94,1	87,0	90,2	91,1
Wi (š) (mm)	7195,8	4073,7	8277,4	4239,1	5789,7	5915,1
Wi (š) / PgSWE (%)	92,0	90,5	94,3	86,9	91,5	91,5
Ief (mm)	6800,3	3990,8	8304,7	4258,5	5383,9	5747,6
Ief/Pbruto (%)	189,6	176,8	207,7	152,5	177,9	183,5
Ief/PgSWE (%)	93,3	90,6	94,0	86,9	92,5	92,0
Ief/PgiSWE (%)	87,0	88,7	94,6	87,3	85,0	89,0
Qsr (m³/s)	6,19	3,05	7,96	5,30	5,63	5,6
Q (mm) (F = 69 km²)	2841,1	1395,0	3639,1	2424,6	2582,2	2576,4
Δ Ief-Q (mm)	3959,1	2595,8	4665,6	1833,9	2801,7	3171,2
Q / Ief (%)	41,78	34,96	43,82	56,94	47,96	44,83

Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 762,9 mm do 781,7 mm. Komparacijom vrednosti PET sa izmerenim vrednostima padavina uočava se da PET iznosi oko 19,5% do 33,9% pale kiše u pojedinim hidrološkim godinama, što je već prvi indikator značajne infiltracije padavina u karstni sistem Rijeke Crnojevića. Vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa dodatim vodenim ekvivalentom snega su manje od PET, a kreću se od 432,9 mm do 643,8 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 421,1 mm do 642,1 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent iznosilo od 6,7% do 11,5% i za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom i za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **8,5%**, dok je za područja pod vegetacijom **8,9%**.

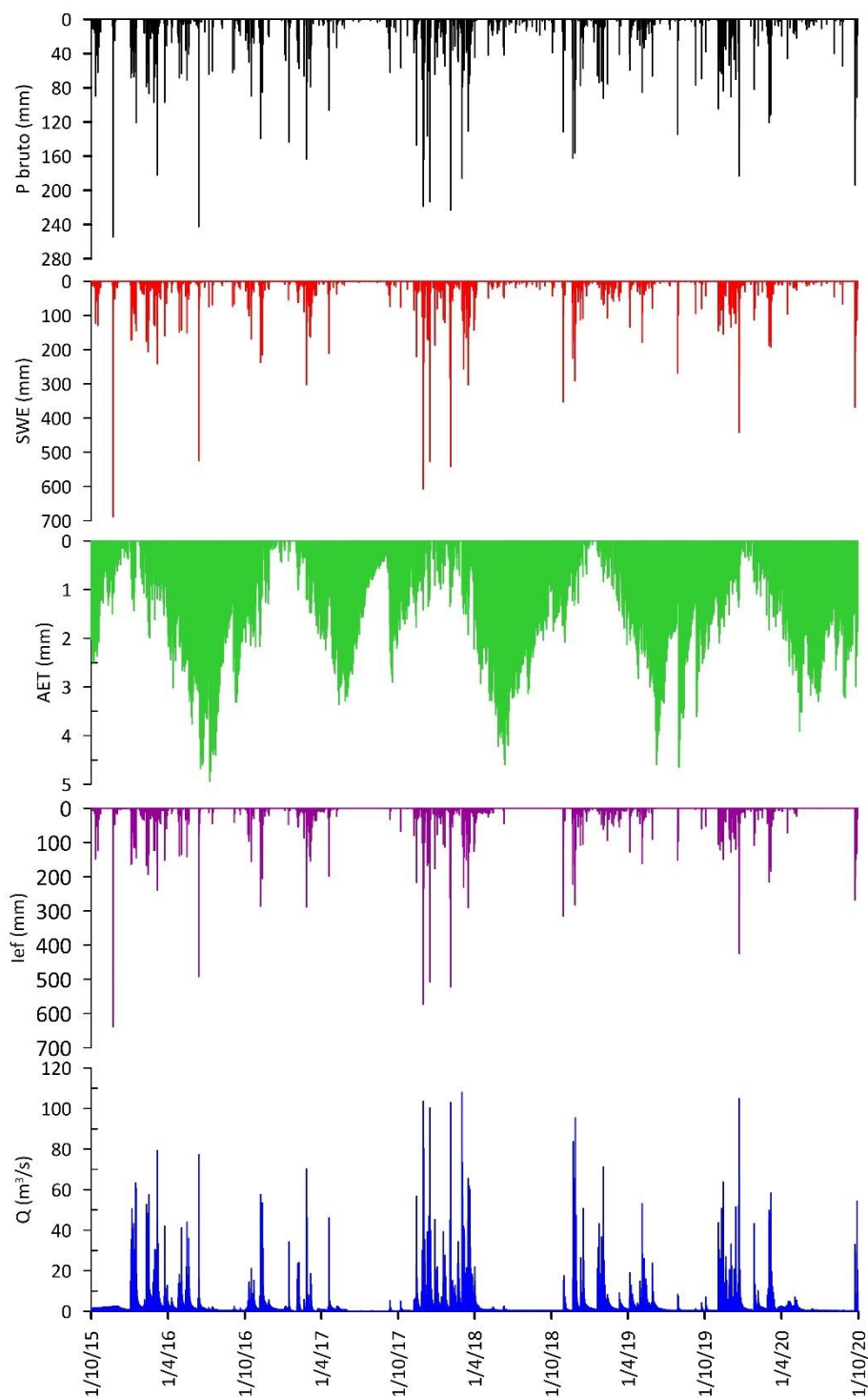
Ukupni višak vode u zemljištu za celokupni period razmatranja iznosi od 3963,2 mm do 8313,7 mm (ili 87% do 94,1% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 4073,7 mm do 8277,4 mm (ili od 86,9% do 94,3% u odnosu na korigovane padavine) za

područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **91,1%**, dok je za područja pod vegetacijom **91,5%**. Procentualne vrednosti se uklapaju sa vrednostima koje odlaze na stvarnu evapotranspiraciju, tako da se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan. Ipak, vrednosti efektivne infiltracije od preko 90%, tj. evapotranspiracije od skoro 10% se čine kao nerealne, te ih ipak treba smatrati uslovnim i uzeti sa rezervom. Vrlo verovatno je da su vrednosti efektivne infiltracije manje, i da ne prelaze 75-80% pale kiše, što je takođe visok procenat infiltracije koji se može očekivati na slivnom području vrela Rijeka Crnojevića.

Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 3990,8 mm do 8277,4 mm u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu. Kao i u slušaju vrela Oko Bijele i stanice Žabljak, i ovde se može uočiti da je odnos efektivne infiltracije i bruto izmerenih padavina na stanici Cetinje daleko iznad 100% (za 2017-2018 čak 207,7%), što ukazuje na činjenicu da je mnogo više vode infiltrirano u podzemlje nego što je izmereno na stanici Cetinje. Površina sliva vrela Rijeka Crnojevića je usvojena na nivou od 69 km², budući da je jasno da ne ističe celokupna voda ovog sistema na vrelu Rijeka Crnojevića, već je prisutno površinsko i podzemno oticanje, kako je već objašnjeno ranije u tekstu. Ukoliko se uporede odnosi sloja isticanja i prosečne godišnje sumarne vrednosti efektivne infiltracije, može se ustanoviti da je u periodu 2015-2020 prosečno kroz vrelo Rijeka Crnojevića isticalo oko 45% novoinfiltriranih voda u ovom karstnom sistemu. Tokom sušne hidrološke godine (2016-2017) isticalo je najmanje vode na vrelu u odnosu na infiltriranu (35%), što se može objasniti veoma niskim nivoima podzemnih voda u sistemu u sušnoj godini, tako da se voda tokom infiltracije gubi lateralno, a samo jedan njen deo dolazi do nivoa podzemnih voda i ističe na vrelu. U ostalim godinama, tj. hidrološkim stanjima, procenat vode koji ističe na vrelu je značajno veći, što ukazuje na to da je vrelo Rijeka Crnojevića dominantna tačka isticanja ovog karstnog sistema, gde skoro polovina infiltrirane vode ističe, dok se na svim ostalim mestima isticanja drenira druga polovina infiltriranih voda.

Grafički prikaz dnevnih vrednosti izmerenih količina padavina za meteorološku stanicu Cetinje, vrednosti vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Rijeka Crnojevića dat je na uporednom dijagramu 6.106. Na pomenutom dijagramu prikazane su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja pod niskom ili retkom vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja.

Sa sl. 6.106 može se uočiti značajno veća vrednosti korigovanih dnevnih padavina sa vodenim ekvivalentom snega u odnosu na izmerene padavine. Takođe, uočava se pojava ciklusa stvarne evapotranspiracije, sa izraženim pikovima tokom vegetacionog perioda u prolećnim i letnjim mesecima. Vrednosti efektivne infiltracije obično se javljaju obrnuto proporcionalno sa vrednostima stvarne evapotranspiracije, međutim individualne epizode efektivne infiltracije se mogu javiti istovremeno sa visokom infiltracijom, imajući u vidu veoma velike vrednosti pale kiše. Vrednosti izdašnosti vrela Rijeka Crnojevića korespondiraju sa pikovima efektivne infiltracije, i u periodu visokih i u periodu niskih voda. Jedini slučaj koji odstupa od sinhronizovanosti pikova hidrograma sa pikovima efektivne infiltracije javlja se u novembru 2015. godine, kada sistem nije reagovao na efektivnu infiltraciju od 640 mm/dan. Razlog za to može biti da je sistem bio toliko ispražnjen u prethodnom recesionom periodu, da je sva voda iskorišćena na popunjavanje rezervi sistema, dok sa druge strane, moguće je da je reakcije sistema bilo, a da je automatska stanica nije registrovala usled kvara ili nekih drugih tehničkih okolnosti. Vrlo verovatno je reakcija vrela na ovu izuzetno jaku efektivnu infiltraciju bila toliko snažna da je usled velikog pritiska došlo do kvara na mernom uređaju.



Sl. 6.106. Uporedni prikaz dnevnih vrednosti izmerenih padavina sa stanice Cetinje, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Rijeke Crnojevića u periodu 2015 – 2020. godina

Takođe, uporedni dijagram na sl. 6.130 pokazuje intenzivnu efektivnu infiltraciju tokom jesenjih i zimskih meseci, kada se javljaju i maksimalne vrednosti isticanja vrela. Interesantno je da su pikovi hidrograma u potpunosti sinhronizovani sa pikovima efektivne infiltracije, što je najbolje uočljivo na hidrogramu tokom hidrološke 2017-2018. Takođe, može se uočiti da i najmanje vrednosti efektivne infiltracije izazivaju automatski i pik isticanja na vrelu Rijeke Crnojevića, što ukazuje na veoma visoku vrednost efektivne infiltracije, ali i na karstni sistem sa dobro razvijenom mrežom karstnih kanala koji veoma brzo sprovode vodu do karstnog

vrela, ne ostavljajući mogućnost za akumulaciju većih količina vode. Zapravo, jedini put kada efektivna infiltracija nije izazvala reakciju vrela desila se tokom novembra 2015. godine, o čemu je već bilo reči.

Na ovaj način može se pretpostaviti da se radi o veoma dobro strukturiranom sistemu sa mrežom veoma karstifikovanih i povezanih karstnih kanala koji imaju veliku i brzu moć transformacije ulaznog signala (kiše i snega) u izlazni (isticanje), a nešto slabiju retencionu sposobnost. Na ovu pretpostavku naslanja se i očigledna veoma velika razlika između minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja.

6.6.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Vremenska serija isticanja za analizirani period (2015-2020) obuhvatala je prekide osmatranja u periodu 26.5. – 30.8.2018. i 11.3. – 30.4. 2020. godine usled neispravnosti automatske stanice, tako da podaci u tom vremenskom periodu ne postoje. Radi konzistentnosti vremenske serije isticanja podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića, kreiran je kros-regresioni model na osnovu koga je popunjen nedostajući niz. Ovaj model uključuje simulaciju dnevnih vrednosti isticanja na osnovu dnevnih vrednosti efektivne infiltracije. Kros-regresionim modelom 8. reda simulirane su vrednosti isticanja za hidrološku godinu 2017-2018 ($r_k = 0,55$), tako da su parametri modela iskorišćeni za popunjavanje vremenske serije isticanja u nedostajućim mesecima tokom 2017. i 2020. godine na osnovu jednačine (6.7):

$$Q_t = -1.58 - 0.1453Ief_{t-1} + 0.0102Ief_{t-2} + 0.1969Ief_{t-3} - 0.333Ief_{t-4} + 0.4456Ief_{t-5} - 0.637Ief_{t-6} - 0.431Ief_{t-7} + 0.459Ief_{t-8} \quad (6.7)$$

Tabela 6.46 prikazuje osnovne statističke parametre vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića, i to za svaku pojedinačnu hidrološku godinu osmatranja, kao i za celokupni period osmatranja 2015 – 2020. godina.

Tabela 6.46. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića za period 2015 – 2020. godine (prema podacima ZHMS Crne Gore). Legenda: **N** – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} – srednja vrednost serije; **Mdn** – medijana; **M** – mod; **Min** – minimalna vrednost serije; **Max** – maksimalna vrednost serije; **VAR** – varijansa serije; σ – standardna devijacija; **Cv** – koeficijent varijacije; **Cs** – koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
m ³ /s										
2015-2016	366	6,20	2,01	1,9035	0,3629	79,32	135,39	11,64	187,69	3,49
2016-2017	365	3,05	0,86	0,105	0,0321	70,19	62,30	7,89	258,60	5,27
2017-2018	365	7,96	0,96	0,41	0,2693	108,0	266,05	16,31	204,86	3,51
2018-2019	365	5,30	1,51	0,428	0,39	95,5	122,50	11,07	208,64	4,63
2019-2020	366	5,63	1,20	0,3629	0,0421	105,00	141,09	11,88	210,82	4,02
2015-2020	1827	5,63	1,34	0,45	0,03	108,00	147,64	12,15	215,79	4,19

Tabela 6.46 pokazuje da je izdašnost karstnog vrela Rijeka Crnojevića u periodu 2015-2020 oscilirala od 0,03 m³/s do 108 m³/s, tako da je srednja vrednost 5,63 m³/s, medijalna 1,34 m³/s, a modalna vrednost 0,45 m³/s. Minimalne vrednosti oscilirale su od 0,0321 do 0,3629 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 70,19 do 108 m³/s. Visoke vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju velike razlike između minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda ovog sistema, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu i jaku asimetriju udesno.

Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini karstnog sistema (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020), tako da vrelo Rijeke Crnojevića pripada klasi *Veoma visoko razvijeni sistemi*, ukoliko se posmatraju pojedinačne hidrološke godine i ceo period, dok samo godina 2015-2016 iskače i spada u nižu klasu *Visoko razvijeni sistemi*, budući da je prag $C_v = 200$ (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020).

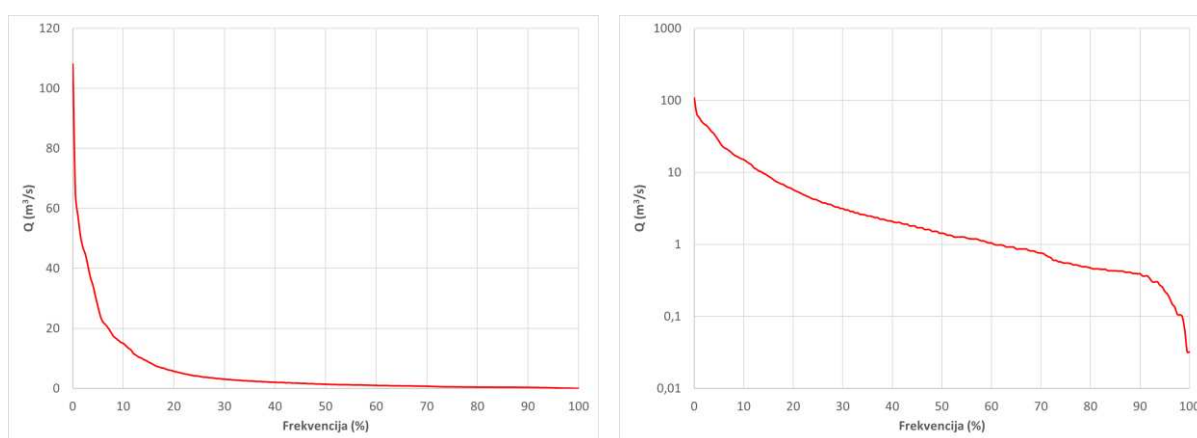
6.6.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

Rezultati analize krive trajanja dati su u tabeli 6.47, kao i grafički na sl. 6.107 preko dijagrama normalne i log-normalne raspodele. Iz tabele 6.47 može se uočiti da vrednost je u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) isticanje na vrelu iznosilo $1,43 \text{ m}^3/\text{s}$, što generalno korespondira sa medijalnom vrednošću, sračunatom u okviru statistike. Analiza sušnih perioda koristi vrednosti $Q_{95} - Q_{100}$, dok su analiza poplavnih perioda podrazumeva veličine $Q_0 - Q_1$. Tako, tabela 6.47 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Rijeka Crnojevića mogu očekivati vrednosti isticanja od $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{99}) do $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{95}). Sa druge strane, poplavni talasi koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose $57,54 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_1) na vrelu. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od $15 \text{ m}^3/\text{s}$ do $57,54 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{10} do Q_1), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{95} do Q_{70}).

Tabela 6.47. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Rijeka Crnojevića na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2020. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m^3/s

Period	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{30}	Q_{40}	Q_{50}	Q_{60}	Q_{70}	Q_{80}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{99}
2015-2020	57,54	27,00	15,00	5,71	3,14	2,08	1,43	1,05	0,76	0,47	0,39	0,22	0,06

Ukupna kriva trajanja protoka Rijeke Crnojevića odlikuje se jako strmim nagibom krive za vrednosti frekvencije od 1 do 10%, što ukazuje na dobro razvijen karstni sistem koji transportuje vodu veoma velikom brzinom u turbulentnom režimu tečenja kroz karstne kanale i pukotine ka zoni isticanja. Suprotno tome, u sušnim periodima godine, dakle sa učestalošću isticanja na nivou $Q_{95} - Q_{99}$, na dijagramu log-normalne raspodele na svim nivoima analize uočava se tačka infleksije, nakon koje isticanje rapidno opada. Ovaj deo dijagrama ukazuje na isticanje podzemnih voda samo kao bazna komponenta hidrograma u ekstremnim malovodnim uslovima, kada se isticanje formira kroz matičnu poroznost krečnjaka i dolomita ili kroz manje karstne kanale sa slabim hidrostatičkim pritiskom.



Sl. 6.107. Krive trajanja protoka vrela Rijeka Crnojevića za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) pokazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Rijeke Crnojevića iznosi 3,65, ukazujući na relativno stabilan odnos

srednjih i malih isticanja ovog vrela. Sa druge strane, odnos Q_{90} / Q_{50} ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema Rijeka Crnojevića, ovaj odnos je 0,273, što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela 27,3% vode dolazi na račun baznog oticaja. Ova vrednost je relativno niska i pretpostavka je da se ne može razmatrati kao udeo baznog oticaja u ukupnom hidrogramu Rijeke Crnojevića.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al., 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Rijeka Crnojevića iznosi 38,46, što ovo vrelo svrstava u klasu vrela sa Veoma nestabilnim isticanjem karstnih podzemnih voda. Ukoliko bi se kao odnos minimalnih i maksimalnih vrednost iskoristio odnos ekstremnih isticanja, što je definicija koeficijenta hidrodinamičke neravnomernosti, on bi iznosio 3 600, što je 94 puta više od realnog odnosa.

6.6.7.4 Recesionna analiza izdašnosti vrela

Period isticanja bez aktivnog prihranjivanja sistema je izdvojen na osnovu komparativne analize hidrograma vrela Rijeka Crnojevića i dijagrama efektivnih padavina, datih na sl. 6.106, gde se jasno uočavaju duži vremenski periodi tokom letnjih meseci bez efektivne infiltracije. Dijagram na sl. 6.106 koji sadrži i izmerene bruto padavine, pokazuje da su tokom recesionog perioda kiše ipak registrovane na stanici Cetinje, međutim nisu se infiltrirale u sistem, već su najverovatnije potrošene na deficit zemljišne vlage, koji je i najveći u letnjem periodu. Stoga, može se konstatovati da je za karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića ispunjen teorijski uslov o odsustvu aktivnog prihranjivanja tokom odabranog recesionog perioda.

Tabela 6.48 prikazuje rezultate analize recesionih krivih vrela Rijeka Crnojevića za period oktobar 2015 – septembar 2020. godine.

Tabela 6.48. Rezultati recesione analize karstnog vrela Rijeka Crnojevića za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2020. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

Godina	Recesioni period	Koeficijent recesije	$V_0 \times 10^6$ (m ³)		$V^* \times 10^6$ (m ³)	$V_{total} \times 10^6$ (m ³)	t (dani)	
2015-2016	17.7. - 1.9.2016	1 α_1	0,1680	V_1	0,38	5,35	3,65	4
		2 α_2	0,0367	V_2	1,06			14
		3 α_3	0,007	V_3	7,56			29
				ΣV_0	9,0			$\Sigma = 47$
2016-2017	1.6. - 12.8.2017	1 α_1	0,281	V_1	0,11	0,47	1,86	3
		2 α_2	0,0106	V_2	1,05			28
		3 α_3	0,0118	V_3	1,17			42
				ΣV_0	2,34			$\Sigma = 73$
2017-2018	11.6. - 30.9.2018	1 α_1	0,119	V_1	0,3	16,74	5,43	4
		2 α_2	0,0355	V_2	0,63			22
		3 α_3	0,0021	V_3	21,2			90
				ΣV_0	22,2			$\Sigma = 116$
2018-2019	29.7. - 8.9.2019	1 α_1	0,3837	V_1	1,66	7,74	4,35	6
		2 α_2	0,0375	V_2	1,38			12
		3 α_3	0,0048	V_3	9,04			24
				ΣV_0	12,1			$\Sigma = 42$
2019-2020	13.6. - 4.8.2020	1 α_1	0,191	V_1	0,16	4,78	6,56	2
		2 α_2	0,0075	V_2	4,59			16
		3 α_3	0,0065	V_3	6,59			35
				ΣV_0	11,3			$\Sigma = 53$

Posmatrajući celokupni period osmatranja od 2015. do 2020. godine, može se zaključiti da se karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića može aproksimirati sa tri mikrorežima pražnjenja tokom perioda recesije, što je odlika dobro karstifikovanog i hijerarhijski dobro strukturiranog sistema. Prvi mikrorežimi pražnjenja najčešće se ne pokoravaju Majeovoj eksponencijalnoj jednačini, budući da se dešavaju u turbulentnom režimu tečenja, te je korektnije definisati ih kao β režim. Na to ukazuje i red veličine prvih koeficijenta recesije od 10^{-1} u svim recesionim perioda, koji osciliraju od 0,119 do 0,3837. Sa druge strane, laminarni režim cirkulacije najverovatnije se dešava samo tokom trećih mikrorežima pražnjenja. Koeficijenti recesije poslednjih mikrorežima pražnjenja su reda veličine 10^{-3} , oscilirajući u dijapazonu od 0,0021 do 0,0118. Zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2020. godine varira od 1,86 m³ do 6,56 m³, tako da prosečna zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom periodu 2015 – 2020. godine iznosi $4,37 \times 10^6$ m³. Isti red veličina koeficijenata recesije, tj. slične rezultate recesione analize navode i Živaljević (1992) i Radulović M. (1996), koji takođe ističu superpoziciju više mikrorežima pražnjenja koji utiču na složeni režim cirkulacije podzemnih voda ovog karstnog sistema.

6.6.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

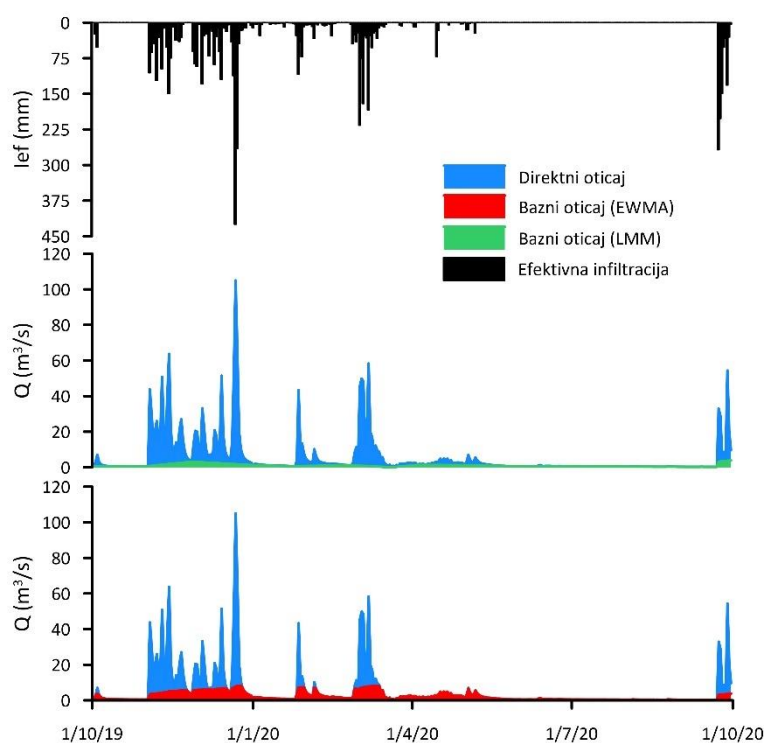
Primena LMM metode uključila je parametar f od 0,9, i parametar N koji u slučaju vrela Rijeka Crnojevića iznosi $N=7$. Primenom ove metode, proračunate su dnevne vrednosti baznog oticaja za period 2015 – 2020. godina, kao i vrednosti indeksa baznog oticaja u vidu relacije Q_{bazno} / Q_{ukupno} . Analizom je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Rijeka Crnojevića 5,13 m³/s, minimalna 0,03 m³/s, a srednja vrednost 1,08 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,619 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema Rijeka Crnojevića prosečno čini 61,9% ukupnog oticaja ovog sistema, prema LMM metodi.

Primena EWMA filtera uključila je srednju vrednost koeficijenata recesije trećih mikrorežima pražnjenja karstnog sistema Rijeka Crnojevića za period 2015-2020. godine, koji su dati u tabeli 6.48, budući da je ocenjeno da se treći mikrorežimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena vrednosti koeficijenata recesije trećih mikrorežima iznosi $\alpha_{3av} = 0,00644$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema Rijeka Crnojevića 12,47 m³/s, minimalna 0,01 m³/s, a srednja vrednost 2,284 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, te je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,851, što bi značilo da bazni oticaj ovog karstnog sistema prosečno čini 85,1% ukupnog oticaja ovog sistema, prema EWMA filteru.

Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Rijeke Crnojevića dati su na sl. 6.108, i to za hidrološku 2019-2020, budući da je tada pala prosečna godišnja suma kiše od 3026,7 mm.

Ukoliko se uporede vrednosti indeksa baznog oticaja za karstni sistem Rijeke Crnojevića, odmah je uočljiva značajna razlika pri primeni ova dva filtera. Imajući u vidu lokalne hidrogeološke karakteristike slivnog područja vrela Rijeka Crnojevića, odnosno visoke razlike ekstremnih vrednosti isticanja podzemnih voda, kao reprezentativniji kriterijum je usvojeno razdvajanje hidrograma na osnovu metode lokalnog minimuma, kao i na primeru karstnog sistema Oko Bijele. Pretpostavka je da direktni oticaj ima glavnu funkciju pri formiranju hidrograma vrela. Stoga, usvojen je rezultat metode lokalnog minimuma koji pokazuje da oko 62% izdašnosti vrela Rijeke Crnojevića čini bazni oticaj, dok 38% je prouzrokovano efektivnom infiltracijom. Naravno, ovaj procenat nije uvek isti tokom hidrološke godine, već se značajno menja nailaskom poplavnog talasa, kada su pikovi na hidrogramu isključivo formirani na račun

kišne epizode. Sa druge strane, u recesionom periodu, kada prihranjivanje izostaje, bazni oticaj je praktično jedina komponenta hidrograma koja se javlja na vrelu.



Sl. 6.108. Usporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema Rijeke Crnojevića za 2019-2020

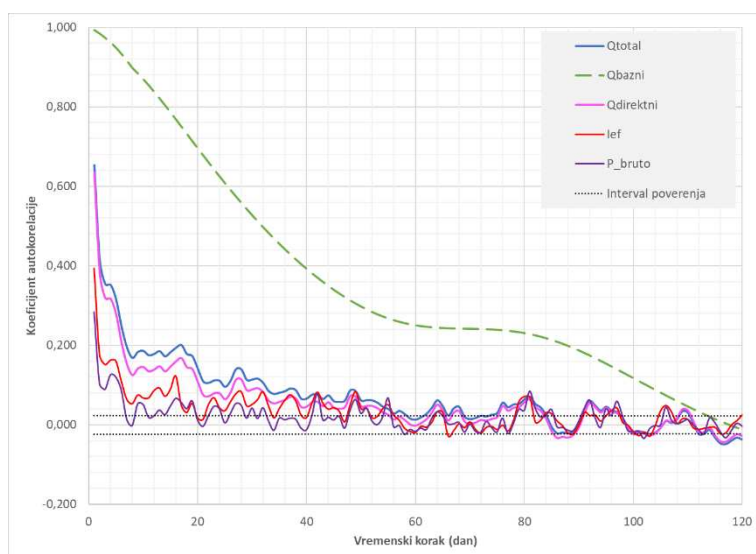
6.6.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza vremenskih serija je izvršena je za celokupni period osmatranja (2015 – 2020), kao i zasebno za sušnu (2018-2019) i vlažnu (2017-2018) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 120 dana za ukupni period, odnosno 100 dana za sušni i vlažnu godinu. Treba napomenuti da je za sušnu godinu određena hidrološka 2018-2019, a ne 2016-2017 godina koja sadrži manju godišnju sumu padavina (Tabela 6.45). Razlog je taj što ova godina sadrži prekid u vremenskoj seriji isticanja podzemnih voda na vrelu tokom letnjeg perioda, koji su popunjeni kros-regresionim modelom, tako da je zbog pouzdanosti podataka odabrana prva sledeća godina prema vrednosti godišnje sume padavina.

Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj karstnog vrela Rijeka Crnojevića, kao i za bruto izmerene padavine na stanici Cetinje i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazan je na sl. 6.109. Autokorelogram baznog oticaja ima veoma blagi nagib, ukazujući na visoku memoriju ove vremenske serije, na šta ukazuju i niske vrednosti izdašnosti vrela tokom recesionog i malovodnog perioda. Koeficijenti autokorelacije baznog oticaja gube statističku značajnost nakon 87 dana, za $r_k < 0,2$, odnosno 114 dana ukoliko se posmatraju statistički intervali poverenja na bazi 95% verovatnoće.

Konveksni deo autokorelograma koji počinje 62. dana može ukazivati na hijerarhiju dominantnih karstnih kanala i matične poroznosti u sistemu, tako da matične stene postaje dominantan nakon 62. dana transportujući vodu do vrela, što se pokazuje strmijim nagibom krive. Ukoliko se uporedi autokorelogram direktnog i ukupnog oticaja, može se uočiti potpuna sinhronizovanost dijagrama, što navodi na zaključak o dominaciji direktne komponente hidrograma u formiranju ukupnog oticaja vrela. Jasno se uočava da svaki pik na

autokorelogramu direktnog oticaja se automatski reflektuje na hidrogramu ukupnog oticaja. Sve to dodatno potvrđuje postupak razdvajanja hidrograma i odabir metode razdvajanja.



Sl. 6.109. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Rijeka Crnojevića, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2020. god.

Ukoliko se posmatra memorija sistema na bazi koeficijenata autokorelacije direktnog oticaja vrela Rijeka Crnojevića, može se zaključiti da koeficijenti posle 6 dana postaju statistički beznačajni ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 56 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja. Period od 6 dana ukazuje na odziv hidrograma na prvi impuls efektivnih infiltracija, dok period od 56 dana uključuje i ostale reakcije direktnog oticaja na nadolazeće impulse efektivne infiltracije što je uočljivo na autokorelogramu brojnim pikovima između 8. i 56. dana. Strmi nagib autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja (od 1. do 6. dana) ukazuje na brzu propagaciju novoinfiltrirane vode, tj. na brzo pražnjenje karstnog sistema kroz dominantne karstne kanale.

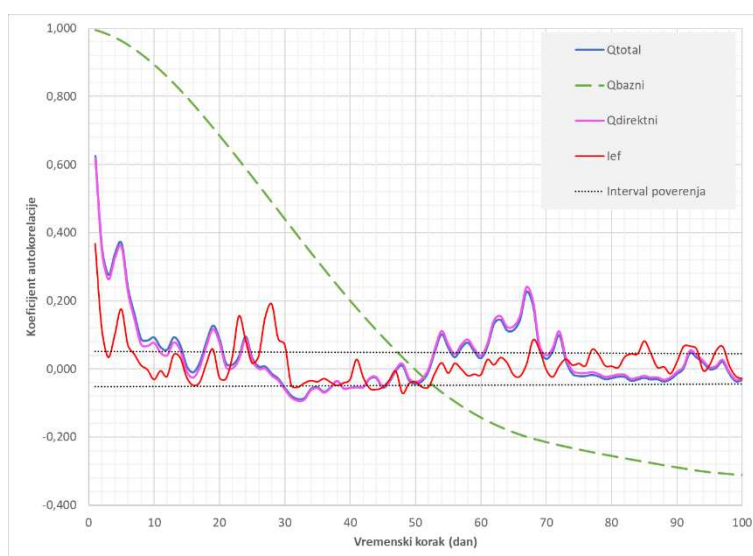
Statistička značajnost ukupnog oticaja vrela Rijeka Crnojevića prestaje nakon 6 dana ($r_k < 0,2$), odnosno nakon 59 dana ako se posmatraju intervali poverenja. Može se uočiti da autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja nekoliko puta izlaze van intervala poverenja u vidu pikova, i to svaki put kao reakcija na pik efektivne infiltracije, što se dešava praktično momentalno. Pored toga, uočljiv je i kolenasti izgled autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja koji se javlja 3. dana, što može ukazivati na aktiviranje karstnih kanala na različitim hipsometrijskim visinama. Naime, moguće je da se deo autokorelograma direktnog i ukupnog oticaja do 3. dana odnosi na karstni kanal koji predstavlja zapravo Obodsku pećinu, kroz koju ističu vode samo pri maksimalnim vrednostima isticanja, da bi nakon tog perioda isticanje podzemnih voda bilo omogućeno kroz karstni kanal koji predstavlja glavni i konstantni dren sistema. Ukoliko se sve pomenuto uporedi sa sličnom interpretacijom autokorelograma baznog oticaja, vrlo je verovatno da se zapravo radi o spregnutoj funkciji tri karstna kanala na različitim hipsometrijskim visinama, od kojih najviši kanal predstavlja Obodsku pećinu i reaguje do 3. dana, drugi središnji kanal je glavni dren sistema i reaguje od 3. do 62. dana, nakon čega treći najniži karstni kanal prazni sistem u recesionom periodu u vidu baznog oticaja.

Autokorelogram efektivne infiltracije ima veoma kratku memoriju sistema, što je generalno karakteristika ulaznog signala koji se formira na račun kiše. Statistička značajnost ove vremenske serije prestaje nakon 1 dana ($r_k < 0,2$), dok su приметni brojni pikovi koji izlaze izvan intervala poverenja što ukazuje na slučajni karakter promenljive. Takođe, uočljivo je već pomenuta sinhronizovanost pikova efektivne infiltracije i direktnog i ukupnog oticaja, što

govori o direktnom uticaju kiša sa Cetinja na hidrogram vrela, odnosno na dominaciju autogenog vida prihranjivanja vrela Rijeka Crnojevića.

Sl. 6.110 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Rijeka Crnojevića, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2018 – 2019, koja je ocenjena kao sušna godina. Autokorelogram komponenti hidrograma za sušnu godinu još uočljivije pokazuje zavisnost ukupnog i direktnog oticaja od efektivne infiltracije, sa jasnim poklapanjem pikova ulaznih signala sa izlaznim 5, 14, 23, 54, 62. i 67. dana.

Na sl. 6.110 može se uočiti da su autokorelogrami ukupnog i direktnog oticaja tokom sušne godine potpuno sinhronizovani, i da imaju veoma strm nagib tokom prvih 3 dana, da bi nakon pada koeficijenta došlo do ponovnog skoka koeficijenta, što potvrđuje hipotezu o trodnevnoj funkciji najvišeg kanala Obodske pećine, nakon čega se sistem drenira preko glavnog kanala. Koeficijenti autokorelacije direktnog i ukupnog oticaja postaju statistički beznačajni posle 7 dana ($r_k < 0,2$), odnosno posle 12 dana ukoliko se posmatraju intervali poverenja. Takođe, uočava se slučajni karakter efektivne infiltracije, ali sa vrlo jasnim uticajem na direktni i ukupni oticaj, što se vidi na perfektnom poklapanju pikova zavisnih i nezavisnih promenljivih. Sa druge strane, autokorelogram baznog oticaja ima blagi nagib, a koeficijenti autokorelacije su statistički značajni do 40. dana ($r_k < 0,2$), odnosno 46. dana. Primetno je da kod autokorelograma baznog oticaja u sušnoj godini nema konveksnog dela nakon koga kriva dobija strmiji oblik, kao što je slučaj kod razmatranja celokupnog perioda. To bi se moglo objasniti manjom količinom vode koja je u sistemu tokom sušne godine, tako da se bazni oticaj transportuje samo kroz najniži kanal.

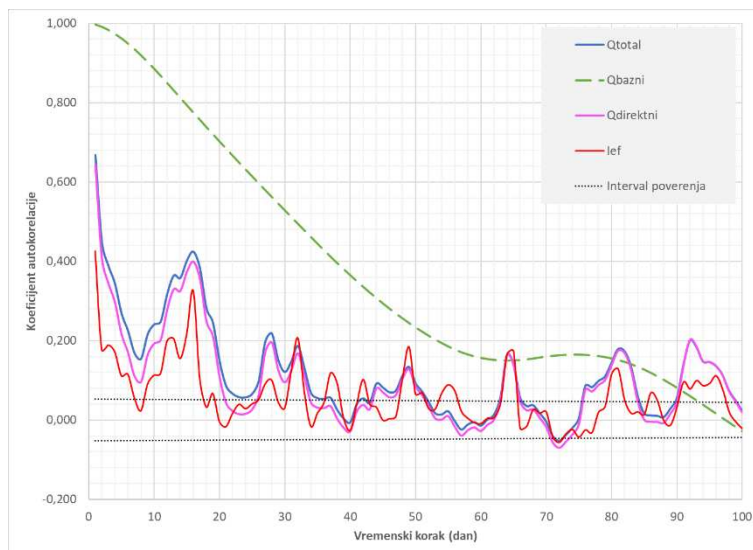


Sl. 6.110. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Rijeka Crnojevića i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2018 – 2019)

Sl. 6.111 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Rijeka Crnojevića, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku 2017 – 2018, koja je ocenjena kao vlažna godina.

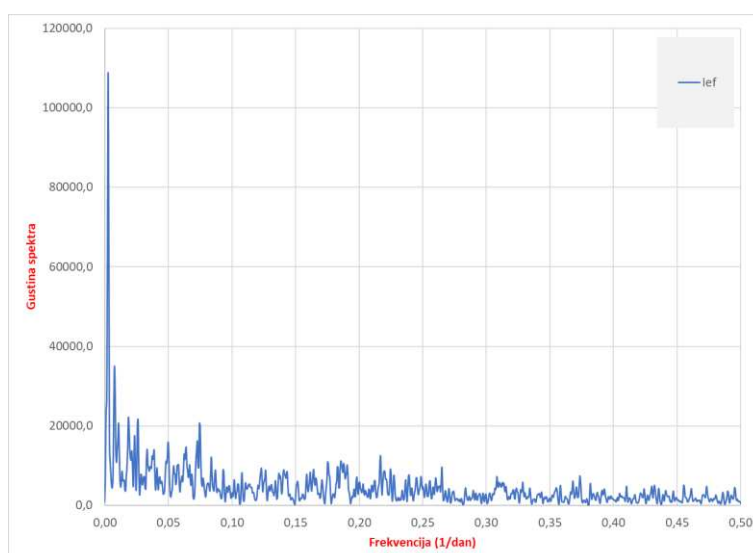
Autokorelogrami direktnog i ukupnog oticaja tokom vlažne godine ponovo imaju identičan nagib i trend, kao i reakciju na efektivnu infiltraciju. Dijagrami direktnog i ukupnog oticaja pokazuju veoma strm nagib tokom dva dana što bi odgovaralo isticanju kroz najviši karstni kanal (Obodska pećina), da bi nakon toga do 7. dana ($r_k < 0,2$) voda isticala kroz glavni kanal. Posle pomenutog perioda, jasno se uočava dolazak novog talasa efektivne infiltracije na koji automatski reaguje direktni i ukupni oticaj, povećanjem koeficijenta autokorelacije do 16. dana, odnosno tačkom infleksije 18. dana što je ponovo period reakcije najvišeg kanala od 2 dana.

Ukoliko se posmatraju intervali poverenja, direktni i ukupni oticaj gube statističku značajnost posle 37 dana, mada se vrlo brzo vraćaju u interval poverenja reagujući na impulse efektivne infiltracije. Autokorelogram baznog oticaja ponovo ima blagi nagib, sa statističkom značajnošću od 53 dana ($r_k < 0,2$), tj. 93 dana. Kao što je bio slučaj sa celim periodom razmatranja, i ovde do 62. dana voda ističe kroz glavni kanal, da bi nakon tog dana došlo do spuštavanja nivoa podzemnih voda do trećeg, najnižeg kanala kroz koji voda ističe do gubitka statističke značajnosti, a na šta ukazuje konveksni deo autokorelograma baznog oticaja.



Sl. 6.111. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog vrela Rijeka Crnojevića i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2017 – 2018)

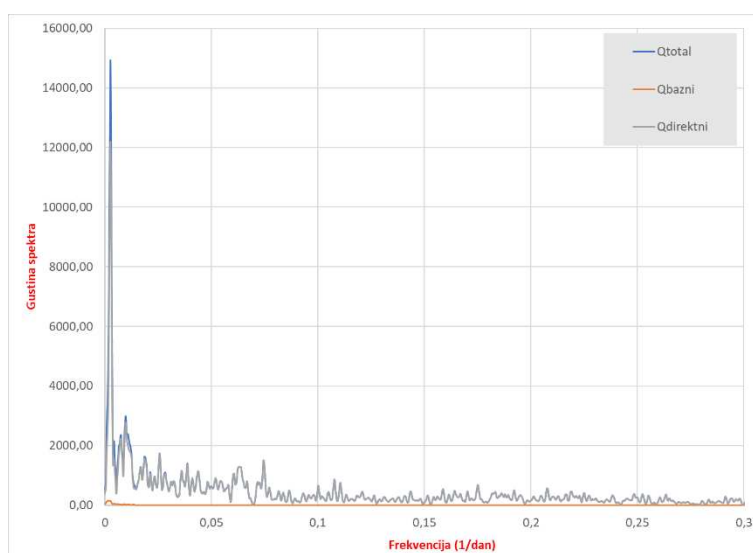
Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Rijeke Crnojevića prikazana je na sl. 6.112, sa koje se vidi da je izgled funkcije atipičan za ulaznu komponentu, imajući u vidu visoke oscilacije funkcije pri niskim frekvencijama, što ukazuje na relativno dobru autokorelisanost ulaznog signala. Takođe, uočljiv je i veoma visok spektralni opseg efektivne infiltracije što je posledica jako velike godišnje sume padavina na prostoru Cetinja, odnosno visokih vrednosti efektivne infiltracije. Dijagram spektralne gustine (Sl. 6.112) pokazuje 5 najfrekventnijih pikova: 0.001643, 0.002738, 0.007667, 0.010953 i 0.018620 dan^{-1} , koji odgovaraju vremenskim periodima od 608 dana, 365 dana, 130 dana, 91 dana i 53 dana. Drugim rečima, prvi pik 0.001643 koji odgovara vremenskom periodu od 608 dana pokazuje 18-mesečnu cikličnost efektivne infiltracije. Drugi (0.002738) odgovara periodu od 365 dana (godišnji ciklus), dok treći pik (0.007667) odgovara kvartalnom ciklusu. Četvrti pik (0.010953) odgovara tromesečnom ciklusu, dok peti pik (0.018620) odgovara periodu od 53 ukazujući na dvomesečni ciklus. Frekvencije iznad od 0.1 dan^{-1} predstavljaju slučajni karakter efektivne infiltracije karstnog sistema Rijeke Crnojevića.



Sl. 6.112. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema Rijeka Crnojevića za period 2015 – 2020

Spektralna funkcija gustine primjenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu metode lokalnog minimuma za ceo period osmatranja (2015 – 2020), a prikazana je na sl. 6.113. Sa dijagrama 6.113 odmah je uočljivo potpuno poklapanje spektralnih frekvencija ukupnog i direktnog oticaja, koje osciliraju u niskom, srednjem i visokom frekventnom opsegu, dok spektar baznog oticaja oscilira samo pri izuzetno niskim frekvencijama. Pomenuto direktno ukazuje na zavisnost formiranja hidrograma vrela od direktne, brze komponente hidrograma, dok je značaj baznog oticaja minoran. Spektar direktnog i ukupnog oticaja javlja se u frekventnom opsegu ispod 0.3 dan^{-1} , sa karakterističnim pikovima za ukupni oticaj od 0.001643, 0.002738, 0.004381, 0.009858 i 0.010953 za odgovarajuće periode od 608, 365, 228, 101 i 91 dana. Ove vrednosti i periodi ukazuju na 18-mesečni, godišnji, polugodišnji i tromesečni ciklus ukupnog oticaja. Identični pikovi u istom frekventnom opsegu se javljaju i za direktnu komponentu hidrograma, uz odsustvo polugodišnjeg a prisustvo kvartalnog ciklusa. Ukoliko se cikličnost ukupnog i direktnog oticaja uporedi sa cikličnošću efektivne infiltracije, potpuno je jasan uticaj ulaznog signala na izlazni u vidu direktnog i ukupnog oticaja. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine baznog oticaja pokazuje dosta niže frekvencije (0.000548, 0.001095, 0.001643, 0.002738 i 0.004381) koje odgovaraju broju dana od 1826, 913, 608, 365 i 228. Dakle, može se zaključiti da je reč o petogodišnjem, dvoipogodišnjem, jednoipogodišnjem godišnjem i polugodišnjem ciklusu baznog oticaja, što ukazuje na veoma sporo obnavljanje rezervi podzemnih voda sistema Rijeke Crnojevića, koji svoje dreniranja zasniva najvećim delom na račun direktnog oticaja.

Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od 0.029 dan^{-1} , spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi statistički značaj, što odgovara broju dana od 35, dok statistička značajnost direktnog i ukupnog oticaja prestaje nakon frekventnog opsega od 0.5 dan^{-1} , što odgovara periodu od 2 dana. Statistička značajnost od 35 dana za bazni oticaj se generalno slaže sa memorijom sistema u sušnoj godini, dok se statistička značajnost od 2 dana za direktni i ukupni oticaj u potpunosti korespondira sa autokorelacionom funkcijom ove dve promenljive, na osnovu čega se može zaključiti da direktni oticaj ima dominantan uticaj u spektralnom opsegu ukupnog oticaja vrela Rijeka Crnojevića.

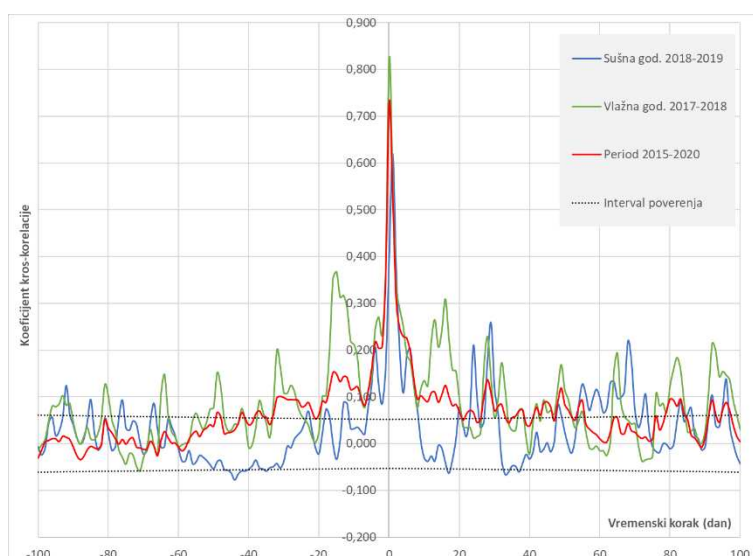


Sl. 6.113. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema Rijeka Crnojevića u periodu 2015 – 2020 godina

Kros-korelogram efektivne infiltracije sa isticanjem vrela Rijeka Crnojevića tokom sušne (2018-2019) i vlažne (2017-2018) godine, kao i tokom celokupnog perioda osmatranja (2015-2020) prikazan je na sl. 6.114 i pokazuje zanimljive rezultate u pogledu centriranosti, odnosno pozitivnoj asimetriji funkcije u zavisnosti od hidrološke godine, tj. stanja rezervi u sistemu.

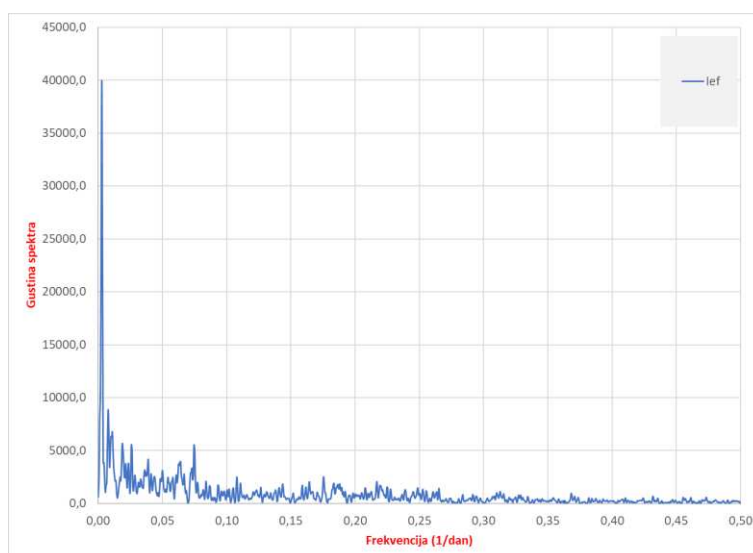
Kros-korelogram za sušnu hidrološku godinu pokazuje pozitivnu asimetriju dijagrama, gde se maksimalne vrednosti koeficijenta kros-korelacije dostižu sa jednim danom zakašnjenja. To se može objasniti malim rezervoarom sistema, koji ipak ima određenu mogućnost akumulacije voda, tako da se novoinfiltrirana voda u sušnoj godini prvo potroši na popunjavanje rezervi, da bi kada se sistem napuni dovoljno, krenula reakcija vrela sa danom zakašnjenja. Ipak, jednodnevno punjenje sistema tokom sušne godine ukazuje na male dimenzije rezervoara sistema, koji ima slabe retencione mogućnosti. Sa druge strane, centriranost kros-korelograma u vlažnoj godini, kao i u ukupnom periodu osmatranja ukazuje na instantnu reakciju sistema, koji je taman toliko napunjen u vlažnoj godini da reakcija vrela se dešava momentalno sa nailaskom novog talasa efektivne infiltracije. Slične rezultate i zaključke o malom rezervoaru sistema Rijeke Crnojevića navodi i Živaljević (1992), analizirajući kros-korelacionom funkcijom bruto padavine i isticanje na časovnom nivou.

Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0,2 (Mangin, 1984; Ristić Vakanjac, 2015), statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 3 dana, u vlažnoj godini nakon 5 dana, dok tokom celog perioda značajnost prestaje nakon 6 dana, što ukazuje na vreme reakcije slivnog područja na intenzivnu kišnu epizodu. Nagib kros-korelograma je veoma strm, što ukazuje na dominantne karstne kanale kojima podzemna voda veoma brzo cirkuliše. Takođe, uočljivi su i pikovi koji se javljaju kao reakcija sistema na nove impulse efektivne infiltracije, što dodatno ukazuje na perfektnu uzročno-posledičnu vezu ulaza i izlaza ovog sistema.



Sl. 6.114. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja karstnog vrela Rijeke Crnojevića za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2020

Kros-amplitudna funkcija vrela Rijeka Crnojevića (Sl. 6.115) pokazuje stepen filtriranja impulsnog signala, što se na dijagramu može videti u zoni visokih frekvencija.



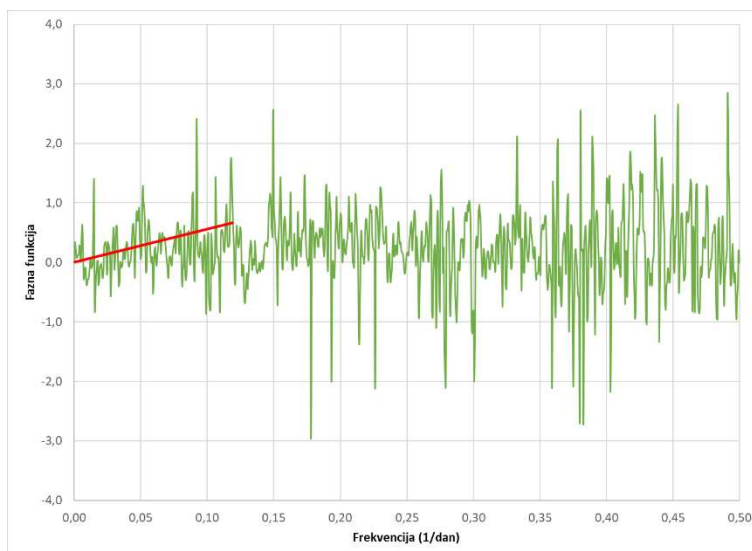
Sl. 6.115. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Rijeke Crnojevića za period 2015 – 2020. godina

Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti tek za frekvencije više od $0,5 \text{ dan}^{-1}$ (2 dana), što govori o periodu potrebnom za prigušenje signala, odnosno na dominantan uticaj direktne komponente hidrograma. Navedeni period potreban za prigušenje signala, kao i veoma visok spektralni opseg nedvosmisleno ukazuje na postojanje i veliki značaj direktne komponente hidrograma na formiranje isticanja karstnog vrela Rijeke Crnojevića, kao i na slabu retencionu moć ovog karstnog sistema, što je još jedna potvrda pretpostavke o relativnom malom rezervoaru sistema.

Pikovi koji se javljaju u visokofrekventnom opsegu ($f > 0,1$) odgovaraju uticaju direktne komponente hidrograma, a to su u slučaju Rijeke Crnojevića vrednosti 0.110624, 0.175246 koje odgovaraju periodu od 9 i 6 dana, respektivno, što se slaže i sa vrednostima dobijenim autokorelacionom funkcijom. Sa druge strane, visoke oscilacije pikova u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, gde se mogu uočiti pikovi od 0.002738, 0.007667

i 0.025739 koje odgovaraju periodima od 365 (godišnji ciklus), 130 dana (kvartalni ciklus) i 38 dana (mesečni ciklus).

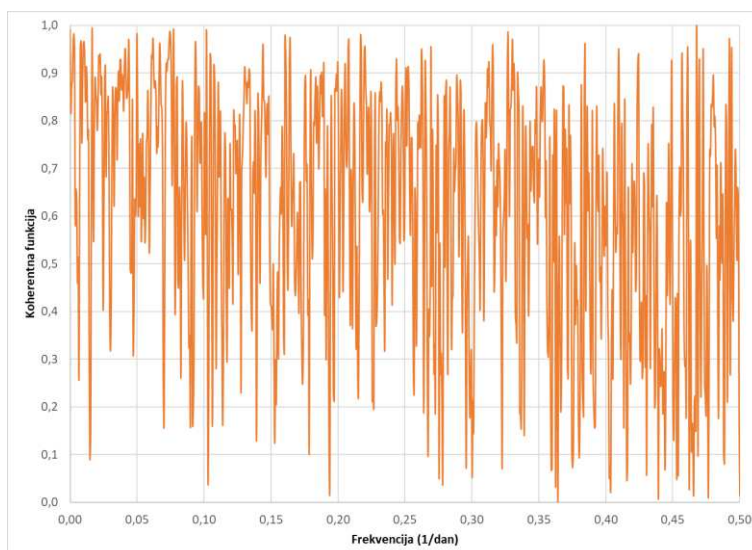
Fazna funkcija isticanja prikazana je na sl. 6. 116, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri frekvencijama iznad $f = 0.12 \text{ dan}^{-1}$, dok se pozitivan linearni trend javlja pri frekvencijama od 0 do 0.119387, što odgovara periodu od 8.37 dana. Ovaj broj dana pokazuje vreme reakcije vrela na ulazni impuls, što je skoro identičan broj dana dobijem u okviru kros-korelacione i kros-amplitudne analize.



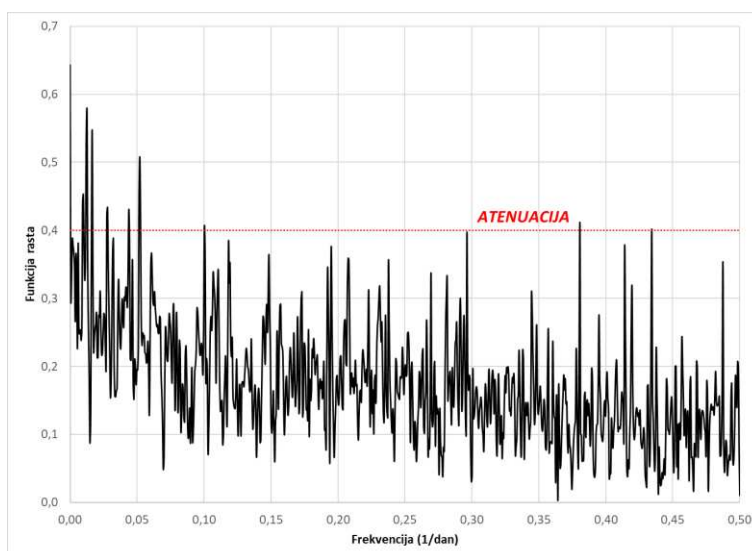
Sl. 6.116. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda sistema Rijeke Crnojevića za period 2015-2020

Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića prikazana je na sl. 6.117, sa koje se vidi da vrednosti koherentne funkcije osciliraju u širokom frekventnom dijapazonu, ukazujući na nelinearni karakter sistema. Srednja vrednost koherentne funkcije je 0.61 te se može izvući zaključak o izvesnom uticaju baznog oticaja pri formiranju isticanja karstnog vrela. Kao i u slučaju vrela Oko Bijele, i ovde srednja koherentna vrednost korespondira sa indeksom baznog oticaja od 0,619 dobijenog primenom metode lokalnog minimuma. Sa dijagrama koherentne funkcije se može uočiti i značajan pad vrednosti pri frekvenciji od $0,152245 \text{ dan}^{-1}$ (tj. 6.57 dana), što odgovara vremenu uticaja direktnog oticaja na ukupni sistem. Ova vrednost je takođe saglasna sa rezultatima prethodnih analiza. Koherentna funkcija je takođe potvrdila niske retencione mogućnosti karstnog sistema Rijeke Crnojevića, kao i njegovu značajnu karstifikovanost i razvoj krupnih, dominantnih kanala koji sprovode vodu veoma brzo od zone prihranjivanja do vrela.

Sl. 6.118 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića, pokazujući da su sve vrednosti funkcije ispod 1, što bi ukazivalo na izvesnu mogućnost prigušenja ulaznog signala. Međutim, može se primetiti da je funkcija rasta prilično nesortirana i nefiltrirana u visokofrekventnom opsegu, što ukazuje ipak na činjenicu da je reč o dominantnom direktnom oticaju vrela. Takođe, dijagram pokazuje vrednosti funkcije rasta iznad 0.4, što je prag koji definiše uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, tako da se može videti da se poslednji pik iznad 0.4 javlja pri frekvenciji od 0.434283 što odgovara periodu od 2.3 dana. Ovaj broj dan u potpunosti korespondira sa rezultatima univarijantne i bivarijantne analize vremenskih serija vrela, koji potvrđuju dominantnu ulogu direktne komponente hidrograma na ukupni oticaj podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića, kao i iznete pretpostavke o relativno slabim akumulacionim sposobnostima sistema.



Sl. 6.117. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića za period 2015-2020



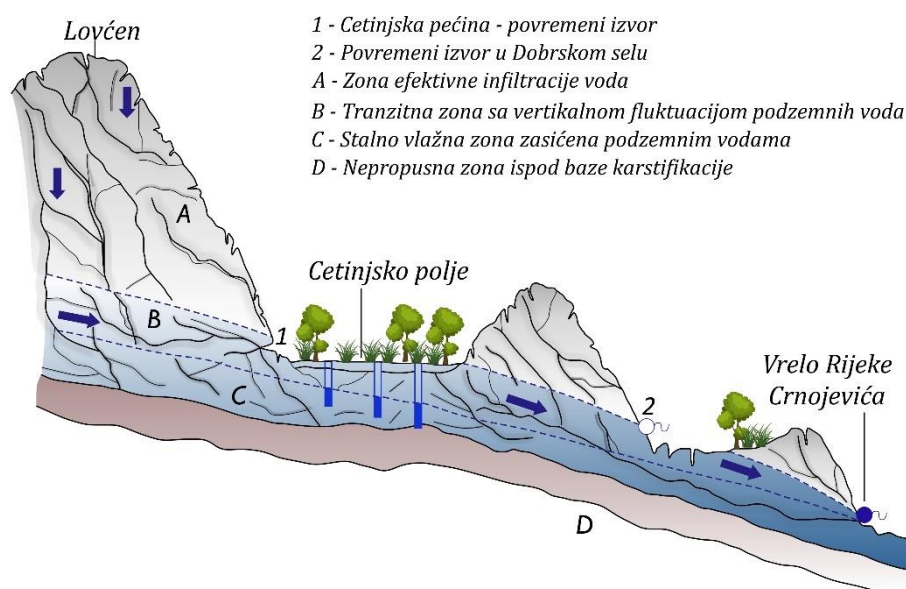
Sl. 6.118. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića za period 2015-2020

Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se uočiti da je karstni sistem vrlo Rijeke Crnojevića dobro karstifikovan i strukturiran, da hijerarhijski pozicioniranim karstnim kanalima. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 4500,8 mm na područjima sa vegetacijom, do 8780,4 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2020 godina iznosi 5747,6 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2020 iznosi 771,3 mm, dok stvarna evapotranspiracija oscilira od 432,9 mm do 643,8 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 8,5% na području sa vegetacijom, tj. 8,9% na prostoru bez nje. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,28, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 8,8%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 91,2% (91,1% na prostoru bez vegetacije, tj. 91,5% na prostoru sa vegetacijom). Treba još jednom istaći da je ova vrednost efektivne infiltracije verovatno uvećana, i da je realna vrednost niža za 10-15%.

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ do $108 \text{ m}^3/\text{s}$, sa medijalnom vrednošću od $1,34 \text{ m}^3/\text{s}$. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose $57,54 \text{ m}^3/\text{s}$, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q_{99}) ističe u iznosu od $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti tri mikrorežima pražnjenja, od kojih se prvi najčešće dešava u turbulentnom (β) režimu, dok se ostali mikrorežimi javljaju u laminarnom (α) režimu. Prosečna zapremina istekle vode iznosi $1,86 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema LMM metodi iznosi $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 61,9% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Korelacione i (kros)spektralne funkcije omogućile su izvođenje generalnih zaključaka o funkcionisanju karstnog sistema Rijeka Crnojevića. Naime, analizom autokorelograma ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Rijeke Crnojevića može se pretpostaviti veoma dobra strukturiranost karstnog sistema i razvijenost karstnih kanala na različitim hipsometrijskim visinama, koji dreniraju sistem u različitim hidrološkim stanjima. Analizom izgleda autokorelograma može se pretpostaviti da hidraulički mehanizam isticanja ovog vrela podrazumeva cirkulaciju vode kroz tri karstna kanala na različitim visinama, tako da najviši kanal predstavlja dren kroz koji podzemna voda ističe samo pri veoma visokim nivoima u sistemu, tj. pri nailasku poplavnog talasa kada ističu i maksimumi na vrelu. Tada se voda javlja kroz kanal koji se završava Obodskom pećinom, a isticanje kroz njega obično traje 3 – 7 dana, u zavisnosti od hidroloških uslova. Spuštanjem nivoa podzemnih voda u sistemu, isticanje se obavlja kroz srednji kanal, kroz koji se najveći deo voda drenira, tj. tokom najvećeg dela godine. Ovaj kanal je verovatno spojen sa višim kanalom u unutrašnjosti sistema, pa funkcionišu po principu spojenih sudova. Autokorelaciona funkcija je pokazala da podzemna voda ističe dominantno kroz srednji kanal oko 60 dana u ukupnom periodu osmatranja. U recesionim uslovima, kada na vrelu ističe bazni oticaj, tj. podzemna voda akumulirana u prethodnom periodu, dreniranje se vrši kroz najniži, donji kanal (kao i matriks stene), u kome se najslabiji hidrostatički pritisak i najmanji gradijent, te se stoga dreniranje vrši u malim količinama. I ovaj kanal je verovatno povezan sa srednjim, glavnim kanalom, tako da se zapravo radi o spregnutoj funkciji karstnih kanala koji dreniraju karstni sistem. Isticanje kroz najniži kanal se odvija sve do nailaska nove kišne epizode, kada efektivna infiltracija izaziva reakciju na vrelu. Simultano sa isticanjem podzemnih voda na vrelu Rijeke Crnojevića, prilikom podizanja nivoa podzemnih voda vrši se dreniranje i na višim kotama – Lipskoj i Cetinjskoj pećini, izvorima u Dobrskom selu i Cetinjskom polju, a pri ekstremnim vodama, isticanje se vrši i u Miloševoj pećini u podnožju Lovćena. Grafička interpretacija mehanizma funkcionisanja karstnog sistema Rijeke Crnojevića data je na konceptualnom modelu sistema (Sl. 6.119).

Brzina reakcije sistema na novoinfiltriranu vodu je veoma brza – svega 1 dan je dovoljan u sušnoj godini da se sistem dovoljno napuni kako bi se izazvalo povećanje izdašnosti na vrelu. Sa druge strane, tokom vlažne godine, kao i za ceo period osmatranja, reakcija sistema je instantna, tj. kašnjenje je 0 dana i zapravo se meri u satima. Razlog za to je nešto slabija akumulativna moć sistema, velika količina vode koja se izluči na prostoru Cetinja, kao i dobra karstifikovanost i poroznosti krečnjaka i dolomita, tako da sve to omogućava brzu propagaciju podzemnih voda i transport do vrela.



Sl. 6.143. Konceptualni model karstnog sistema vrele Rijeke Crnojevića (prema Raduloviću M. 1996, 2000, modifikovano)

Kritična vrednost izdašnosti iznad koje se cirkulacija podzemnih voda dešava u turbulentnom režimu ocenjena je na osnovu izdašnosti vrele tokom recesionih perioda za osmatranje tokom 2015-2020. godine. Ova vrednost je ocenjena na nivou od $Q_{kr} = 0.35 - 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$, tako da se isticanje ispod te vrednosti dešava u laminarnim, a iznad u turbulentnom režimu. Ova vrednost odgovara frekvencijama od 90% isticanja, dobijenim analizom kriva trajanja protoka podzemnih voda.

6.6.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrele Rijeke Crnojevića

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića izvršena je na osnovu kompletnih i skraćenih hemijskih analiza koje su urađene u periodu 2015 – 2021. godina od strane Zavoda za meteorologiju i seizmologiju Crne Gore, uz izuzetak 2019. godine kada podzemna voda na vrele nije hemijski analizirana. Uzorkovanje je u navedenom periodu vršeno 4 puta godišnje u periodu maj-decembar, kako bi se voda analizirala u svim vodnim periodima.

Hemijske analize su pokazale da su podzemne vode karstnog sistema Rijeke Crnojevića izuzetno dobrog prirodnog kvaliteta, budući da je reč o vodama bez boje, ukusa i mirisa, odnosno da su sve makrokomponente ispod MDK. Međutim, može se primetiti povišena mutnoća tokom merenja u novembru 2021. godine, što je i logično imajući u vidu period visokih voda. Ono što je problematično kod kvaliteta voda Rijeke Crnojevića odnosi se na mikrokomponente u vidu fosfata i amonijaka, odnosno parametara koji se odnose na fenole. Naime, u svim analizama koje je izvršio ZHMS Crne Gore vidi se povišen sadržaj fosfata, odnosno njihova vrednost iznad MDK, dok su vrednosti amonijaka oko MDK, sa tendencijom prelaska ove vrednosti. Takođe i vrednosti fenola su iznad MDK u svim analizama koje je u periodu 2015-2020 izvršio ZHMS Crne Gore. Osim povišenih koncentracija navedenih hemijskih parametara, primetan je i povišen sadržaj mezofilnih, koliformnih i koliformnih bakterija fekalnog porekla. Ukupan broj mezofilnih bakterija je bio čak 3,5 puta viši od MDK u 2018. godini, dok su u ranijim godinama ove bakterije bile ispod MDK. Koliformne i koliformne bakterije fekalnog porekla su u svim analizama koje je izvršio ZHMS CG bile iznad MDK, sa jasnom tendencijom porasta. Rekord su koliformne bakterije čiji je broj 2018. godine iznosio skoro 90 puta više od MDK. Konstantan povišen sadržaj bakterija ukazuje na mikrobiološko

zagađenje i sanitarnu neispravnost ovih voda, čiji uzrok treba tražiti u odsustvu postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda na Cetinju. Naime, Prestonica Cetinja sve svoje otpadne vode uopšte ne tretira, već ih ispušta direktno da se slobodno infiltriraju u podzemlje. Ukoliko se ponovi podatak o 90% efektivnoj infiltraciji na slivnom području karstnog sistema Rijeke Crnojevića, jasno je da sve zagađujuće materije sa Cetinja dospevaju u karstni sistem Rijeke Crnojevića. Izgradnja postrojenja za tretman otpadnih voda na Cetinju je u planu već nekoliko godina, te ostaje nada da će se ovaj projekat privesti kraju kako bi se zaštitio izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića.

Neznatne oscilacije kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića ukazuje na postojan kvalitet ovih voda u vremenu. Tako, temperatura vode oscilira od 11,7 do 12,6°C, što je u rangu srednje godišnje temperature vazduha ovog prostora.

Mutnoća podzemnih voda oscilira od 0,53 do 1,32, uz napomenu da se pojave povišene mutnoće mogu javiti tokom intenzivnih kišnih epizoda i povišenih vrednosti izdašnosti podzemnih voda u trajanju od nekoliko dana.

Varijacija pH vrednosti praktično odsustvuje, budući da je uvek reda veličine 8,2-8,3, odnosno da je na gornjoj granici neutralnosti. Specifična provodljivost varira u granicama od 297 do 339 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ukupna mineralizacija podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića oscilira od 171,2 mg/l do 231,2 mg/l, što ukazuje da se radi o malomineralizovanim vodama. Ovo može biti još jedan dokaz o brznoj cirkulaciji podzemnih voda kroz sistem, tako da nemaju vremena da dođu u značajniju interakciju sa krečnjakom, koji bi ih geohemijskim reakcijama obogatio hemijskim komponentama. Sadržaj organske materije u podzemnoj vodi vrela Rijeke Crnojevića iskazan kroz hemijska i biološka potrošnja kiseonika sve vreme je ispod MDK i varira od 1,9 do 2,9 mg/l (HPK), tj. od 1,4 do 3 mg/l (BPK₅). Ukupni azot, nitriti i gvožđe su redovno ispod MDK. Sve pomenuto dokazuje izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda ovog sistema.

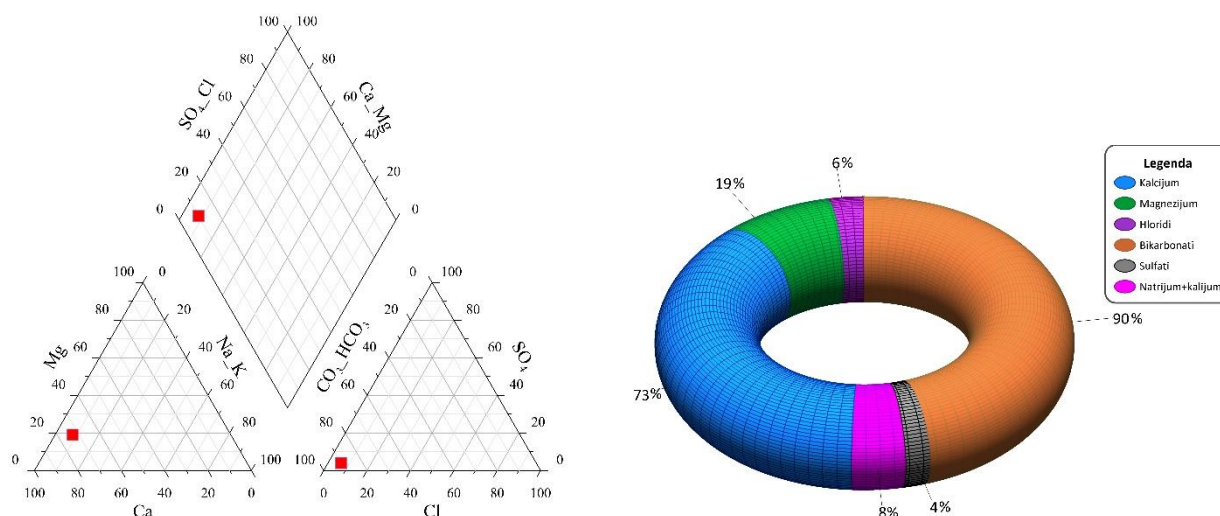
Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (195,2 – 226 mg/l ili prosečno 90%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa opsegom od 48,02 do 57 mg/l, tj. prosečno 73%ekv. Od ostalih makrokomponenti prisutni su magnezijum (6,4 – 11,3 mg/l ili prosečno 19%ekv), natrijum (3,9–7,5 mg/l) i kalijum (od 0,7 do 1,5 mg/l ili prosečno 8%ekv zbirno sa natrijumom) od katjona, tj. sulfati (5 – 11,5 mg/l ili prosečno 4%ekv), odnosno hloridi od 5,9 do 10,6 mg/l, tj. prosečno 6%ekv. Sadržaj nitrata je takođe bitan i on varira od 4 do 10,29 mg/l.

Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona u periodu 2015-2021, dat je na Pajperovom i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.120), kao i formulom Kurlova (6. 8).

$$CO_{1,84}^2 M_{0,21} \frac{HCO_{90}^3}{Ca_{73} Mg_{19} Na + K_8} pH_{8,2} TV_{9,1} T_{12,1} Q_{1340} \quad (6.8)$$

Na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića, koje su izrađene u periodu 2015-2021 godine, može se zaključiti da se radi malomineralizovanim dosta tvrdim vodama hidrokarbonatno-kalcijumsko-magnezijumske grupe, sa pojavama povišene mutnoće u periodu visokih voda, kao i sa povišenim sadržajem ukupnih bakterija, amonijaka i fenola. Niske oscilacije fizičko-hemijskih parametara i makrokomponenti ukazuju na postojan hemizam voda u vremenu i izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića, koje su dosta opterećene antropogenim zagađujućim faktorom usled nepostojanja postrojenja za tretman voda na Cetinju.

Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu Rijeke Crnojevića, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 12 ovog rada.



Sl. 6.120. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema Rijeke Crnojevića na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (ZHMS)

6.7 Karstni hidrogeološki sistem vrela Bosne

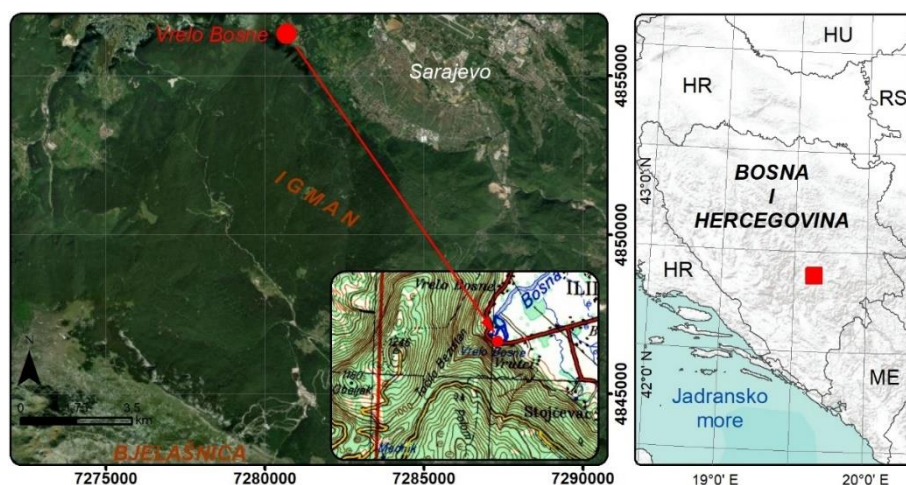
Karstni hidrogeološki sistem vrela Bosne istraživani je u nekoliko navrata tokom prethodnih decenija. Najveći broj hidrogeoloških podataka o ovom karstnom sistemu, koji su korišćeni delom kao ulazni podaci pri hidrogeološkoj analizi vrela Bosne, može se naći u radovima Sliškovića (1983), Avdagića (1996), Čičića & Skopljaka (2004), Skopljaka (2000; 2006), Skopljaka & Žigića (2003), Skopljaka et al. (2011); Žigića et al. (2009), Begovića et al. (2019), Kovačine & Lončarevića (2003), Halilbegovića (2022).

6.7.1 Fizičko-geografske karakteristike

Karstni sistem vrela Bosne nalazi se u centralnom delu Bosne i Hercegovine, u podnožju planina Igman i Bjelašnica, a u neposrednoj blizini Sarajeva, glavnog grada Bosne i Hercegovine. Teritorijalno i administrativno pripada Federaciji Bosne i Hercegovine, tj. Kantonu Sarajevo i njegovoj opštini Ilidža. Prema hidrogeološkoj rejonizaciji pripada Dinaridima Bosne i Hercegovine (Sl. 6.121). Nizvodno od vrela formira se površinski tok reke Bosne, koji pripada slivu reke Save.

Najveće naseljeno mesto na širem istražnom prostoru je Sarajevo i njegova prigradska naselja, dok se na planinskim područjima Igmana i Bjelašnice, koje se dreniraju na vrelu Bosne, nalaze manja seoska naselja. Demografske karakteristike ovog područja pokazuju da Kanton Sarajevo prema popisu iz 2013. godine ima 413 593 stanovnika, dok samo gradsko jezgro Sarajeva ima 275 524 stanovnika (BHAS, 2013), što ovaj kanton čini najnaseljenijim u Bosni i Hercegovini.

Vrelo Bosne je od 2006. godine, odlukom Skupštine Kantona Sarajevo proglašeno za spomenik prirode (Sl. novine Kantona Sarajevo 16/06), čime su definisane granice i kategorija spomenika prirode, zatim ciljevi i mere zaštite prirode, kao i mere upravljanja ovim spomenikom.



Sl. 6.121. Geografski položaj vrela Bosne (crvena boja) na karti Bosne i Hercegovine i detaljan prikaz vrela na satelitskom snimku LANDSAT 8 i topografskoj karti 1:25.000, list Sarajevo

6.7.2 Klimatske karakteristike

Klima slivnog područja vrela Bosne zavisna je od planinskih vrhova Igmana i Bjelašnice, kao i relativne blizine Jadranskog mora. Umereni klimatski pojas odlikuje se ostrim i dugim zimama i relativno toplim letima.

Analiza klimatskih karakteristika ovog područja izvršena je na osnovu podataka sa najbliže klimatološke stanice za period 2015 – 2020 god. za koju postoji najduži niz osmatranja – stanice Bjelašnice, koja se nalazi na istoimenoj planini južno od Sarajeva na 2067 mm. Analiziran period iskorišćen je kako bi korespondirao sa dostupnim podacima o izdašnosti vrela Bosne, ali i ostalim primerima karstnih sistema. Meteorološka stanica Bjelašnica predstavlja glavnu meteorološku stanicu sa dnevnim merenjima padavina, temperature vazduha, visine snežnog pokrivača i brzine i pravca vetra kojom gazduje Federalni hidrometeorološki zavod (FHMZ), čiji su klimatski podaci interpretirani.

U tabeli 6.49 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih suma padavina za period 2015 – 2020 godina sa stanice Bjelašnica. Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom sumom padavina bio oktobar 2015. godine sa 315,4 mm pale kiše, dok je mesec sa minimalnom vrednošću pale kiše decembar 2015. godine sa svega 1,6 mm kiše. Godišnje sume padavina za period 2015 – 2020 godina variraju od 794 mm 2020. godine do 1403,1 mm 2018. godine, tako da je prosečna suma padavina koja u periodu 2015 – 2020 godišnje padne na prostor MS Bjelašnica 1192,3 mm/god.

Tabela 6.49. Mesečne, srednjemesečne i godišnje sume padavina (u mm) za stanicu Bjelašnica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označeni maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti suma padavina (prema podacima FHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Σ
2015	173,4	131	143,8	73,3	38,2	118,6	25,7	68,4	77,8	315,4	178,4	1,6	1345,6
2016	96,1	152,8	174	85,8	107,7	179,6	43,9	62,2	118,2	107,4	205,3	17,8	1350,8
2017	85,1	89,4	76,2	107,9	87	106,2	96,2	14,7	179,2	71,3	126,9	170,6	1210,7
2018	110,9	149,7	160,1	66,7	167,6	175,1	127,3	65,5	29,5	141,8	114,4	94,5	1403,1
2019	166,3	83,6	70	91,6	145,1	44,9	99,8	102	29,9	10,1	128,9	77,5	1049,7
2020	28,5	54,4	42,7	40,6	70,3	89,4	65,7	65,7	86,9	99,7	12,9	137,2	794
Prosek	110,1	110,2	111,1	77,7	102,7	119,0	76,4	63,1	86,9	124,3	127,8	83,2	1192,3

U tabeli 6.50 dat je prikaz maksimalnih mesečnih i srednjemesečnih vrednosti ukupnog snega, kao i srednjegodišnjih vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina sa stanice Žabljak. Iz tabele se uočava da je mesec sa maksimalnom vrednošću ukupnog snega bio mart 2015. godine sa čak 325 cm ukupnog snega. Ono što je karakteristično za Bjelašnicu je da zimska sezona traje do 10 meseci, tj. da se čak i u junu mogu javiti snežne padavine, što je bio slučaj 2019. i 2020. godine, sa 8 cm i 1 cm kumulativnog snega. Snežne padavine se najčešće aktiviraju tokom novembra i decembra, mada se sneg manjeg intenziteta može javiti i u septembru i oktobru. Može se zaključiti da je sezona snežnih padavina na Bjelašnici od oktobra do maja, sa čestim snežnim padavinama i u junu i septembru. Ova činjenica je vrlo značajna sa aspekta prihranjivanja karstnog sistema vrela Bosne. Srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega za period 2015 – 2020 godina variraju od 39 cm 2020. godine do 148 cm 2015. godine, dok je prosečna srednjegodišnja vrednost ukupnog snega u periodu 2015 – 2020. godina 60 cm, uz napomenu da je proračun palog snega podrazumevao samo mesece u kojima je padao sneg.

Tabela 6.50. Maksimalne mesečne, srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti ukupnog snega (u cm) za stanicu Bjelašnica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje sumarne vrednosti ukupnog snega (prema podacima FHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	165	263	325	276	103	0	0	0	0	1	28	26	148
2016	37	59	120	95	22	0	0	0	0	18	43	11	51
2017	69	77	113	73	47	0	0	0	3	21	38	112	61
2018	157	190	219	196	26	0	0	0	0	2	16	81	111
2019	189	202	221	141	78	8	0	0	0	0	10	29	98
2020	38	61	72	74	7	1	0	0	4	5	3	121	39
Prosek	109	142	178	143	47	5	0	0	4	9	23	63	85

U tabeli 6.51 dat je prikaz mesečnih, srednjemesečnih i godišnjih prosečnih vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina sa stanice Bjelašnica. Iz tabele se vidi da je mesec sa najvećom prosečnom temperaturom vazduha bio jul 2015. godine sa 13,9°C, dok je mesec sa minimalnom vrednošću temperature vazduha januar 2017. godine sa -10,5°C. Godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha za period 2015 – 2020 godina variraju od 1,8°C 2017. godine do 2,8°C 2020. godine, dok je prosečna višegodišnja temperatura vazduha svega 2,4°C. Ovako niske temperature, koje su niže čak i od prosečne godišnje temperature vazduha na Žabljaku, karakteristične su za visokoplaninska područja sa značajnim snežnim padavinama, koje očigledno imaju veoma bitnu ulogu u formiranju isticanja na vrelu Bosne.

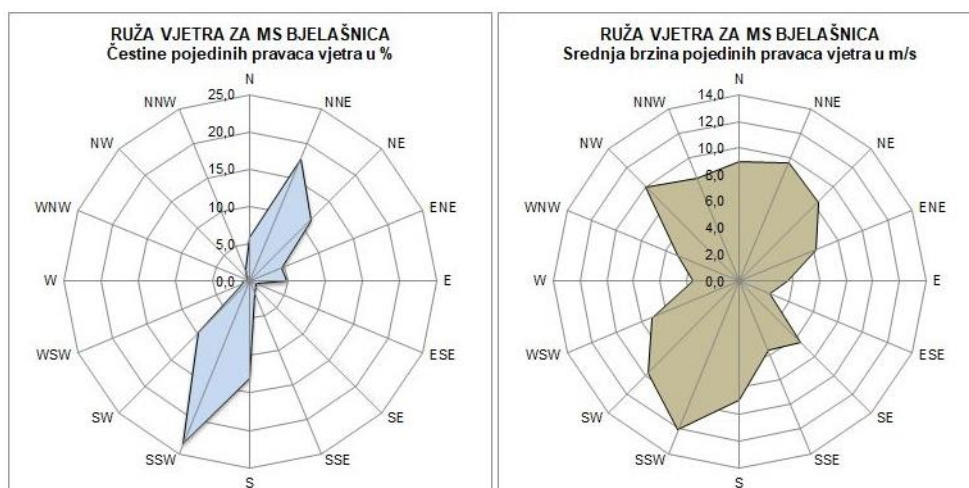
Tabela 6.51. Mesečne, srednjemesečne i godišnje prosečne vrednosti temperature vazduha (u °C) za stanicu Bjelašnica u periodu 2015 – 2020 godina. Plavom bojom su označen maksimalne, crvenom bojom minimalne, a zelenom bojom srednjemesečne i srednjegodišnje vrednosti temperature vazduha (prema podacima FHMZ)

God.	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Pr.
2015	-5,8	-6,9	-5,5	-2,8	5,6	7,7	13,9	12,8	7,8	3,0	2,5	-0,2	2,7
2016	-5,9	-2,0	-4,0	2,6	3,3	9,3	11,5	9,7	6,7	1,4	-1,8	-4,9	2,2
2017	-10,5	-3,6	-2,2	-1,4	4,7	10,4	11,8	13,4	5,7	2,5	-2,5	-6,3	1,8
2018	-4,2	-7,7	-3,8	4,3	6,9	8,4	10,5	12,0	7,0	4,1	0,3	-6,2	2,6
2019	-9,2	-6,3	-3,5	0,3	1,3	10,9	11,2	13,4	8,3	6,9	1,3	-4,0	2,5
2020	-4,6	-4,5	-3,7	0,1	4,1	7,3	10,4	12,1	9,0	3,3	2,1	-2,5	2,8
Prosek	-6,7	-5,2	-3,8	0,5	4,3	9,0	11,5	12,2	7,4	3,6	0,3	-4,0	2,4

Brzina kretanja vazdušnih masa osmatra se na dnevnom nivou na stanici Bjelašnica. U tabeli 6.52 date su prosečne mesečne vrednosti brzina vetra (u m/s) u periodu 2015-2020. god, dok sl. 6.122 pokazuje ružu vetrova na stanici Bjelašnica, prema čestini i brzini, sa koje se vidi da severoistočni-jugozapadni vetrovi duvaju najčešće i da su oni najvećeg intenziteta. Ovako velike brzine vetrova značajne su i sa aspekta merenja padavina i snega, te je korekcija ovih klimatskih parametara neophodna kako bi se pravilno ocenio ulaz u karstni sistem vrela Bosne.

Tabela 6.52. Prosečne mesečne i godišnje brzine vetra (u m/s) za stanicu Bjelašnica za period 2015-2020. god. (prema podacima FHMZ)

	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	Prosek
2015	14,2	12,0	13,0	14,0	10,0	9,0	5,5	6,0	10,6	9,8	10,5	8,8	10,3
2016	17,0	18,6	11,9	12,1	11,0	8,1	6,8	7,9	7,6	9,4	14,5	12,7	11,4
2017	11,0	13,1	16,3	12,2	11,1	7,6	9,1	6,6	10,1	10,0	10,6	18,1	11,3
2018	16,5	11,7	14,7	11,8	8,2	9,1	10,2	6,1	9,3	9,0	10,3	12,6	10,8
2019	18,0	15,3	15,4	11,7	10,8	8,3	7,4	6,5	6,3	8,1	15,5	16,7	11,7
2020	10,6	16,3	10,5	9,2	13,4	9,5	5,5	6,5	6,2	9,8	4,9	10,8	9,4
Prosek	14,5	14,5	13,6	11,8	10,7	8,9	7,4	6,6	8,2	9,6	11,1	13,3	10,9



Sl. 6.122. Ruža vetrova za stanicu Bjelašnica (prema podacima FHMZ)

6.7.3 Hidrološke i hidrografske karakteristike

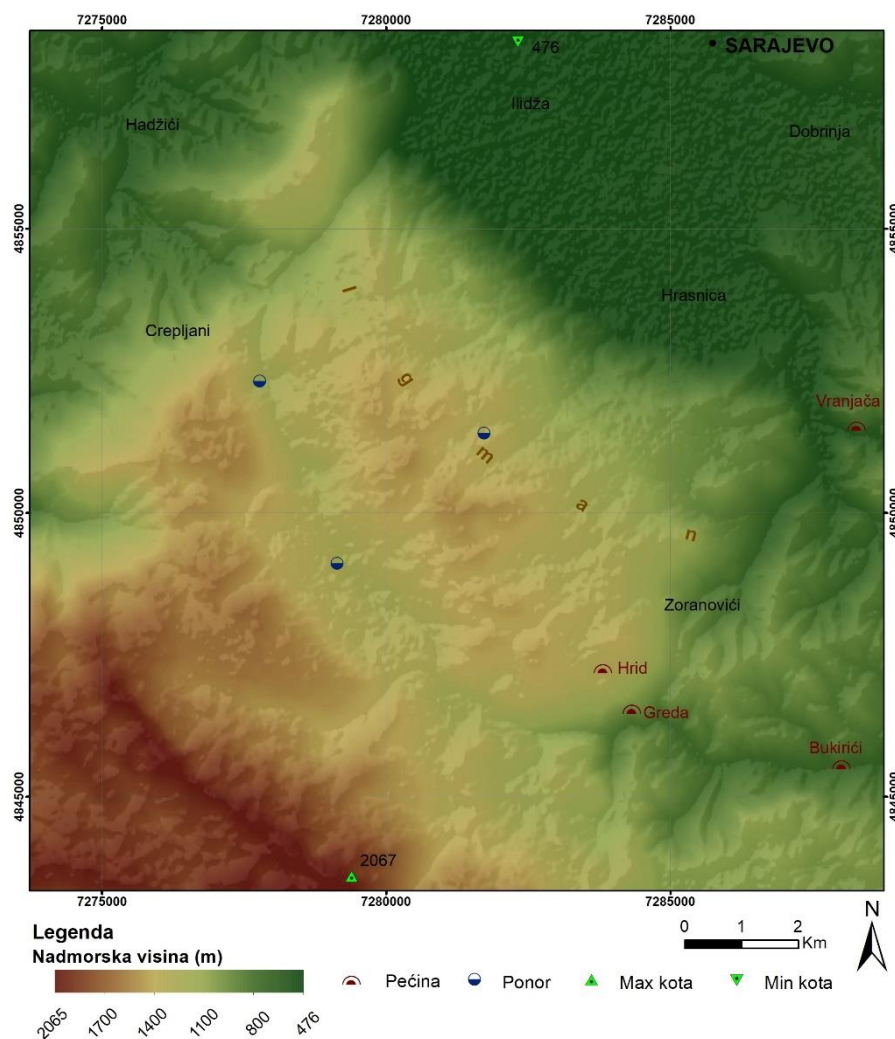
Prema hidrografskim karakteristikama, slivno područje vrela Bosne pripada Crnomorskom slivu, budući da vrelo formira reku Bosnu koja se preko Save i Dunava uliva u Crno more. Šire istražno područje odlikuje se velikom disproporcijom u prostornom rasporedu rečnih tokova. Naime, može se uočiti da se veći rečni tokovi nalaze na prostoru Sarajevskog polja, dok se nekoliko stalnih i povremenih rečnih tokova nalaze na severozapadu i jugoistoku područja. Sa druge strane, centralni, južni i jugozapadni delovi istražnog prostora odlikuju se potpunim odsustvom rečne mreže, što je posledica geoloških karakteristika ovog područja, budući da je izgrađeno najviše od karbonata trijasko starosti, koji su onemogućili formiranje rečne mreže.

Reka Bosna predstavlja najznačajniji i najveći rečni tok na istražnom terenu. Formira se od vrela Bosne i teče na sever, da bi se kod Šamca ulila u Savu. Prosečni proticaj Bosne kod Plandišta (Ilidža) iznosi oko 7 m³/s, dok samo korito reke nije regulisano, budući da nema poplavni karakter sve do ušća reka Željeznice i Zujevine, kada može ugroziti okolna naselja nakon intenzivnih kiša (LEAP, 2013).

Na prostoru Sarajevskog polja nalaze se reke Željeznica, Zujevina, Dobrinja, Tilava i VečERICA , koje su jednim delom svojih tokova regulisane, budući da su neke od njih bujičnog karaktera (npr. Tilava), a kvalitet im je najčešće vrlo loš (LEAP, 2013).

6.7.4 Geomorfološke karakteristike

Prema geomorfološkim karakteristikama, na istražnom prostoru se jasno uočavaju dve veoma različite celine: planinsko područje Igmana i Bjelašnice u centralnom i južnom delu, odnosno prostor Sarajevskog polja na severu (Sl. 6.123). Igman i Bjelašnica predstavljaju dve dominantne geomorfološke celine na istražnom prostoru, sa nadmorskom visinom koja dostiže 2067 m, koliko iznosi najviši vrh Igmana. Idući na sever, nadmorske visine se smanjuju, sve do 476 m, koliko iznosi najniža tačka na istražnom terenu.



Sl. 6.123. Digitalni elevacioni model šireg slivnog područja vrela Bosne na kome su vrtače uočljive u vidu sivih tačaka u okviru slivnog područja vrela

Među geomorfološkim procesima koji su formirali reljef, ističu se karstni i fluvijalni proces, uz pojavu koluvijalnog procesa što je rezultiralo stvaranjem sipara. Karstni geomorfološki proces dominantan je u centralnom, južnom i jugozapadnom delu terena, tj. na mestima razvoja karbonatnih stena trijasko starosti. Vrtače predstavljaju dominantne površinske karstne oblike, tako da je gustina vrtača na slivnom području vrela Bosne $16,78/\text{km}^2$, što govori o značajnoj prostornoj distribuciji vrtača. Podzemni karstni geomorfološki oblici su manje razvijeni, te su analizom topografske karte 1:25000, locirane 4 pećine (Hrid, Greda, Bukirići i Vranjača), dok

jame nisu uočene, mada je vrlo moguće očekivati da se ispod brojnih vrtača nalaze vertikalni karstni kanali u vidu jama, koje omogućavaju efektivnu infiltraciju kiša i otopljenog snega.

Na prostoru između Bjelašnice i Igmana nataložena je serija glacijalnih sedimenata koja svedoči o zaglečerenosti ovog prostora u geološkoj istoriji. Ova serija glacijalnih sedimenata stvorena je najverovatnije otopljavanjem lednika i glečera, njihovim kretanjem ka nižim nadmorskim visinama i deponovanjem materijala sa nekadašnjih planinskih vrhova.

6.7.5 Geološke karakteristike

Najveći prostor zauzimaju srednje- i gornjotrijaski sedimenti planina Igman i Bjelašnica, uz postojanje krednih i miocenskih geoloških formacija, kao i najmlađih, kvartarnih sedimenata.

Najstarije tvorevine na istražnom području pripadaju donjem trijasu (T_1), a predstavljene su kvarc-liskunovitim peščarima, sa vrlo malo glinaca, laporaca i krečnjaka, debljine i do 500 m (Jovanović et al. 1978). Ova serija u višim horizontima prelazi u formaciju (2T_1) izgrađenu mahom od laporovitih krečnjaka i laporaca, dok se peščari javljaju mestimično. Okolina Sarajeva karakteristična je po klasičnom alpskom razviću srednjeg trijasa (Jovanović et al. 1978). Anizijski kat (T_1^2) je predstavljen krečnjacima, dolomitima i smenom krečnjaka i dolomita, tako da su razvijene tri sedimentacione faze u aniziku: krečnjački razvoj na Trebeviću, Jahorini i Bukoviku predstavljen masivnim i jedrim krečnjacima i dolomitičnim krečnjacima, debljine do 400 m sa karakterističnom faunom; dolomitski razvoj, utvrđen u strukturno-facijalnim jedinicama Bjelašnica-Visočica i Ledići-Ozren preko donjeg trijasa i predstavljen masivnim, ređe bankovitim dolomitima debljine do 300 m; krečnjačko-dolomitski razvoj severno od Hadžića i Kreševa, izgrađen od bankovitih, ređe masivnih dolomita sa retkom faunom, debljine do 200 m (Jovanović et al. 1978).

Ladinski kat (T_2^2) odlikuje se raznovrsnim sedimentima i vulkanskim stenama, tako da se u najnižim delovima nalaze laporoviti i peskoviti sedimenti, glinci, tufovi, peščari, rožnaci i krečnjaci, ukupne debljine do 400 m, dok se vulkanska aktivnost srednjeg trijasa odlikuje spilitima ($\beta\beta b$). Neraščlanjeni srednji i gornji trijas ($T_{2,3}$) lociran je na Igmanu i Bjelašnici, a predstavljen je dolomitima i krečnjacima debljine od 300 do 500 m. Gornji trijas (T_3) predstavljen je krečnjacima i dolomitima, debljine do 700 m, a konstatovan je na Bjelašnici, zajedno sa gornjim paketom gornjeg trijasa (2T_3) u vidu brečastih krečnjaka, debljine do 300 m. Klastični sedimenti jure i krede (J, K) izdvojeni su u jedinici Bjelašnica-Visočica, a izgrađeni su od flišnih naslaga u vidu laporaca, kalkarenita, peščara i glinaca. Ova serija nastavlja se u vidu fliša predstavljenog brečastim krečnjacima, kalkarenitima i peščarima gornje krede (K_2) (Jovanović et al. 1978).

Među mlađim sedimentima na istražnom prostoru figurišu glinoviti laporci, gline i glinoviti peščari (tzv. koševski slojevi) (1M_3) i preko njih orlački konglomerati (2M_3). Ovi paketi transgresivno leže na velikom prostranstvu sarajevske sinklinale, preko paleozoika i mezozoika na jugozapadu. Koševski slojevi su pretežno izgrađeni od lapora, glina, alevrolita i slabo vezanih glinovitih peščara, ukupne debljine oko 400 m. Locirani su oko Sarajeva, u sarajevskoj sinklinali. Orlački konglomerati su locirani na Vracama i desnoj obali Miljacke. Konglomerati dominiraju serijom, a nalaze se još i peščari, laporci i krečnjaci, debljine 100-200 m (Jovanović et al. 1978).

Kvartarne naslage su malog rasprostranjenja, ali vrlo različite geneze. Morenski materijal (gl) lociran je na Bjelašnici, a izgrađeni su od slabo zaobljenih komada krečnjaka i dolomita. Limnoglacijalni sedimenti (lgl) predstavljeni su sitnozrnim peskovima koji bočno prelaze u šljunkovito-drobinski materijal. Proluvijalni (pr) i deluvijalni (d) nanosi locirani su u manjim depresijama na Bjelašnici i Igmanu, izgrađeni su od slabo zaobljene drobine okolnih stena, mahom krečnjaka, dolomita i padinske breče. Sipari (s) su izdvojeni na strmim odsecima u vidu

drobinskog materijala matične stene. Terasne naslage su locirane u rečnim dolinama Bosne i Željeznice, u tri nivoa gde je u najstarijoj seriji terasa obično cementovana. Aluvijon (al) je dominantan u Sarajevskom polju, a predstavljen je šljunkom, peskom i muljevito-peskovitim horizontom (Jovanović et al. 1978).

Prema tektonskim karakteristikama, od nabornih oblika ističe se sinklinala Igmana, pravca pružanja SZ-JI u dužini od preko 14 km, koja tone ka severozapadu gde je navučena na kredni fliš i starije trijasko naslage. Jezgro sinklinale čine megalodonski krečnjaci gornjeg trijasa, a krila su izgrađena od srednetrijaskih krečnjaka i dolomita. Među rasednim strukturama ističu se radijalni i reversni rasedi jugozapadnog krila sinklinale Igmana, odnosno busovački rased, kojim je karbonatna masa Igmana spuštена za više stotina metara, čime je vrelo Bosne došlo u zonu rasedne površi (Žigić et al. 2009).

6.7.6 Hidrogeološke karakteristike

Prema regionalnoj rejonizaciji, šire istražno područje sliva vrela Bosne pripada središnjim Dinaridima Bosne i Hercegovine, koji se odlikuju značajnim prisustvom karbonatnih sedimenata, dok se prema lokalnoj rejonizaciji Skopljaka et al. (2011) sliv vrela Bosne nalazi u okviru hidrogeološke oblasti Bosanskog fliša. Prema tipovima izdani, na istražnom terenu se mogu izdvojiti zbijeni, pukotinski i karstni tip izdani, koji je interno podeljen na karstni tip veće i manje izdašnosti (Prilog 13).

Karstni tip izdani ima najveće rasprostranjenje na istražnom terenu i stoga najveći hidrogeološki značaj sa aspekta akumulacije i rezervi podzemnih voda. Ovaj tip izdani može se podeliti na karstni tip veće i manje izdašnosti, tako da većoj propusnosti pripadaju krečnjaci i dolomiti anizijskog kata, neraščlanjenog srednjeg i gornjeg trijasa, kao i gornjeg trijasa, dok karstnom tipu manje izdašnosti pripada serija krečnjaka, peščara i rožnaca anizika. Na širem istražnom terenu, najmarkantnije karstno vrelo na kome se dreniraju podzemne vode akumulirane u okviru karstnog tipa izdani veće izdašnosti je vrelo Bosne.

Vrelo Bosne nalazi se na teritoriji Opštine Ilidža, na najnižoj hipsometrijskoj tački kontakta Igmana i Sarajevskog polja (Sl. 6.124) u vidu razbijenog tipa vrela. Mehanizam isticanja ovog vrela uslovljen je tektonikom, koja je predisponirala spuštanje severozapadnog krila sinklinale Igmana, što je omogućilo formiranje vrela Bosne kao uzlaznog vrela (Žigić et al. 2009).



Sl. 6.124. Vrelo Bosne u periodu malih voda (jul, 2021; levo) i velikih voda (april, 2019; desno)

Prihranjivanje karstnog sistema vrela Bosne vrši se najvećim delom difuznom infiltracijom atmosferskih padavina u vidu kiše i snega na planinama Igman i Bjelašnice, odnosno, punktuelnom infiltracijom, tj. poniranjem povremenih rečnih tokova na Igmanu. Dosadašnjim istraživanjima i trasiranjima podzemnih voda, utvrđena je podzemna veza ponora na Velikom

polju, Sitničkoj lokvi, Radovoj vodi i kod Hrasničkog stana sa vrelom Bosne (Žigić et al. 2009), međutim bez podataka o vremenu potrebnom traseru da dođe do vrela, čime je virtuelna brzina kretanja podzemnih voda ostala nepoznata. Ipak, Skoljak (2000), Čičić & Skopljak (2004) i Begović et al. (2019) navode podatak o brzini kretanja podzemnih voda u okviru ovog sistema od 0,83 do 2,3 cm/s, odnosno podatke o koeficijentima filtracije $K=6,6 \times 10^{-2}$ m/s i koeficijentima vodopropusnosti $T=1,52 \times 10^{-1}$ m²/s.

Cirkulacija podzemnih voda uslovljena je pravcem tonjenja Igmanske sinklinale, tako da vode imaju generalni pravac od jugoistoka ka severozapadu do zone Brezovačkog raseda i fliša u vidu hidrogeološke barijere, odakle se usmeravaju ka vrelu Bosne (Čičić & Skoljak, 2004; Žigić et al. 2009).

Najveći deo karstnih podzemnih voda akumuliranih u Igmanu drenira se na vrelu Bosne (Čičić & Skopljak, 2004), budući da je procena da je minimalna izdašnost ovog vrela veća od izdašnosti svih vrela zajedno koja se javljaju na kontaktu karbonata Igmana i kvartarnih naslaga Sarajevskog polja. Izdašnost vrela Bosne oscilira od 1,3 do 25 m³/s. Izdašnost vrela se meri automatskom stanicom, instaliranom neposredno nizvodno od mesta isticanja, a stanicom gazduje „Agencija za vodno područje rijeke Save“ iz Sarajeva. Mehanizam isticanja vrela Bosne uslovio je i režim isticanja podzemnih voda ovog vrela, te se maksimumi isticanja javljaju u zimskim i prolećnim mesecima, dok se minimumi javljaju tokom leta (jul, avgust). Površina sliva vrela Bosne procenjuje se na 117 km², sračunata na osnovu korigovanih vrednosti kiše i otopljenog snežnog pokrivača. Ova vrednost je između površine sliva od 100 km² koju navode Čičić & Skopljak (2004) i površine sliva od 140 km² koju navode Žigić et al. (2009). Svakako, granica sliva ne može biti decidno određena, već se radi o zonarnoj vododelnici, tako da pri maksimalnim izdašnostima vrela, površina sliva može biti i veća od navedene.

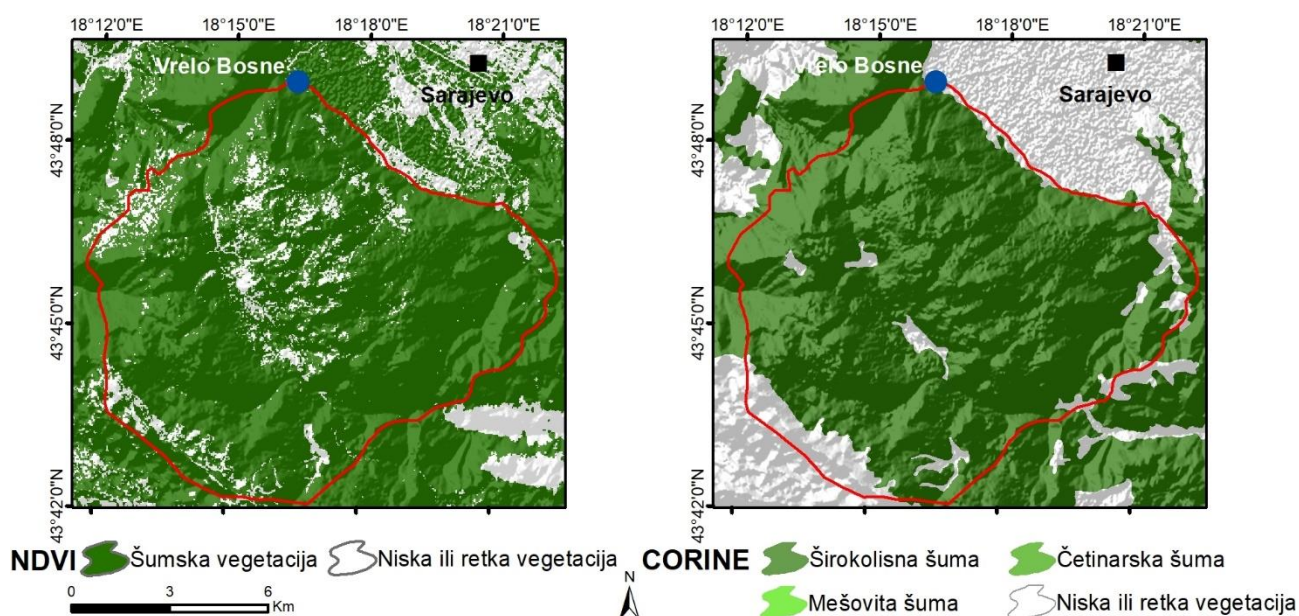
Vrelo Bosne nije direktno kaptirano za vodosnabdevanje, osim manjih količina od oko 8 l/s koje se koriste za okolne kuće i restoran. Međutim, podzemne vode vrela Bosne se indirektno koriste za vodosnabdevanje stanovništva Sarajeva, budući da nizvodno od vrela na području Bačevo i Konaci postoji grupa od oko 30 bunara koji većinom zahvataju vodu iz aluvijona, dok neki od njih zahvataju direktno karstne podzemne vode, budući da kvartarne tvorevine leže direktno na trijaskim karbonatima. S obzirom na to da se intergranularna izdan prihranjuje vodama iz krečnjaka, odnosno iz karstnog masiva Igmana i Bjelašnice (odakle se prihranjuje i Vrelo Bosne), a registrovani su i uzlazni izvori u aluvijonu, može se zaključiti da se radi o jedinstvenom vodnom telu koje se prazni na izvorima razbijenog izvorišta Vrela Bosne, izvorima u aluvionu i bunarima. Područje gde su locirani bunari u Bačevu i Konacima, kao i samu lokaciju vrela, lokalno stanovništvo zove Vrelom Bosne (selo se takođe zove Vrelo Bosne), na osnovu čega može doći do zabune da se Sarajevo snabdeva direktno sa ovog karstnog vrela. U zoni bunara u Konacima, oko 2 km nizvodno od vrela Bosne, napravljeni su infiltracioni kanali u kojima se površinska voda reke Bosne koristi za veštačko prihranjivanje intergranularne izdani u iznosu od oko 1200 l/s (Samardžić & Skopljak, pers. komun.). S obzirom na složenu situaciju oko eksploatacije karstnih podzemnih voda vrela Bosne, ne može se reći da se ne koriste, iako nisu direktno kaptirane. Stoga, u daljim analizama, usvojeno je da su podzemne vode vrela Bosne eksploatisane u iznosu od oko 400 l/s (Stevanović & Eftimi, 2010), što bi bila neka realna i verovatna količina vode koja se eksploatiše najbliže mestu isticanja podzemnih voda.

6.7.7 Kvantitativna karakterizacija karstnog sistema vrela Bosne

6.7.7.1 Evaluacija ulaznih parametara i prihranjivanja karstnog sistema

Korekcija padavina u vidu kiše i snega izvršena je na bazi uticaja klimatskih faktora uz određivanje veličine intercepcije u vegetacionom i vanvegetacionom periodu. Analize su sprovedene na nivou hidroloških godina od 1. oktobra 2015. do 30. septembra 2018. godine. Analizirani period je kraći nego u ostalim primerima, s obzirom na nedostupnost podataka o izdašnosti vrela Bosne za 2019. i 2020. godinu.

Za slivno područje vrela Bosne, sračunato je da šumska vegetacija prema NDVI snimku pokriva 89% sliva, dok prema CORINE karti šumska vegetacija pokriva 90% sliva (Sl. 6.125). Za finalni vegetacioni indeks uzeta je u obzir vrednost NDVI snimka, zbog veće rezolucije i bolje preciznosti, te je indeks procenjen na 0,89, tj. finalna vrednost efektivne infiltracije je sačinjena od 89% viška vode iz područja pod vegetacijom, dok ostalih 11% viška vode je sa područja sa niskom ili retkom vegetacijom.



Sl. 6.125. Levo: Reklasifikovani NDVI snimak koji pokazuje šumsku vegetaciju sliva vrela Bosne (prema podacima USGS, snimak zabeležen 3. avgusta 2020. godine); Desno: CORINE karta upotrebe zemljišnog sloja sa izdvojenom šumskom vegetacijom sliva vrela Bosne (EEA, 2018); Granica sliva vrela Bosne prikazana je crvenom linijom

Kalibracija deficita zemljišne vlage, površine sliva i efektivne infiltracije pokazala je da maksimalna količina zemljišne vlage za slivno područje vrela Bosne iznosi 250 mm, tako da sve preko te vrednosti predstavlja višak vode, tj. potroši se na efektivnu infiltraciju karstnog sistema. Najveća vrednost deficita zemljišne vlage je tokom letnjih meseci, kada je najveća temperatura vazduha i evapotranspiracija, što dovodi do isušivanja zemljišta i velikog isparavanja prispelih padavina, odnosno tokom prolećnih meseci kada se vrši infiltracija na račun otopljenog snega, koji je obično veoma intenzivan na Bjelašnici. Sa druge strane, najmanji deficit zemljišne vlage ostvaruje se u jesenjim mesecima, kada je i najveća količina padavina na ovom području i kada je najintenzivnija efektivna infiltracija karstnog sistema.

Tabela 6.53 prikazuje uporednu analizu godišnjih suma izmerenih vrednosti padavina sa korigovanim vrednostima kiše i snega preračunatog u vodeni ekvivalent (na osnovu podataka iz tabela 6.49-6.52), vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i sloja isticanja na vrelu Bosne. Takođe, date su i procentualne vrednosti evapotranspiracije i efektivne infiltracije u odnosu na izmerene i korigovane vrednosti kiše i snega.

Tabela 6.53. Usporedna analiza izmerenih i korigovanih vrednosti padavina u vidu kiše i snega sa stanice Bjelašnica, vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije, viška vode i efektivne infiltracije i sloja oticaja na vrelu Bosne za period 2015 – 2018. godina. Legenda: **P bruto** – izmerene vrednosti padavina; **PgSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **PgiSWE** – vodeni ekvivalent snega za područja pod vegetacijom; **PET** – potencijalna evapotranspiracija; **AETg** – stvarna evapotranspiracija za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **AETveg** – stvarna evapotranspiracija za područja pod vegetacijom; **Wi (g)** – višak vode za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom; **Wi(š)** – višak vode za područja pod vegetacijom; **Ief** – efektivna infiltracija; **Qsr** – srednja izdašnost vrela Bosne

Parametar	2015-2016	2016-2017	2017-2018	Prosek
P bruto (mm)	1515,7	1172,4	1421,2	1369,8
PgSWE (mm)	3452,8	2359,2	2154,6	2655,5
PgiSWE (mm)	2215,0	1512,3	1172,1	1633,1
PET (mm)	321,1	319,4	327,5	322,7
PET/Pbruto (%)	21,2	27,2	23,0	23,6
AETg (mm)	311,3	291,2	321,6	308,0
AETg/PgSWE (%)	9,0	12,3	14,9	11,6
AETveg (mm)	310,5	287,8	319,6	306,0
AETv/PgiSWE (%)	14,0	19,0	27,3	18,7
Wi (g) (mm)	3147,2	2093,0	1856,4	2365,5
Wi (g) / PgSWE (%)	91,2	88,7	86,2	89,1
Wi (š) (mm)	1909,6	1219,7	883,2	1337,5
Wi (š) / PgSWE (%)	86,2	80,7	75,3	81,9
Ief (mm)	2045,8	1312,5	990,3	1449,5
Ief/Pbruto (%)	135,0	111,9	69,7	105,8
Ief/PgSWE (%)	59,2	55,6	46,0	54,6
Ief/PgiSWE (%)	92,4	86,8	84,5	88,8
Qsr (m³/s)	5,15	4,38	6,33	5,29
Q (mm) (F = 117 km²)	1398,7	1187,4	1714,0	1433,4
Δ Ief-Q (mm)	647,1	125,1	-723,7	16,1
Q / Ief (%)	68,37	90,47	173,08	98,89

Iz tabele 6.53 uočava se da je vrednost korigovanih padavina i na područjima pod vegetacijom i na područjima sa niskom ili retkom vegetacijom veća od izmerenih vrednosti padavina na stanici Bjelašnica, tako da je ukupna suma korigovanih vrednosti za područja bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom za 1285,7 mm prosečno veća od izmerenih vrednosti kiše, dok je na području sa vegetacijom ona prosečno veća za 263,4 mm. Veće razlike na područjima bez ili sa niskom vegetacijom javljaju se usled brže infiltracije atmosferskih voda, međutim veoma mala površina koja je bez vegetacije amortizuje ovako veliku razliku.

Potencijalna evapotranspiracija iznosi od 319,4 mm do 327,5 mm u pojedinim hidrološkim godinama. Komparacijom vrednosti PET sa izmerenim vrednostima padavina uočava se da PET iznosi od 21,2% do 27,2% pale kiše, što ukazuje na značajnu infiltraciju atmosferskih padavina u karstni sistem vrela Bosne. Vrednost stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane sume kiše sa dodatim vodenim ekvivalentom snega su neznatno manje od PET, a kreću se od 291,2 mm do 321,6 mm za područja bez vegetacije, odnosno od 287,8 mm do 319,6 mm za područja pod vegetacijom, što bi u procentom odnosu sa korigovanim padavinama u vidu korigovane kiše i snega pretvorenog u vodeni ekvivalent iznosilo od 9% do 27,3% i za područja

bez ili sa slabo razvijenom vegetacijom i za područja pod vegetacionim pokrivačem. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat stvarne evapotranspiracije u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **11,6%**, dok je za područja pod vegetacijom **18,7%**.

Ukupni višak vode u zemljištu za celokupni period razmatranja iznosi od 2093 mm do 3147,2 mm (ili 86,2% do 91,2% u odnosu na korigovane padavine) za područja bez vegetacije, odnosno od 883,2 mm do 1909,6 mm (ili od 75,3% do 86,2% u odnosu na korigovane padavine) za područja pod vegetacijom. Ukoliko se posmatraju sumarne vrednosti za period osmatranja, procenat viška vode u odnosu na korigovane padavine za područja bez vegetacije iznosi **89,1%**, dok je za područja pod vegetacijom **81,9%**. Procentualne vrednosti se uklapaju sa vrednostima koje odlaze na stvarnu evapotranspiraciju, tako da se može smatrati da je proračun viška vode, tj. efektivne infiltracije ispravan. Ipak, vrednosti efektivne infiltracije od oko 80% se čine predimenzionirane za slivno područje vrela Bosne, a kao realne se mogu smatrati veličine 10% do 15% niže od navedene. Posledica sračunate ovako velike vrednosti efektivne infiltracije je uključivanje u kalkulaciju otopljenog snežnog pokrivača, koji je veoma bitan član bilansa karstnih podzemnih voda, a koji na prostoru Bjelašnice traje od septembra do juna.

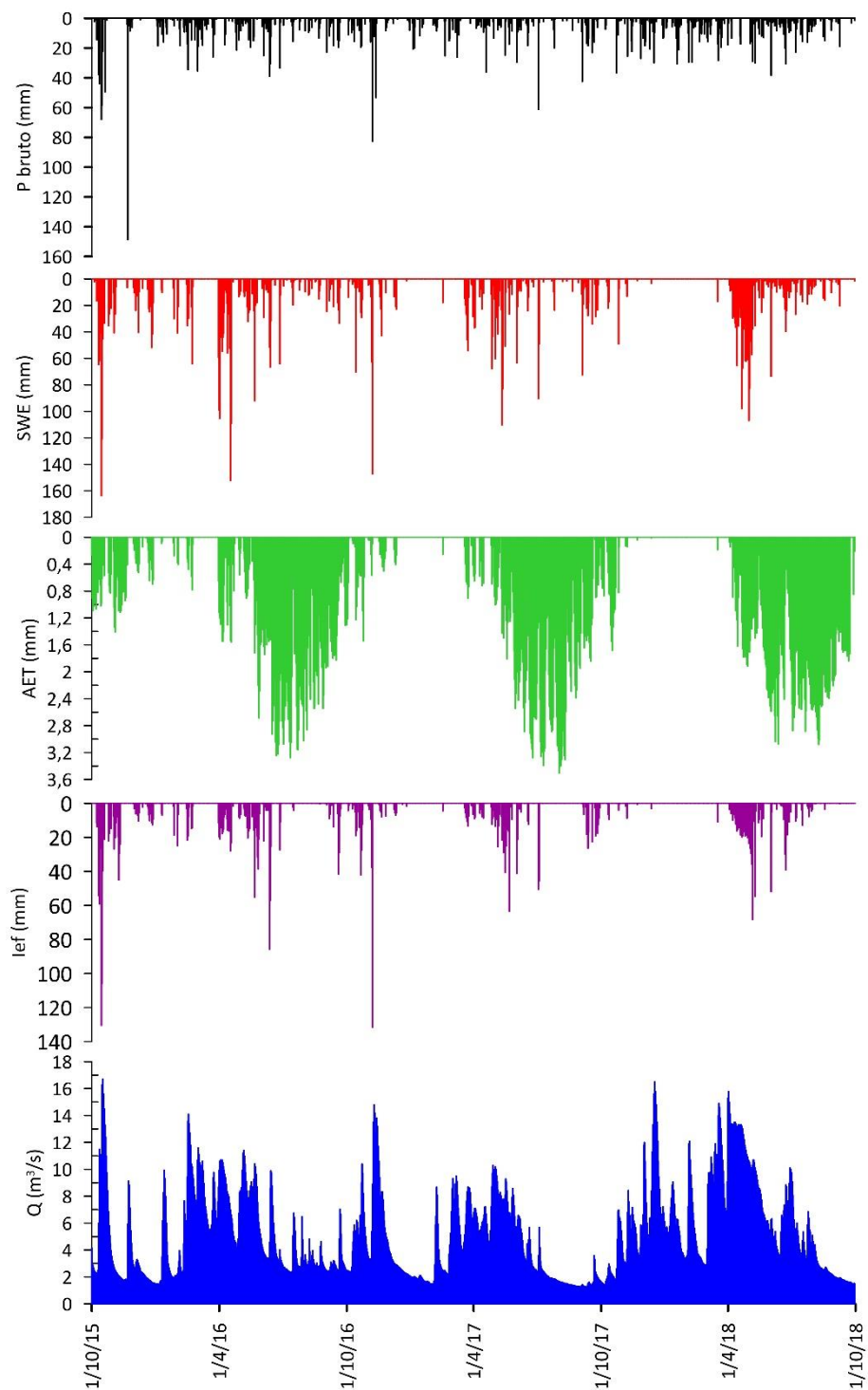
Finalne vrednosti efektivne infiltracije su svedene na jedinstvenu vrednost pomoću vegetacionog indeksa od 0,89 za područje vrela Bosne, tako da je vrednost efektivne infiltracije kalibrisana do ravnoteže sa vrednostima sloja oticaja na vrelu u mm, zadavanjem vrednosti deficita zemljišne vlage i veličine slivnog područja. Vrednost efektivne infiltracije iznosi od 990,3 mm do 2045,8 mm u pojedinim hidrološkim ciklusima (godinama) u analiziranom periodu. Može se uočiti da je odnos efektivne infiltracije i bruto izmerenih padavina na stanici Bjelašnica iznad 100%, što ukazuje na činjenicu da je mnogo više vode infiltrirano u podzemlje nego što je izmereno. Korekcijom padavina i preračunavanjem snega u vodeni ekvivalent, sliv vrela Bosne je kalibrisan na 117 km², na osnovu čega su vrednosti efektivne infiltracije i sloja oticaja dovedene u ravnotežu, tako da je, posmatrajući period 2015 – 2018 na vrelu Bosne isteklo 98,89% infiltrirane vode, odnosno razlika između efektivne infiltracije i isticanja na vrelu je 16,1 mm ili 1,11% (što se može uočiti u poslednja dva reda tabele 6.53).

Ukoliko se uporede odnosi sloja isticanja i prosečne godišnje sumarne vrednosti efektivne infiltracije, može se ustanoviti da je u periodu 2015-2017 isticalo od 9,5% do 31,63% manje vode nego što je infiltrirano, dok je u periodu 2017-2018 isteklo čak 73% više vode nego što je ušlo u sistem. Ovakva situacija je verovatno posledica prenošenja viška vode iz prethodnih hidroloških godina, što ukazuje na veoma veliki rezervoar sistema.

Grafički prikaz dnevnih vrednosti izmerenih kiša za meteorološku stanicu Bjelašnica, vrednosti vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Bosne dat je na uporednom dijagramu 6.126. Na pomenutom dijagramu prikazane su vrednosti vodenog ekvivalenta snega i stvarne evapotranspiracije za područja sa vegetacijom, imajući u vidu vegetacioni indeks područja.

Sa sl. 6.126 može se uočiti da vrednosti isticanja vrela Bosne korespondiraju sa vrednostima efektivne infiltracije, budući da maksimalni pikovi efektivne infiltracije izazivaju pikove izdašnosti vrela. Takođe, može se uočiti da to nije uvek slučaj, što ukazuje na činjenicu da se radi o velikom rezervoaru sistema i vrelu sa uzlaznim mehanizmom isticanja, tako da sistem reaguje u zavisnosti od stanja rezervi. Ono što je primetno ako se uporede dijagrami bruto padavina, snega i isticanja vrela, jasno se uočava poklapanje pikova prouzrokovanih otapanjem snega i pikova isticanja na vrelu u novembru 2015. i 2016. god, tj. aprilu 2018. Vrednosti stvarne evapotranspiracije su najveće tokom letnjih meseci, a najmanje tokom prolećnih, što se

takođe poklapa sa periodima velikih i malih voda vrela Bosne kada su maksimalne, tj. minimalne izdašnosti vrela.



Sl. 6.126. Uporedni prikaz dnevnih vrednosti izmerenih padavina sa stanice Bjelašnica, vodenog ekvivalenta snega, stvarne evapotranspiracije, efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Bosne u periodu 2015 – 2018. godina

6.7.7.2 Statistika vremenskih serija isticanja vrela

Analiza osnovnih statističkih parametara izvršena je za vremenske serije isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne, prema podacima Federalnog hidrometeorološkog zavoda Federacije Bosne i Hercegovine (Tabela 6.54). Vremenski period za koji su analizirani podaci je od 1. oktobra 2015. do 30. septembra 2018. godine.

Tabela 6.54. Osnovni statistički parametri vremenskih serija isticanja karstnih podzemnih voda vrela Bosne za period 2015 – 2018. godine. Legenda: **N** – ukupni broj analiziranih podataka; \bar{x} – srednja vrednost serije; **Mdn** – medijana; **M** – mod; **Min** – minimalna vrednost serije; **Max** – maksimalna vrednost serije; **VAR** – varijansa serije; σ – standardna devijacija; **Cv** – koeficijent varijacije; **Cs** – koeficijent asimetrije

Godina	N	\bar{x}	Mdn	M	Min	Max	VAR	σ	Cv	Cs
m ³ /s										
2015-2016	366	5,15	3,61	2,39	1,46	16,70	10,67	3,27	63,40	0,98
2016-2017	365	4,39	3,31	1,51	1,28	14,80	8,35	2,89	65,86	0,98
2017-2018	365	6,33	5,64	13,30	1,46	16,50	13,90	3,73	58,88	0,68
2015-2020	1096	5,29	4,35	10,7	1,28	16,7	11,59	3,40	64,36	0,92

Iz Tabele 6.54 može se uočiti da je izdašnost vrela Bosne u periodu 2015-2018 oscilirala od 1,28 m³/s do 16,7 m³/s, tako da je srednja vrednost 5,29 m³/s, medijalna 4,35 m³/s, odnosno modalna vrednost 10,7 m³/s, što bi predstavljala najfrekventniju vrednost vremenske serije. Takođe, uočava se da se minimalne vrednosti oscilirale od 1,28 do 1,46 m³/s, dok su maksimumi reda veličine 14,8 do 16,7 m³/s. Vrednosti varijanse, standardne devijacije i koeficijenta varijacije pokazuju centralnu tendenciju vremenske serije isticanja vrela Bosne, dok koeficijent asimetrije pokazuje pozitivnu asimetriju udesno. Na osnovu koeficijenta varijacije, može se izvesti zaključak o veličini i dinamici karstnog sistema (Flora, 2004; Springer et al. 2004; Cinkus et al. 2020), tako da karstni sistem vrela Bosne pripada klasi *Umereno razvijenih sistema*.

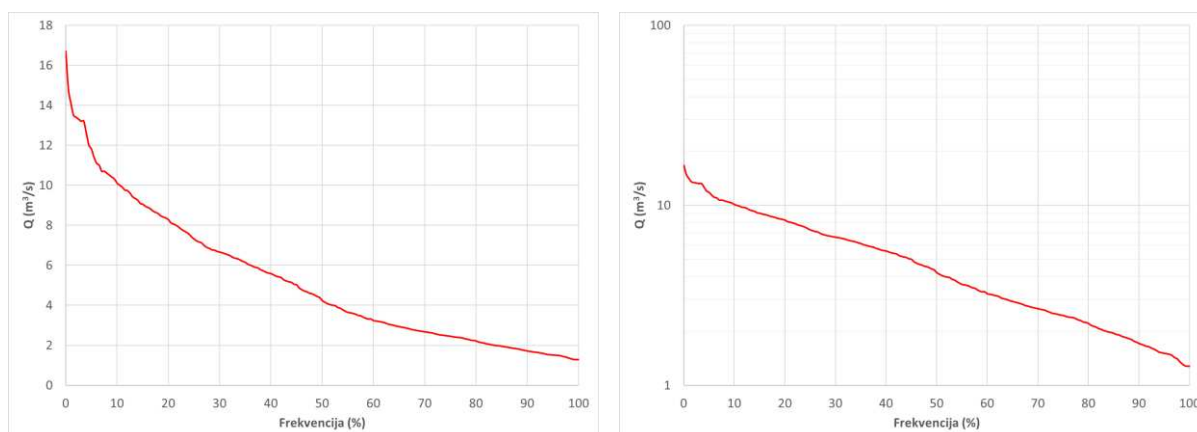
6.7.7.3 Analiza krive trajanja protoka vrela

Analiza krivih trajanja protoka vrela Bosne izvršene za celokupni period osmatranja (2015 – 2018), a rezultati analize dati su u tabeli 6.55, kao i grafički na sl. 6.127 preko dijagrama normalne i log-normalne raspodele u cilju preciznije evaluacije, pre svega minimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda na vrelu Bosne. Iz tabele 6.55 može se uočiti da vrednost je u 50% vremena osmatranja (Q₅₀) isticanje na vrelu iznosilo 4,23 m³/s, što korespondira sa medijalnom vrednošću, sračunatom u okviru statistike. Analiza sušnih perioda koristi vrednosti Q₉₅ – Q₁₀₀, dok su analiza poplavnih perioda podrazumeva veličine Q₀ – Q₁. Tako, tabela 6.55 pokazuje da se tokom ekstremno sušnih perioda na vrelu Bosne mogu očekivati vrednosti isticanja od 1,29 m³/s (Q₉₉) do 1,51 m³/s (Q₉₅). Sa druge strane, poplavni talasi koji se javljaju u 1% ukupnog vremena osmatranja iznose 14,1 m³/s (Q₁) na vrelu. U periodima visokih voda, najčešće se mogu očekivati vrednosti od 10,1 m³/s do 14,1 m³/s (Q₁₀ do Q₁), dok se u periodima malih voda najčešće očekuju izdašnosti od 1,51 m³/s do 2,67 m³/s (Q₉₅ do Q₇₀).

Tabela 6.55. Učestalost isticanja karstnih podzemnih voda vrela Bosne na nivou od 1 do 99% za period 2015 – 2018. Vrednosti su obrađene za ceo period, a date su u m³/s

Period	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₃₀	Q ₄₀	Q ₅₀	Q ₆₀	Q ₇₀	Q ₈₀	Q ₉₀	Q ₉₅	Q ₉₉
2015-2018	14,1	11,8	10,1	8,28	6,66	5,58	4,23	3,23	2,67	2,21	1,71	1,51	1,29

Dijagram normalne raspodele pokazuje blagi pad krive, ukazujući na sporije pražnjenje sistema tokom hidrološke godine, kao i dobru akumulativnu moć sistema. Naime, jasno se može uočiti da sistem ima značajne retencione mogućnosti, tako da uspešno amortizuje sve pikove efektivne infiltracije. Blagi nagib krive protoka ukazuje i na dobru karstifikaciju sistema koja omogućava formiranje značajnih rezervi u sistemu. Dijagram log-normalne raspodele ne pokazuje tačku infleksije koja bi ukazivala na početak isticanja podzemnih voda u uslovima slabijeg hidrostatičkog pritiska kroz karstne kanale i matričnu poroznost u vidu baznog oticaja. To ukazuje na činjenicu da se sistem drenira predisponiranim pravcima kretanja kroz dominantne karstne kanale koji sifonalnom cirkulacijom obezbeđuju dovoljan hidrostatički pritisak za isticanje podzemnih voda na vrelu Bosne.



Sl. 6.127. Krive trajanja protoka vrela Bosne za celokupni period osmatranja (1. oktobar 2015 – 30. septembar 2018. godine) – normalna (levo) u log-normalna (desno) raspodela

Odnos vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda koje su aktuelne u više od 50% i 90% vremena osmatranja (Q_{50} / Q_{90}) pokazuje na varijabilnost izdašnosti vrela tokom malovodnog perioda, što u slučaju vrela Bosne iznosi 2,47, ukazujući na stabilan odnos srednjih i malih isticanja ovog vrela. Sa druge strane, odnos Q_{90} / Q_{50} ukazuje na količinu vode koja ističe na račun akumulirane vode u sistemu ne uzimajući u obzir uticaj sliva (Nathan & McMahon, 1990), što bi zapravo predstavljalo indeks baznog oticaja karstnog sistema. U slučaju karstnog sistema vrela Bosne, ovaj odnos je 0,4, što bi ukazivalo na to da u ukupnom isticanju karstnog vrela 40% vode dolazi na račun baznog oticaja. Međutim, verovatnije je da se radi o većem procentu.

Koeficijent varijabilnosti vrela (odnos Q_{10} / Q_{90}) (Flora, 2004; Springer et al., 2004; Cinkus et al. 2020) u slučaju vrela Bosne iznosi 5,9, što ovo vrelo svrstava u klasu vrela sa Balansiranim isticanjem karstnih podzemnih voda. Ukoliko bi se kao odnos minimalnih i maksimalnih vrednost iskoristio odnos ekstremnih isticanja, što je definicija koeficijenta hidrodinamičke neravnomernosti, on bi iznosio 13,04, što je 2,2 puta više od realnog odnosa.

6.7.7.4 Recesiona analiza izdašnosti vrela

Prvi korak podrazumevao je definisanje perioda isticanja podzemnih voda bez aktivnog prihranjivanja sistema, što je omogućeno komparativnim dijagramima datih na sl. 6.126, gde se jasno uočavaju vremenski periodi tokom letnjih meseci bez efektivne infiltracije. Sa dijagrama na sl. 6.126 vidi se da su tokom definisanog recesionog perioda registrovane kišne padavine na stanici Bjelašnice, međutim, one su verovatno utrošene na zasićenje zemljišne vlage, te nisu dospele do nivoa podzemnih voda. Stoga, može se konstatovati da je za karstni sistem vrela Bosne ispunjen teorijski uslov o odsustvu aktivnog prihranjivanja tokom odabranog recesionog perioda.

Tabela 6.56 prikazuje rezultate analize recesionih krivih vrela Bosne za period oktobar 2015 – septembar 2018. godine.

Tabela 6.55. Rezultati recesione analize vrela Bosne za svaku hidrološku godinu posebno u periodu oktobar 2015 – septembar 2018. Legenda: V_{1-3} – zapremina vode na početku svakog mikrorežima pražnjenja; V^* – zapremina vode u sistemu na kraju recesionog perioda; V_{total} – ukupna zapremina istekle vode tokom celog recesionog perioda

Godina	Recesioni period	Koficijent recesije			V_0 (m ³) x10 ⁶	V^* x10 ⁶ (m ³)	V_{total} x10 ⁶ (m ³)	t (dani)	
2015- 2016	14.6. - 13.7.2016	1	α_1	0,104	V_1	11,559	13,5	10	
					V_2			20,25	20
					ΣV_0			25,06	$\Sigma = 30$
2016- 2017	4.7. - 1.9.2017	1	α_1	0,179	V_1	12,158	12,421	4	
					V_2			2,845	12
					V_3			20,42	44
				ΣV_0	24,58		$\Sigma = 60$		
2017- 2018	4.8. - 30.9.2018	1	α_1	0,0771	V_1	10,652	12,685	5	
					V_2			21,87	53
					ΣV_0			23,34	$\Sigma = 58$

Karakteristika karstnog sistema vrela Bosne je postojanje dva mikrorežima pražnjenja tokom recesionog perioda, slično kao kod vrela Mlave, što je i logično imajući u vidu uzlazni mehanizam isticanja i duboku sifonalnu cirkulaciju ovih vrela. Red veličina koficijenata recesije prvih mikrorežima pražnjenja je reda veličine 10^{-1} do 10^{-2} , što ukazuje na turbulentne uslove tečenja. Vrednosti koficijenata recesije prvih mikrorežima pražnjenja variraju od 0,0771 do 0,104. Samo u 2016-2017 godini izdvojena su tri mikrorežima pražnjenja, s obzirom na to da je i recesija najduže trajala tokom osmatračkog perioda. Poslednji mikrorežimi pražnjenja najčešće se javljaju u laminarnim uslovima, tako da koficijenti recesije variraju od 0,0091 do 0,0175, dakle red veličine je i do 10^{-3} . Vrlo slične rezultate recesione analize vrela Bosne prikazuju i Čičić & Skopljak (2004). Zapremina istekle vode tokom svih recesionih perioda u osmatranom vremenskom periodu 2015 – 2018. godine je sličnog reda veličine, tako da prosečna zapremina istekle vode iznosi $12,87 \times 10^6$ m³. Isti red veličina koficijenata recesije, tj. slične rezultate recesione analize navode Begović et al. (2019), ističući superpoziciju najčešće dva mikrorežima pražnjenja vrela Bosne, što ukazuje na balansirani režim cirkulacije podzemnih voda ovog sistema u recesionim uslovima.

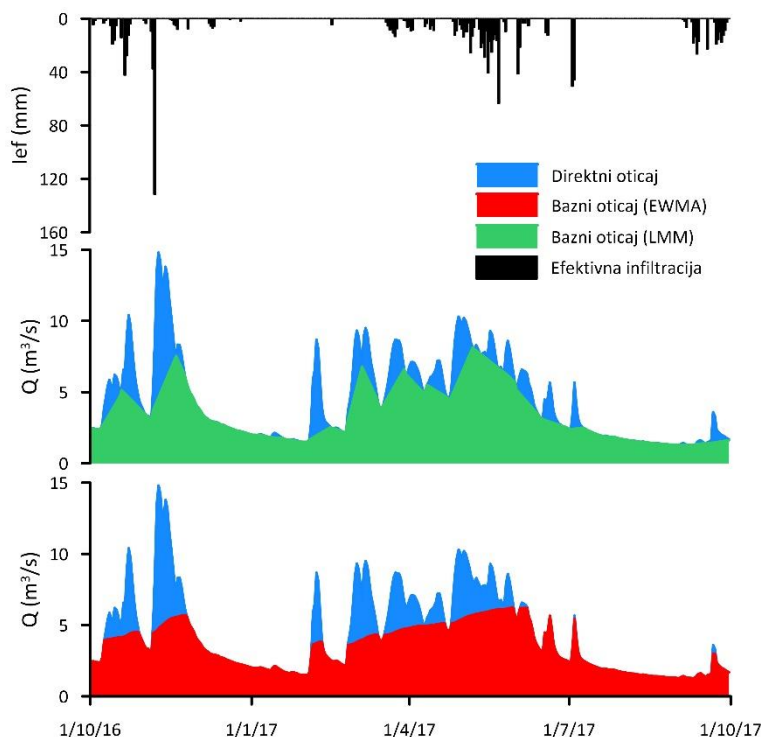
6.7.7.5 Analiza baznog oticaja vrela

Primena LMM metode uključila je parametar f od 0,9, i parametar N koji u slučaju vrela Bosne iznosi $N=3$. Analizom je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Bosne 13,3 m³/s, minimalna 1,28 m³/s, a srednja vrednost 4,11 m³/s. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,14 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,845 što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema vrela Bosne prosečno čini 84,5% ukupnog oticaja ovog sistema, prema LMM metodi.

Primena EWMA filtera uključila je srednju vrednost koficijenta recesije poslednjih mikrorežima pražnjenja karstnog sistema za period 2015-2018. godine, koji su dati u tabeli 6.55, budući da je ocenjeno da se poslednji mikrorežimi pražnjenja javljaju u laminarnom hidrauličkom režimu tečenja, tokom kojeg ističe samo bazni oticaj na vrelu. Osrednjena

vrednosti koeficijenta recesije trećih mikrorežima iznosi $\alpha_{3av} = 0,013$, što je vrednost korišćena u proračunu baznog oticaja. Analizom baznog oticaja primenom EWMA filtera je dobijeno da je maksimalna vrednost baznog oticaja karstnog sistema vrela Bosne $9,09 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja vrednost $3,89 \text{ m}^3/\text{s}$. Indeks baznog oticaja oscilira od 0,01 do 1, tako da je prosečna vrednost indeksa baznog oticaja 0,8446, što bi značilo da bazni oticaj karstnog sistema vrela Bosne prosečno čini 84,46% ukupnog oticaja ovog sistema, prema EWMA filteru.

Rezultati primene razdvajanja hidrograma vrela Bosne dati su na sl. 6.128 za hidrološku 2016-2017, imajući u vidu da je tokom te godine preko 90% infiltrirane vode isteklo na vrelu (Tabela 6.53).



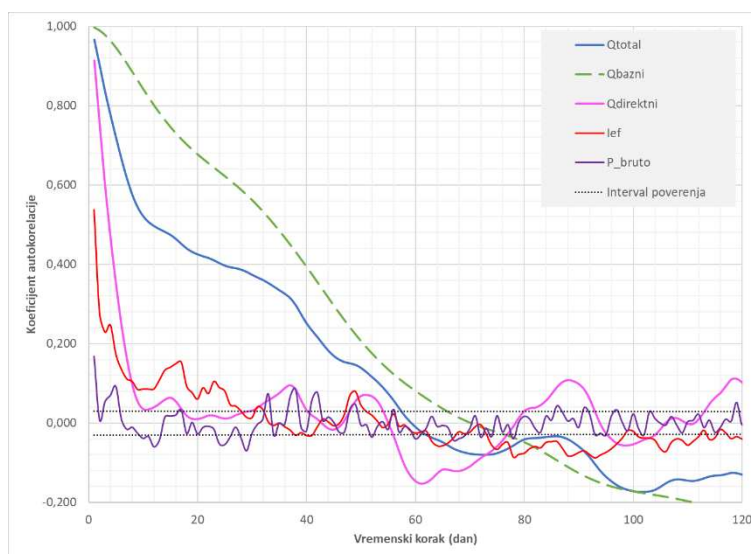
Sl. 6.128. Uporedni prikaz baznog oticaja proračunatog na osnovu metode lokalnog minimuma (LMM) i EWMA filtera, direktnog oticaja i efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Bosne za 2016-2017

Ukoliko se uporede vrednosti baznog oticaja prema dve korišćene metode, može se ustanoviti da su dobijeni indeksi baznog oticaja praktično identični. Ipak, za dalju analizu biće iskorišćene vrednosti dobijene LMM metodom, budući da minimalna vrednost baznog oticaja korespondira sa minimalnom izdašnošću vrela. Stoga, indeks baznog oticaja se procenjuje na 0,845 što znači da bazni oticaj doprinosi 84,5% izdašnosti vrela, a 15,5% dolazi na račun direktnog oticaja. Uvidom na komparativni dijagram na sl. 6.128 jasno se može videti veliki udeo baznog oticaja u ukupnom hidrogramu, što ukazuje na značajan rezervoar karstnog sistema vrela Bosne, odnosno na sifonalnu cirkulaciju i isticanje podzemnih voda, kojom na vrelu prvo ističu vode već akumulirane u sistemu usled prenošenja pritiska, pa tek onda novoinfiltrirane.

6.7.7.6 Analiza vremenskih serija isticanja i prihranjivanja karstnog sistema

Analiza vremenskih serija je izvršena je za celokupni period osmatranja (2015 – 2018), kao i zasebno za sušnu (2016-2017) i vlažnu (2015-2016) hidrološku godinu, sa maksimalnim vremenskim korakom od 120 dana za ukupni period, odnosno 100 dana za sušni i vlažnu godinu.

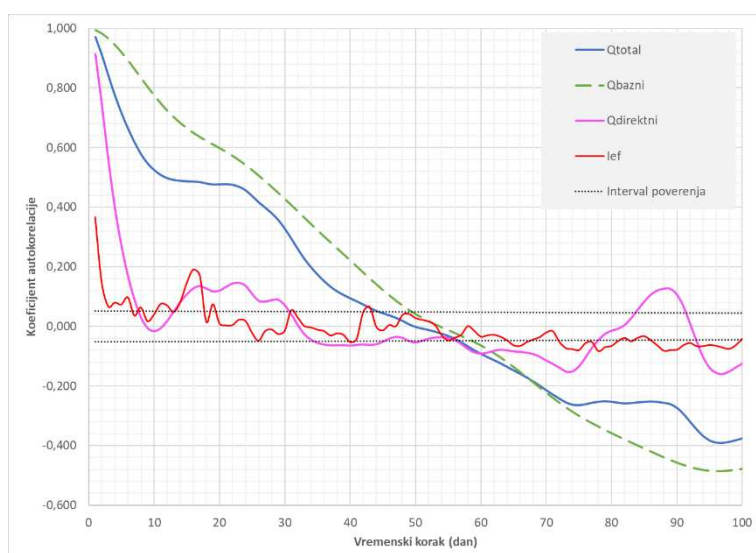
Autokorelaciona funkcija za ukupni, direktni i bazni oticaj vrela Bosne, kao i za bruto izmerene padavine na stanici Bjelašnica i efektivnu infiltraciju za ceo period osmatranja prikazan je na sl. 6.129. Autokorelogram ukupnog i baznog oticaja imaju veoma sličan nagib, što ukazuje na dominaciju baznog oticaja pri formiranju izdašnosti vrela Bosne, te se može zaključiti da sistem ima značajnu retencionu moć, tj. da može akumulirati velike količine vode. Istovremeno, jasno je da se radi o sifonalnoj cirkulaciji koja omogućava amortizaciju intenzivnih pikova efektivne infiltracije, koji se prvo „utroše“ na popunjavanje rezervi i povećanje hidrostatičkog pritiska u sistemu, što ima za posledicu povećanje izdašnosti na vrelu. Koeficijenti autokorelacije baznog i ukupnog oticaja postaju statistički beznačajni posle 51 (bazni) i 43 dana (ukupni oticaj), ukoliko se posmatra prag $r_k < 0,2$, odnosno 66 (bazni) i 58 dana (ukupni oticaj), ukoliko se posmatraju statistički intervali poverenja na bazi 95% verovatnoće.



Sl. 6.129. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Bosne, izmerenih bruto padavina i efektivne infiltracije za period oktobar 2015 – septembar 2018. god.

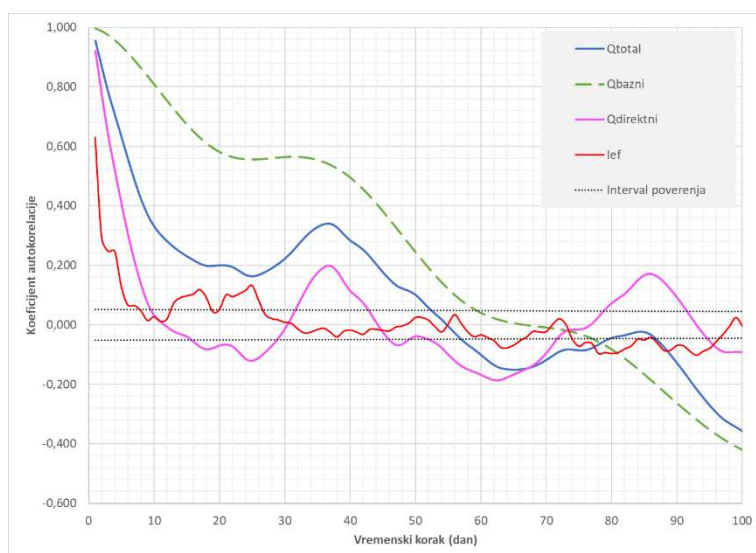
Autokorelogram direktnog oticaja pokazuje veoma strm nagib, tako da posle svega 7 dana gubi statističku značajnost ($r_k < 0,2$), dok se nekoliko puta vraća unutar intervala poverenja. Niska memorija vremenske serije direktnog oticaja potvrđuje činjenicu da se najveći deo izdašnosti vrela Bosne formira na račun prethodno akumulirane vode u sistemu, koja ističe usled povećanja pritiska prouzrokovanog nailaskom novog talasa efektivne infiltracije. Autokorelogram direktnog oticaja donekle korespondira sa autokorelogramom efektivne infiltracije, ukazujući da se pikovi prihranjivanja poklapaju sa pikovi direktnog oticaja.

Sl. 6.130 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Bosne, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2016 – 2017, koja je ocenjena kao sušna godina. Ovde je još uočljiviji sinhroni pad autokorelograma ukupnog i baznog oticaja, dok autokorelogram direktnog oticaja skoro poprima slučajni karakter, direktno zavistan od efektivne infiltracije. Koeficijenti autokorelacije ukupnog oticaja gube statističku značajnost posle 34 dana, baznog oticaja posle 41 dana, a direktnog oticaja posle svega 4 dana ($r_k < 0,2$), dok ukoliko se razmatraju intervali poverenja, statistička značajnost pada 44. dana (ukupni oticaj), 49. dana (bazni oticaj) i 8. dana (direktni oticaj).



Sl. 6.130. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Bosne i efektivne infiltracije za sušnu hidrološku godinu (2016 – 2017)

Sl. 6.131 prikazuje autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Bosne, kao i efektivnih infiltracija za hidrološku godinu 2015 – 2016, koja je ocenjena kao vlažna godina.

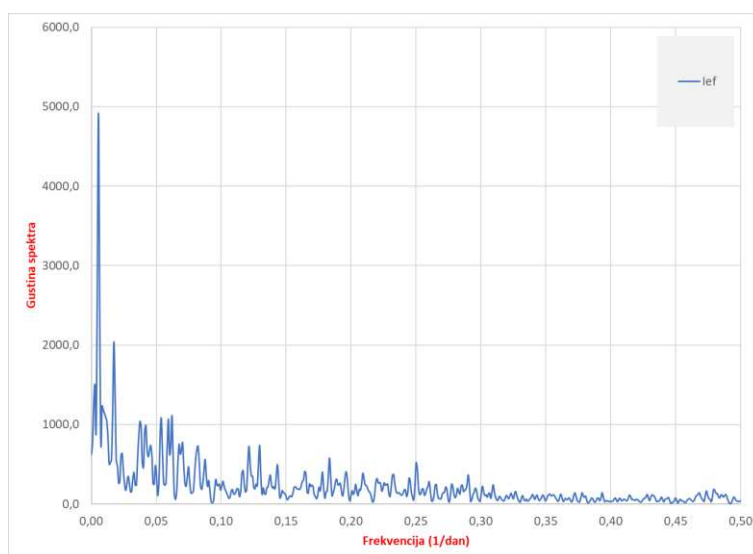


Sl. 6.131. Autokorelogram ukupnog, direktnog i baznog oticaja vrela Bosne i efektivne infiltracije za vlažnu hidrološku godinu (2015 – 2016)

Autokorelogrami ukupnog i baznog oticaja i dalje imaju isti nagib, a sa njima je ovoga puta sinhron i autokorelogram direktnog oticaja. Razlog za to je verovatno što je sistem pun, budući da se radi o vlažnoj hidrološkoj godini, tako da nailaskom efektivne infiltracije, ona se ne troši na popunjavanje rezervi (koje su već pune), već dolazi do brže reakcije sistema i isticanja viška vode sifonskim kanalom na površinu terena. Napunjenost sistema najbolje se uočava ukoliko se posmatra memorija vremenske serije baznog oticaja, koja dostiže statistički prag ($r_k < 0,2$) tek 52. dana, dok su memorije direktnog i ukupnog oticaja kraće (7 dana direktni, a 17 dana ukupni), sa pikom 37. dana.

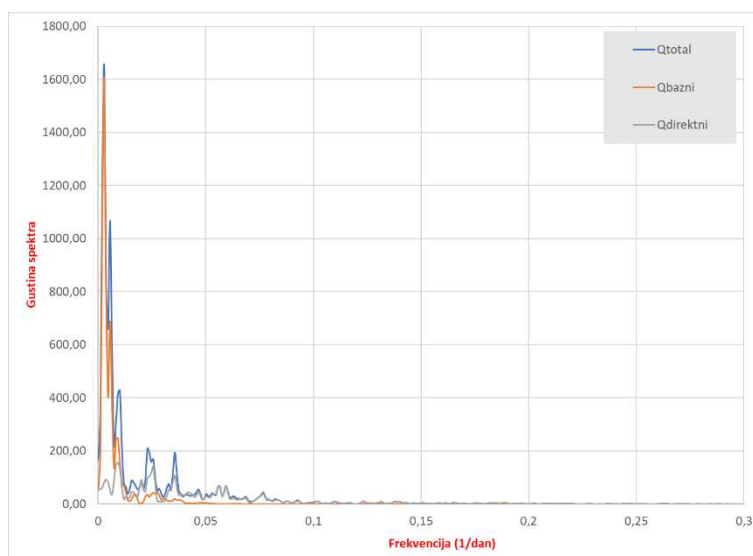
Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Bosne prikazana je na sl. 6.132, sa koje se vidi da sistem ima veoma dobre mogućnosti amortizacije ulaznog impulsa. Dijagram spektralne gustine pokazuje 5 najfrekventnijih pikova: 0.002737, 0.005474, 0.017336, 0.059307 i 0.062044 dan⁻¹, koji odgovaraju vremenskim periodima od 365, 182, 57

i 16 dana, tj. godišnjim, polugodišnjim dvomesečnim i dvonedeljnim ciklusima. Frekvencije iznad od 0.1 dan^{-1} imaju slučajni karakter efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Bosne.



Sl. 6.132. Spektralna funkcija gustine efektivne infiltracije karstnog sistema vrela Bosne za period 2015 – 2020

Spektralna funkcija gustine primenjena je na vremenske serije ukupnog, direktnog i baznog oticaja, razdvojenog na osnovu metode lokalnog minimuma za ceo period osmatranja (2015 – 2018), a prikazana je na sl. 6.133. Sa dijagrama 6.133 uočljivo je poklapanje spektralnog opsega baznog i ukupnog oticaja, kao i njihove visoke frekvencije, što još jednom potvrđuje dominaciju baznog oticaja pri akumulaciji rezervi ovog karstnog sistema i formiranju izdašnosti vrela Bosne.



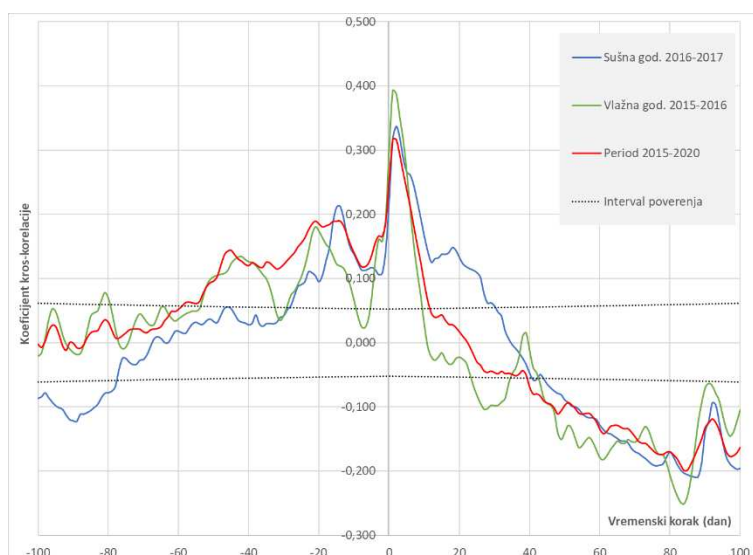
Sl. 6.133. Spektralna funkcija gustine ukupnog, direktnog i baznog oticaja karstnog sistema vrela Bosne u periodu 2015 – 2018 godina

Bazni i ukupni oticaj imaju velike oscilacije u visokofrekventnom opsegu, dok direktni oticaj oscilira pri srednjim i niskim frekvencijama, što ukazuje na njegovu podređenu ulogu u formiranju izdašnosti vrela. Spektar ukupnog oticaja javlja se u frekventnom opsegu ispod 0.15 dan^{-1} , sa karakterističnim pikovima za ukupni oticaj od 0.001825, 0.002738, 0.005474, 0.010036 i 0.035584 za odgovarajuće periode od 548, 365, 182, 99 i 28 dana, što ukazuje 1.5-godišnji, godišnji, šestomesečni, kvartalni i mesečni ciklus ukupnog oticaja. Idenični pikovi se

javljaju i za baznu komponentu hidrograma, uz odsustvo mesečnog ciklusa. Sa druge strane, spektralna funkcija gustine direktnog oticaja pokazuje drugačije frekvencije (0.008212, 0.010036, 0.020073, 0.025547 i 0.035584) koje odgovaraju broju dana od 121, 99, 49, 39 i 28, tj. radi se o kvartalnom i mesečnom ciklusu direktnog oticaja, što ukazuje na cikluse prihranjivanja sistema. Naime, mesečni ciklus najverovatnije odgovara prihranjivanju na račun kiše, dok se kvartalni ciklus odnosi na prihranjivanje infiltracijom otopljenog snega, koji je veoma bitan faktor pri efektivnoj infiltraciji karstnog sistema vrela Bosne.

Takođe, uočava se da pri frekvencijama višim od 0.0302 dan^{-1} , spektralna funkcija gustine baznog oticaja gubi statistički značaj, što odgovara broju dana od 34, dok statistička značajnost direktnog i ukupnog oticaja prestaje nakon frekventnog opsega od 0.15 dan^{-1} , što odgovara periodu od 7 dana. Statistička značajnost od 34 dana za bazni oticaj donekle korespondira sa autokorelacijom baznog oticaja, dok se statistička značajnost od 7 dana za direktni oticaj u potpunosti slaže sa autokorelacionom funkcijom ove promenljive.

Kros-korelogram efektivne infiltracije sa isticanjem vrela Bosne tokom sušne (2016-2017) i vlažne (2015-2016) godine, kao i tokom celokupnog perioda osmatranja (2015-2018) prikazan je na sl. 6.134.



Sl. 6.134. Kros-korelacioni dijagram efektivne infiltracije i ukupnog isticanja vrela Bosne za sušnu i vlažnu hidrološku godinu, kao i za ceo period osmatranja 2015-2018

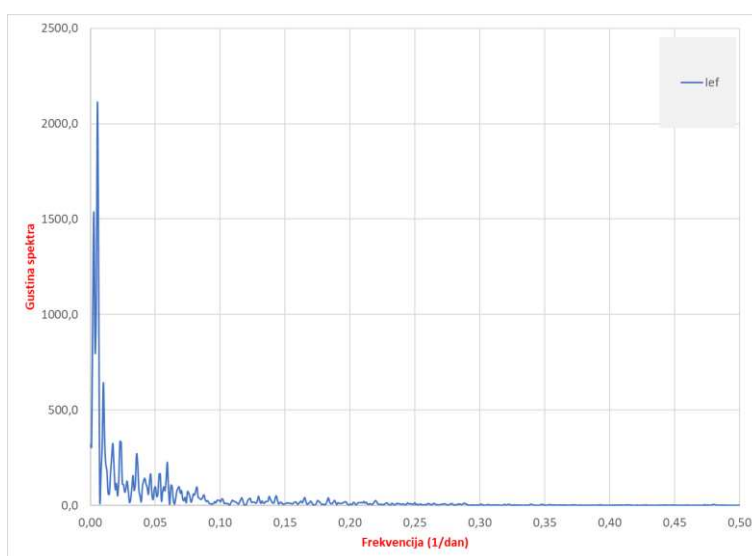
Sva tri kros-korelograma pokazuju pozitivnu asimetriju, ukazujući na period zakašnjenja reakcije sistema na ulazni signal. Kros-korelogram u vlažnoj godini, odnosno celom periodu dostiže pik sa jednim danom zakašnjenja, dok je u sušnoj godini zakašnjenje 2 dana. Reakcija sistema u vlažnoj godini od 1 dana objašnjava se popunjenošću sistema, kada nailaskom nove epizode efektivne infiltracije dolazi do povećanja hidrostatičkog pritiska u sistemu, koji se longitudinalno prenosi kroz ceo sistem izazivajući reakciju na vrelu u vidu povećanja izdašnosti. Sa druge strane, identična situacija se dešava i tokom sušne godine, međutim sa još jednim danom zakašnjenja, koliko je potrebno da se sistem dovoljno napuni kako bi se prouzrokovalo longitudinalno prenošenje pritiska dalje kroz sistem do vrela Bosne. Stoga, u sušnoj godini sistemu su potrebna dva dana da reaguje na ulazni impuls u vidu povećanja izdašnosti vrela.

Ukoliko se usvoji prag značajnosti od 0,2 (Mangin, 1984; Ristić Vakanjac, 2015), statistička značajnost koeficijenta korelacije u sušnoj godini prestaje nakon 9 dana, u vlažnoj godini i celom periodu osmatranja nakon 7 dana, što ukazuje na vreme reakcije slivnog područja na

intenzivnu kišnu epizodu. Nagib sva tri kros-korelograma je veoma strm prvih 12 dana, dok posle toga dolazi do amortizacije ulaznog signala u vidu popunjavanja rezervi u sistemu.

Kros-amplitudna funkcija vrela Bosne (Sl. 6.135) pokazuje stepen prigušenja impulsnog signala, što se na dijagramu može videti u zoni visokih frekvencija. Gustina spektra se asimptotski približava nultoj vrednosti za frekvencije više od $0,3 \text{ dan}^{-1}$ (3.33 dana), što govori o periodu potrebnom za amortizaciju ulaznog impulsa. Kros-amplitudna funkcija ukazuje na visoku apsorpcionu moć karstnog sistema vrela Bosne, odnosno na veliku mogućnost amortizacije ulaznog signala i brzom transformaciji efektivne infiltracije u rezerve sistema.

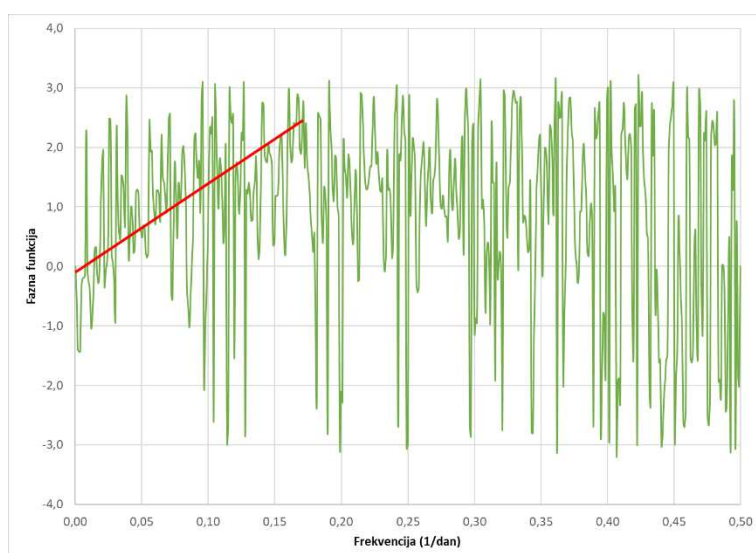
Pikovi koji se javljaju u visokofrekventnom opsegu ($f > 0.1$) odgovaraju uticaju direktne komponente hidrograma, a to je u slučaju vrela Bosne vrednost 0.143248 koja odgovara periodu od 6.98 dana, što se slaže i sa vrednostima dobijenim autokorelacionom funkcijom. Sa druge strane, visoke oscilacije pikova u zoni niskih frekvencija odgovaraju baznoj komponenti oticaja vrela, gde se mogu uočiti pikovi od 0.002738, 0.005474 i 0.010036 koje odgovaraju periodima od 365 (godišnji ciklus), 182 dana (polugodišnji ciklus) i 99 dana (tromesečni ciklus).



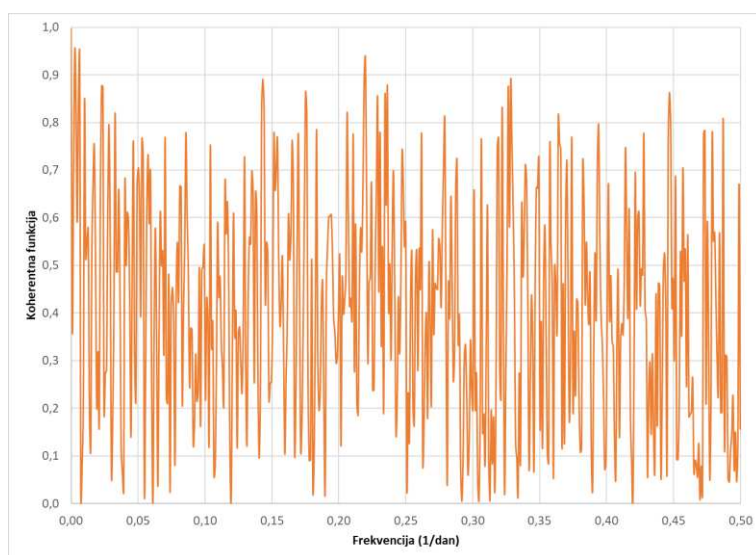
Sl. 6.135. Kros-amplitudna funkcija izdašnosti vrela Bosne za period 2015 – 2018. godina

Fazna funkcija isticanja prikazana je na sl. 6. 136, sa koje se uočava da je funkcija nesortirana i nekoherentna pri frekvencijama iznad $f = 0.2 \text{ dan}^{-1}$, dok se pozitivan linearni trend javlja pri frekvencijama od 0 do 0.171533, što odgovara periodu od 6 dana. Ovaj broj dana pokazuje vreme reakcije vrela na ulazni impuls, što je skoro identičan broj dana dobijem u okviru kros-korelacione i kros-amplitudne analize.

Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne prikazana je na sl. 6.137, sa koje se vidi da vrednosti koherentne funkcije osciliraju u širokom frekventnom dijapazonu, ukazujući na nelinearni karakter sistema. Srednja vrednost koherentne funkcije je 0,46. Sa dijagrama koherentne funkcije se može uočiti i značajan pad vrednosti pri frekvenciji od $0,091241 \text{ dan}^{-1}$ (tj. 10.95 dana), što odgovara vremenu uticaja direktnog oticaja na ukupni sistem, što je nešto viša vrednost nego što je dobijena prethodnim analizama, ali generalno korespondira sa njom.



Sl. 6.136. Fazna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne za period 2015-2018

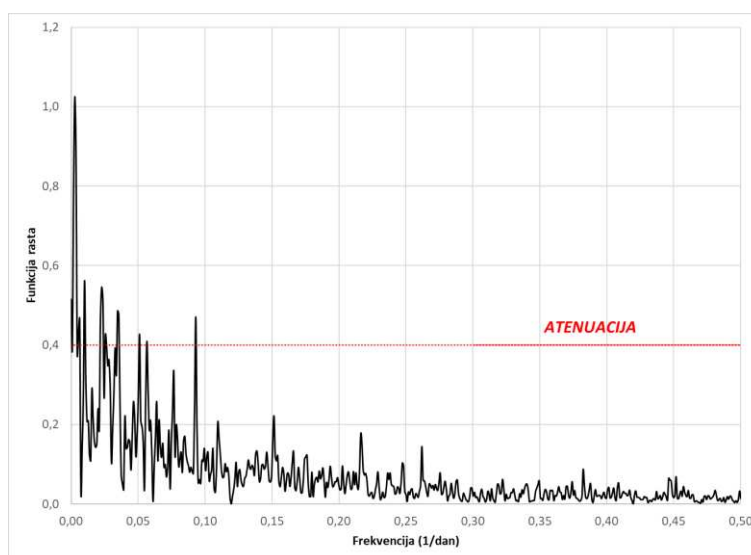


Sl. 6.137. Koherentna funkcija isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne za 2015-2018

Sl. 6.138 prikazuje funkciju rasta isticanja podzemnih voda vrela Bosne, pokazujući pik iznad vrednosti 1 pri frekvenciji od 0.002737, što odgovara godišnjem ciklusu. Naime, vrednosti iznad 1 pokazuju uticaj bazne komponente hidrograma, čime je još jednom potvrđen veliki uticaj akumulirane vode u sistemu vrela Bosne, koja ističe u vidu baznog oticaja. Dodatno tome u prilog ide i sortiranost funkcije rasta, gde se jasno uočava filtriranje efektivne infiltracije. Dijagram pokazuje vrednosti funkcije rasta iznad 0.4, što je prag koji definiše uticaj direktnog oticaja na ukupni oticaj, tako da se može videti da se poslednji pik iznad 0.4 javlja pri frekvenciji od 0.0933066 što odgovara periodu od 10,71 dana, što se slaže sa prethodnim analizama uticaja direktne komponente na hidrogram vrela Bosne.

Na osnovu izvršenih kvantitativnih analiza, može se uočiti da je karstni sistem vrela Bosne dobro karstifikovan, sa dubokim zaleganjem sifonskog kanala, tj. dubinskom sifonalnom cirkulacijom podzemnih voda. Prosečna vrednost korigovanih kišnih padavina sa vodenim ekvivalentnom snega koji se infiltrira u sistem iznosi od 1633,1 mm na područjima sa vegetacijom, do 2655,5 mm na područjima bez vegetacije. Prosečna vrednost efektivne infiltracije za period 2015-2018 godina iznosi 1449,5 mm. Prosečna potencijalna evapotranspiracija tokom perioda 2015-2018 iznosi 322,7 mm, dok stvarna evapotranspiracija

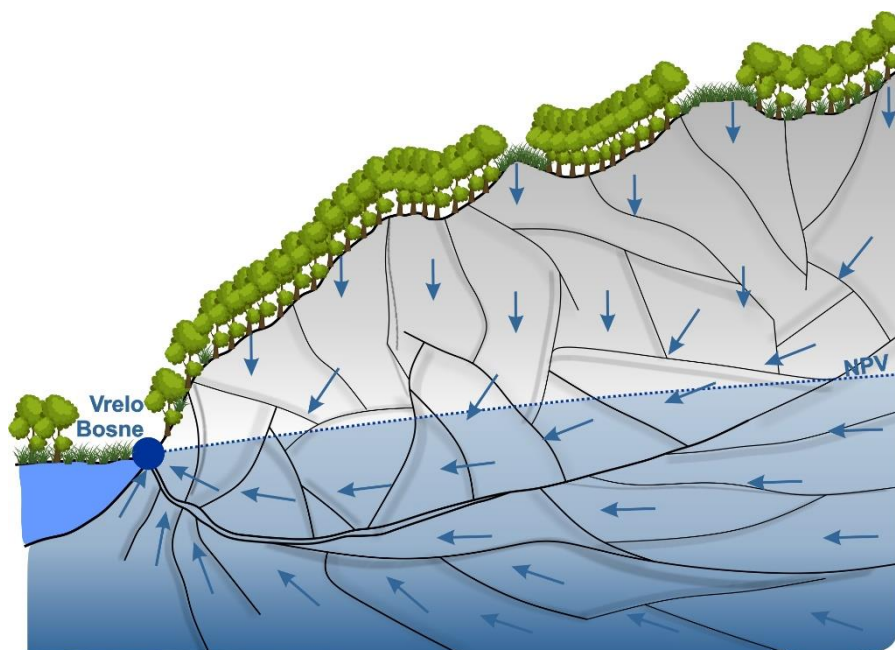
oscilira od 306 mm do 308 mm na prostoru bez vegetacije. Procentualno izraženo u odnosu na korigovanu kišu i otopljeni sneg, stvarna evapotranspiracija iznosi 11,6% na području bez vegetacije, tj. 18,7% na prostoru sa vegetacijom. Ukoliko se razmatra vegetacioni indeks od 0,89, može se proračunati da prosečna stvarna evapotranspiracija (tj. gubici) na celom slivnom području iznosi 18%, a da posledično efektivna infiltracija iznosi prosečno 82% (89,1% na prostoru vez vegetacije, tj. 81,9% na prostoru sa vegetacijom). Ipak, ovolika vrednost efektivne infiltracije je posledica intenzivnog otapanja snega i infiltracije, te se može očekivati da je procenat efektivne infiltracije nešto niži.



Sl. 6.138. Funkcija rasta isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrele Bosne za period 2015-2018

Analizirajući osnovne statističke parametre vremenske serije isticanja podzemnih voda, može se ustanoviti da izdašnost oscilira od 1,28 m³/s do 16,75 m³/s, sa medijalnom vrednošću od 4,35 m³/s. Analizom krive trajanja očekivani ekstremni poplavni talasi koji se javljaju u 1% vremena iznose 14,1 m³/s, dok vrelo u ekstremno sušnom periodu (Q₉₉) ističe u iznosu od 1,29 m³/s. Tokom recesionog perioda, mogu se izdvojiti dva mikrorežima pražnjenja, koji se javljaju u sličnim uslovima cirkulacije, tj. laminarnom režimu tečenja. Prosečna zapremina istekle vode iznosi 12,87 x 10⁶ x m³/s. Prosečna vrednost baznog oticaja, prema LMM metodi iznosi 4,11 m³/s, dok bazni oticaj ima prosečan udeo od 84,5% u ukupnom isticanju podzemnih voda ovog karstnog sistema.

Korelacione i (kros)spektralne funkcije omogućile su izvođenje generalnih zaključaka o funkcionisanju karstnog sistema vrele Bosne. Ovaj sistem odlikuje se veoma dobrom razvijenošću, tako da su mu akumulativne sposobnosti velike. Takođe, vrelo je ascedentnog tipa, te se odlikuje dubokom sifonalnom cirkulacijom koja omogućava balansiran kvantitativni režim i amortizaciju intenzivnih epizoda efektivne infiltracije (Sl. 6.139). Reakcija sistema na prihranjivanje zavisi od hidrološkog stanja, tj. od popunjenosti rezervi, te vrelo reaguje povećanom izdašnošću nakon 1 dana u vlažnoj godini, tj. nakon 2 dana u sušnoj. Dodatno vreme je tokom sušne godine potrebno, budući da se prvo popunjavaju rezerve u sistemu, da bi se dostizanjem neophodnog nivoa podzemnih voda povećao hidrostatski pritisak koji se prenosi do sifonskog kanala, što prouzrokuje povećanje izdašnosti na vrelo.



Sl. 6.139. Konceptualni model karstnog sistema vrela Bosne

Velika retenciona moć karstnog sistema potvrđena je autokorelacionom funkcijom, gde se vidi sinhroni pad bazne komponente hidrograma i ukupnog oticaja. Takođe, komparativni dijagram efektivne infiltracije i izdašnosti vrela Bosne ukazuje da reakcija sistema, osim intenziteta prihranjivanja zavisi i od vida prihranjivanja, tj. da li se radi o kišnim ili snežnim padavinama. Naime, jedinične kišne epizode jasno se uočavaju na dijagramu efektivne infiltracije, tako da izazivaju individualne pikove izdašnosti, dok sa druge strane, prihranjivanje na račun otopljenog snega je manjeg intenziteta, ali dužeg vremenskog trajanja, što takođe prouzrokuje povećanje izdašnosti na vrelu, ali manjeg intenziteta. Stoga, snežne padavine imaju veoma bitnu ulogu u formiranju rezervi i izdašnosti karstnog sistema vrela Bosne.

Kritična vrednost izdašnosti iznad koje se cirkulacija podzemnih voda dešava u turbulentnom režimu ocenjena je na osnovu izdašnosti vrela tokom recesionih perioda, kao i analizom baznog oticaja na osnovu LMM metode. Ova vrednost je ocenjena na nivou od $Q_{kr} = 1.28 \text{ m}^3/\text{s}$, tako da se isticanje ispod te vrednosti dešava u laminarnim, a iznad u turbulentnom režimu. Ova vrednost odgovara frekvencijama od 99% isticanja, dobijenim analizom kriva trajanja protoka podzemnih voda, dok ova vrednost odgovara i minimalnom baznom oticaju.

6.7.8 Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne

Karakterizacija kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne izvršena je na osnovu kompletnih i skraćenih hemijskih analiza koje su urađene u periodu 2020 – 2021. godina od strane Zavoda za javno zdravstvo kantona Sarajevo (ZZJZ) i hemijskih analiza koje su izvršene u sklopu prethodnih hidrogeoloških istraživanja (Sliškić, 1983; Skopljak 2006; Skopljak & Zolj, 2020). Uzorkovanje je u navedenom periodu vršeno na mesečnom nivou.

Hemijske analize su pokazale da su podzemne vode karstnog sistema vrela Bosne veoma dobrog prirodnog kvaliteta, budući da je reč o vodama bez boje, ukusa i mirisa, odnosno da su sve makrokomponente ispod MDK. Hemijski sastav podzemnih voda koje ističu na vrelu Bosne je postojan, budući da se komparacijom hemijskih analiza iz 80ih godina prošlog veka i iz perioda 2018-2021 može zaključiti da vrednost parametar osnovnih katjona i anjona veoma malo razlikuje.

Ono što je u poslednje vreme u fokusu ispitivanja kvaliteta podzemnih voda vrela Bosne jeste mikrobiološka (ne)ispravnost ovih voda, odnosno prisustvo bakterija. Naime, praktično sve analize koje je izvršio ZZJZ u periodu 2020-2021. godina su pokazale prisustvo bakterija u podzemnoj vodi vrela Bosne, ukazujući na njenu mikrobiološku neispravnost. Među vrstama bakterija ističu se *Escherichia coli*, *Enterococcus spp*, koliformne bakterije i *Pseudomonas aeruginosa*, a uzrok za pojavu bakteriološke neispravnosti podzemne vode vrela Bosne može se tražiti u odsustvu kanalizacione infrastrukture na planinama Igman i Bjelašnica, na kojima se najvećim delom prihranjuje karstni sistem vrela Bosne.

Neznatne oscilacije kvaliteta podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne ukazuje na postojan kvalitet ovih voda u vremenu. Tako, mutnoća podzemnih voda oscilira od 0,2 do 1,4 NTU, s tim da treba istaći činjenicu da je tokom osmatračkog perioda samo jednom zabeležena vrednost mutnoće iznad 1 NTU, što potvrđuje činjenicu o velikom rezervoaru podzemne vode ovog karstnog sistema i sifonalnoj cirkulaciji. Takav zaključak ističu i Čičić & Skopljak (2004).

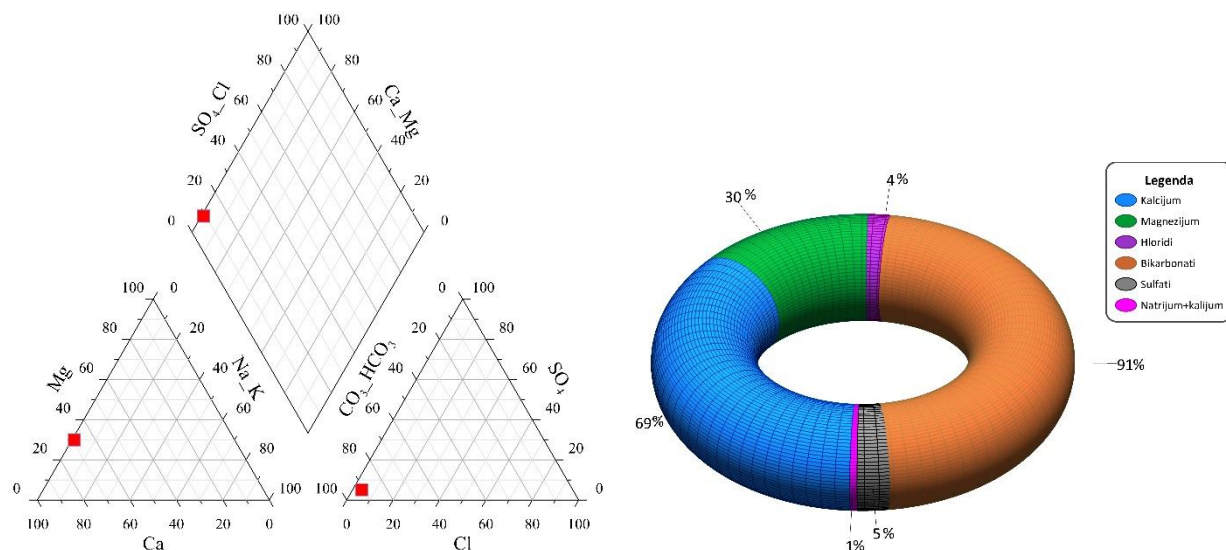
Varijacija pH vrednosti praktično odsustvuje, budući da je uvek reda veličine 7,6, odnosno da je oscilirala u osmatračkom periodu od 7,4 do 7,9. Specifična provodljivost varira u granicama od 230 do 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tvrdoća voda je reda veličine 9° dH. Ukupna mineralizacija podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne je reda veličine 250 mg/l (Slišković, 1983; Skopljak 2006; Skopljak & Zolj, 2020), ukazujući na malomineralizovane karstne podzemne vode. Sadržaj elemenata azotne trijade, amonijaka i utroška kalijum-permanganata ispod MDK i odsustvo metala dokazuje izuzetan prirodni kvalitet podzemnih voda ovog sistema.

Prema jonskom sastavu, jasno se vidi da hidrokarbonatni jon dominira u anjonskom sastavu (170,8 – 184 mg/l ili prosečno 91%ekv), dok primat u katjonskom sastavu ima kalcijum sa vrednošću od 45 mg/l, tj. prosečno 69%ekv. Među katjonima, veoma bitna je i koncentracija manganijuma koja je reda veličine 11,5 mg/l, tj. 30%ekv, što dokazuje prisustvo dolomita u karstnom sistemu vrela Bosne. Od ostalih makrokomponenti prisutni su natrijum (0,75 mg/l) i kalijum (0,25 mg/l ili prosečno 1%ekv zbirno sa natrijumom) od katjona, tj. sulfati (4,2 – 12 mg/l ili prosečno 5%ekv), odnosno hloridi od 1,2 do 12 mg/l, tj. prosečno 4%ekv, prema hemijskim analizama Sliškovića (1983), Skopljaka (2006), Skopljaka & Zolja (2020) i ZZJZ Kantona Sarajevo za period 2020-2021. godina

Grafički prikaz jonskog sastava podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne, prema prosečnim vrednostima katjona i anjona, dat je na Pajperovom i kružnom dijagramu hemijskog sastava (Sl. 6.140), kao i formulom Kurlova (6.9).

$$CO_{8,8}^2 M_{0,25} \frac{HCO_{91}^3}{Ca_{69} Mg_{30} Na + K_1} pH_{7,6} TV_9 T_{7,9} Q_{4230} \quad (6.9)$$

Na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne, može se konstatovati da su podzemne vode koje ističu na vrelu Bosne malomineralizovane, dosta tvrde i da pripadaju hidrokarbonatno-kalcijumsko-magnezijumskoj grupi, sa povišenim sadržajem koliformnih i bakterija *Escherichia coli*, *Enterococcus spp* i *Pseudomonas aeruginosa*. Niske oscilacije fizičko-hemijskih parametara i makrokomponenti ukazuju na postojan hemizam voda u vremenu i veoma dobar prirodni kvalitet podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne, koje su dosta opterećene antropogenim zagađujućim faktorom usled nepostojanja adekvatne kanalizacione infrastrukture na Igmanu i Bjelašnici.



Sl. 6.140. Pajperov trilinearni (levo) i kružni (desno) dijagram hemijskog sastava podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne na osnovu prosečnih vrednosti jonskog sastava u %ekv (prema Slišković, 1983; Skopljak 2006; Skopljak & Zolj, 2020; ZZJZ 2020-2021. god.)

Karakterizacijska tabela koja sublimira sve podatke o karstnom sistemu vrela Bosne, prikazane u prethodnim analizama data je u Prilogu 14 ovog rada.

7 PRIMENA METODOLOGIJE OCENE PRITISAKA NA KARSTNE PODZEMNE VODE

7.1 Ocena kvantitativnih pritisaka na karstne podzemne vode odabranih karstnih sistema

Bilansiranje podzemnih voda karstnih sistema vrela Perućac, Seljašnica, Mokra, Mlave, Oka Bijele, Rijeke Crnojevića i Bosne predstavljalo je inicijalni korak pri evaluaciji pritisaka na kvantitet. Ocena bilansa karstnih podzemnih voda je, osim za analizu kvantitativnih pritisaka, esencijalna i za sve buduće inženjerske korake, kao i pri kreiranju koncepta upravljanja podzemnim vodama karstnih sistema (Stevanović, 2015c).

Bilans podzemnih voda navedenih karstnih sistema proračunat je na osnovu jednačine (4.40) prema metodologiji izloženoj u poglavlju 4.3.2.1, dok su rezultati prikazani u tabeli 7.1. Vrednosti korigovanih padavina i stvarne evapotranspiracije su svedene na jedinstvenu vrednost korišćenjem vegetacionog indeksa za svaki karstni sistem.

Tabela 7.1. Bilans podzemnih voda karstnih sistema Perućac, Seljašnica, Mokra, Mlava, Oka Bijele, Rijeke Crnojevića i vrela Bosne, Legenda: F – površina sliva; P_{av} – prosečna godišnja suma korigovanih padavina i vodenog ekvivalenta snega; AET_{av} – prosečna godišnja suma stvarne evapotranspiracije; Q_{av} – prosečna godišnja izdašnost vrela; Q – godišnja zapremina istekle vode; ΔS – promena rezervi u sistemu

Lokacija	F (km ²)	P_{av} (mm)	$\frac{P_{av}}{x 10^6}$ (m ³)	AET_{av} (mm)	$\frac{AET_{av}}{x 10^6}$ (m ³)	Q_{av} (m ³ /s)	$\frac{\Sigma Q}{x 10^6}$ (m ³ /god)	$\frac{\Delta S}{x 10^6}$ (m ³ /dan)
PERUĆAC	75	1252,4	93,9	450,2	33,8	1,88	59,3	0,88
%		100		35,9		63,1		0,9
SELJAŠNICA	42	1151,4	48,36	518,3	21,8	0,9	28,38	-1,79
%		100		45,0		58,7		-3,7
MOKRA	40	738,8	29,5	323,4	12,9	0,52	16,5	0,09
%		100		43,8		55,9		0,3
MLAVA	115	1119,9	128,8	586,2	67,41	1,41	44,5	16,9
%		100		52,3		34,5		13,1
OKO BIJELE	23	3343	76,9	459,3	10,56	1,606	50,6	15,7
%		100		13,7		65,8		20,4
RIJEKA CRNOJEVIĆA	69	6309,5	435,4	555,7	38,4	5,63	177,6	219,5
%		100		8,8		40,8		50,4
VRELO BOSNE	117	1745,5	204,4	306,2	35,8	5,29	166,8	1,58
%		100		17,5		81,7		0,8

Iz tabele 7.1 može se videti da prosečna godišnja zapremina istekle vode na vrelu Perućac u periodu 1. oktobar 2015 – 30. septembar 2020. godine čini 63,1%, a stvarna evapotranspiracija 35,9% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovanih kiša i ukupnog snega preračunatog u vodeni ekvivalent. Stoga, može se zaključiti da efektivna infiltracija u okviru karstnog sistema Perućac iznosi 63%. Takođe, može se videti da se pri bilansiranju karstnih podzemnih voda javila razlika od $0,88 \times 10^6$ m³/dan, odnosno 0,9%. Ova vrednost zapravo predstavlja promenu rezervi u sistemu, te je oko 880.000 m³ podzemne vode prosečno ostalo akumulirano u karstnom sistemu vrela Perućac u periodu 2015 – 2020. godine.

Prosečna godišnja zapremina istekle vode na karstnom vrelu Seljašnice u periodu 2015 – 2020. godine čini 58,7%, a stvarna evapotranspiracija 45% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovanih kiša i ukupnog snega preračunatog u vodeni ekvivalent. Budući da je proračun efektivne infiltracije izvršen do skoro idealne kalibracije sa vrednostima isticanja, može se reći da je vrednost efektivne infiltracije u okviru karstnog sistema Seljašnice 58,7%. Takođe, može se uočiti da se pri bilansiranju karstnih podzemnih voda javila razlika od $-1,79 \times 10^6$ m³/dan, odnosno -3,7% što bi značilo da je toliko vode više isteklo u razmatranom periodu nego što je infiltrirano. Ova činjenica se može objasniti ili značajnim rezervoarom podzemnih voda u sistemu, koje su akumulirane u periodu pre 1. oktobra 2015. godine ili površinskim doticajem određene količine površinskih voda sa alogenog dela sliva, koji bi na prostoru Seljašnice podrazumevao andezite Gornjih Babina na severoistočnom delu sliva (videti Prilog 3).

Prosečna godišnja zapremina istekle vode na karstnom vrelu Mokra u periodu 2015 – 2020. godine čini 55,9%, dok stvarna evapotranspiracija čini 43,8% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovanih kišnih padavina i ukupnog snega preračunatog u vodeni ekvivalent. Stoga, veličina efektivne infiltracije u okviru karstnog sistema vrela Mokre je 55,9%. Može se uočiti i da se pri bilansiranju karstnih podzemnih voda javila razlika (tj. promena rezervi u sistemu) od $0,09 \times 10^6$ (tj. 90.000) m³, odnosno 0,31% što bi značilo da se toliko vode više infiltriralo u sistem nego što je isteklo u periodu razmatranja, tako da to mogu predstavljati rezerve podzemnih voda u karstnom sistemu vrela Mokre, koje su akumulirane u periodu 2015 – 2020.

Bilansnim proračunom za karstni sistem vrela Mlave ustanovljeno je na vrelu Mlave istekne 34,5% od vrednosti koja uključuje korigovane kiše i otopljeni sneg na prostoru Crnog Vrha. Ova vrednost ne može predstavljati efektivnu infiltraciju karstnog sistema vrela Mlave, s obzirom na značajnu razliku od 13,1%, tj. $16,9 \times 10^6$ m³, koja je sračunata u bilansu. Razlika od 13,1% podrazumeva rezerve akumulirane u sistemu, tj. površinski oticaj koji se javlja u zaleđu vrela i podzemni oticaj koji se javlja prelivanjem voda u susedne slivove tako da, osim na vrelu Mlave vode gravitiraju ka vrelima Belosavac, Živkova rupa i Suvi do. Stoga, efektivna infiltracija karstnog sistema vrela Mlave uključuje zbir procentualno istekle na vrelu Mlave (34,5%) i procenta voda koji se utroši na ostale elemente bilansne jednačine (13,1%), te bi efektivna infiltracija u okviru karstnog sistema vrela Mlave iznosila 47,7%. Procentualna vrednost gubitaka, koji uključuju stvarnu evapotranspiraciju iznosi 52,3% na prostoru slivnog područja vrela Mlave.

Karstni sistem vrela Oko Bijele ima mnogo veće vrednosti efektivne infiltracije kada se uporedi sa prethodnim primerima. Naime, prosečna godišnja zapremina istekle vode na karstnom vrelu Oko Bijele u periodu 2015 – 2020. godine čini 65,8%, dok stvarna evapotranspiracija iznosi 13,7% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovanih kišnih padavina i ukupnog snega preračunatog u vodeni ekvivalent. Ukoliko se razmatra i razlika u zapremini između ulaza i izlaza iz sistema od 20,4% (tj. $15,7 \times 10^6$ m³), a koja se potroši na akumuliranje rezervi u sistemu, a pre svega na površinski i podzemni oticaj, može se zaključiti o vrednosti efektivne infiltracije koja uključuje zbir ovih vrednosti, tj. 86,3%. Ovako visok procenat verovatno nije realan, već je za oko 10% niži. Takođe, značajna razlika koja se dobija bilansnim proračunom se može smatrati realnom, budući da se podizanjem nivoa podzemnih voda aktiviraju izvori na višim kotama, te se infiltrirane vode ne dreniraju samo na vrelu Oko Bijele, već u zaleđu vrela formirajući povremene površinske tokove. Procentualna vrednost gubitaka na stvarnu evapotranspiraciju iz sistema vrela Oko Bijele iznosi 13,7%.

Bilans podzemnih voda karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića pokazuje da prosečna godišnja zapremina istekle vode na ovom vrelu čini 40,8%, dok stvarna evapotranspiracija čini 8,8% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovane kiše i vodenog ekvivalenta snega.

Takođe, i ovde se uočava veoma velika razlika dobijena pri bilansnom proračunu od 50,4%. To bi značilo da veoma malo padavina ispravi sa površine terena, a da se većina padavina infiltrira u podzemlje, budući da procenat efektivno infiltriranih voda iznosi 91,2%, ukoliko se saberu procenti voda koji isteknu na samom vrelu i procenat voda koji istekne u vidu površinskog i podzemnog oticaja. Ipak, vrednost efektivne infiltracije od 90% treba uzeti sa rezervom, budući da ovako visoki procenti se čini velikim, čak i za dobro karstifikovane krečnjake i dolomite koji grade karstni sistem vrela Rijeke Crnojevića. Stoga, verovatno je vrednost efektivne infiltracije predimenzionisana, tako da je realnije očekivati da je stvarna efektivna infiltracija niža, i da je reda veličine oko 80%, a da je stvarna evapotranspiracija oko 20%. Pomenuta pozitivna razlika od 50,4% između ulaznih i izlaznih parametara bilansne jednačine ukazuje na činjenicu da skoro polovina infiltrirane vode ostane u sistemu u vidu rezervi, odnosno površinski i podzemno istekne iz sistema. Takva situacija je vrlo verovatno, posebno ako se uzme u obzir da se nivoi podzemnih voda ovog sistema veoma brzo podižu pri obilnim kišama, prouzrokujući isticanje voda u svim pećinama (Obodska, Lipska, Cetinjska, Miloševa) u zaleđu vrela, odnosno aktiviranje izvora u uvali Dobrskog sela i Cetinjskom polju. Na taj način, može se ustanoviti da količina vode koja istekne na vrelu Rijeke Crnojevića, a koja se jedina meri zapravo predstavlja manji deo voda koji se drenira iz ovog karstnog sistema.

Bilansiranje podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne pokazalo je da u periodu 2015-2020 godina prosečna godišnja zapremina istekle vode na ovom vrelu čini 81,7%, dok stvarna evapotranspiracija čini 17,5% prosečnih godišnjih suma padavina u vidu korigovane kiše i vodenog ekvivalenta snega. To bi značilo da vrednost efektivne infiltracije na slivnom području vrela Bosne, tj. u karstni sistem ovog vrela iznosi 81,7%, dok se gubici procenjuju na 17,5%. Ovako visoka vrednost efektivne infiltracije verovatno je rezultat obilnih snežnih padavina koje se izluče na prostoru Igmana i Bjelašnice, a koje mogu biti aktuelne čak 10 meseci godišnje. Sneg, pogotovo njegov otopljeni ekvivalent predstavlja veoma značajan parametar bilansne jednačine vrela Bosne, koji postaje dominantan vid prihranjivanja karstnog sistema vrela Bosne u prolećnom periodu. Pri proračunu bilansa, dobijena je razlika od $1,58 \times 10^6$ (tj. 1.580.000) m³, odnosno 0,8%, ukazujući na akumuliranu vodu u sistemu vrela Bosne tokom 2015-2018 god.

Ocena kvantitativnih pritisaka podzemnih voda karstnih sistema vrela Seljašnice, Mokre i Bosne, odnosno proračun maksimalne količine vode koja bi se mogla eksploatirati iz karstnih sistema nekaptiranih vrela Perućac, Mlava, Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića tako da nisu pod pritiskom data je u tabeli 7.2. Ocena pritisaka na kvantitet podzemnih karstnih voda izvršena je prema metodologiji izloženoj u poglavlju 4.3.2.2 i data je na godišnjem nivou za period osmatranja od 1. oktobra 2015. do 30. septembra 2020. godine, osim za karstni sistem vrela Bosne za koje su analize vršene u periodu oktobar 2015-septembar 2018. godine. Za vrela sa kojih se koriste podzemne vode usvojene su prosečne vrednosti eksploatacije od 163 l/s za Seljašnicu, 200 l/s za vrelo Mokre, odnosno 400 l/s za vrelo Bosne. Za nekaptirana vrela Perućac, Mlava, Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića proračunate su optimalne količine voda koje se mogu zahvatiti, tako da sistem nije pod pritiskom. Optimizacija količine vode koja se može koristiti morala je da zadovolji oba kriterijuma, tj. da bude na nivou 32,9% eksploatacionih rezervi, odnosno na nivou 14,9% novoinfiltriranih voda. Ovakav kriterijum je posebno bitan za karstne sisteme vrela Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića, budući da je kvantitativna analiza vremenskih serija prihranjivanja i isticanja pokazala veoma brzu propagaciju novoinfiltriranih voda i nešto slabiju retencionu moć ovih sistema. Sa druge strane, za karstne sisteme vrela Perućac i Mlava zadržan je isti kriterijum kao za ostala nekaptirana vrela, kako bi se zadržao princip doslednosti, iako ova tri vrela imaju znatno veće retencione kapacitete od sistema Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića.

Tabela 7.2. Ocena pritiska na kvantitet podzemnih voda karstnih sistema vrela Seljašnica, Mokre i Bosne, kao i proračun maksimalne količine podzemnih voda koje bi se mogle zahvatiti na vrelima Perućac, Mlava, Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića tako da ne budu pod pritiskom. Legenda: $I_{ef,av}$ – prosečna mesečna vrednost efektivne infiltracije karstnog sistema; Q_{dyn} – dinamičke rezerve karstnog sistema ocenjene na nivou Q_{50} , tj. medijane; Q_{80} – izdašnost vrela koja se javlja u 80% vremena na krivoj trajanja protoka; Q_{EO} – ekološki optimum; Q_{AP} – alarmni prag; Q_{expl} – eksploatacione rezerve podzemnih voda karstnog sistema; Q_{zahv} – prosečne vrednosti zahvaćenih količina vode na vrelima Seljašnice, Mokre i Bosne; Q_{optim} – optimizovana maksimalna vrednost eksploatacije na nekaptiranim vrelima tako da sistem nije pod kvantitativnim pritiskom; **1** – Pritisak na osnovu odnosa zahvaćenih količina i rezervi; **2** – Pritisak na osnovu zahvaćenih i infiltriranih količina; Ocena pritiska: **Plavo** – Nije pod pritiskom; **Narandžasto** – Potencijalno pod pritiskom; **Crveno** – pod pritiskom

(m ³ /s)	Perućac	Seljašnica	Mokra	Vrelo Mlave	Oko Bijeje	Rijeka Crnojevića	Vrelo Bosne
$I_{ef,av}$	1,92	0,85	0,53	2,02	2,10	12,56	5,35
$Q_{dyn} (Q_{50}, Mdn)$	1,64	0,39	0,28	1,08	0,60	1,43	4,23
Q_{80}	1,45	0,28	0,14	0,58	0,04	0,47	2,21
$Q_{EO} (0.2 \times Q_{50})$	0,33	0,08	0,06	0,216	0,12	0,29	0,85
$Q_{AP} (0.2 \times Q_{80})$	0,29	0,06	0,03	0,116	0,01	0,09	0,44
Q_{expl}	1,31	0,31	0,22	0,864	0,48	1,14	3,38
Q_{kapt}		0,163	0,20				0,40
Q_{optim}	0,285			0,284	0,16	0,38	
1 (%)	21,8	52,3	88,76	32,9	32,9	32,9	11,8
2 (%)	14,90	19,06	37,30	14,07	7,52	2,99	7,48

Rezultati procesa optimizacije, dati u tabeli 7.2, pokazuju da bi se sa vrela Perućac moglo eksploatirati prosečno oko 285 l/s, a da sistem ne bude pod pritiskom. Eksploatacione rezerve podzemnih voda ovog karstnog sistema iznose 1,31 m³/s, a koje uključuju dinamičke rezerve na nivou izdašnosti vrela u 50% vremena umanjeње za vrednost ekološkog optimuma koje su neophodne za zavisne ekosisteme. Alarmni prag za karstni sistem vrela Perućac iznosi prosečno 290 l/s, što predstavlja vrednosti ispod koje ne bi smela da se spusti izdašnost vrela, imajući u vidu zavisne ekosisteme. Analizirajući vrednosti potencijalne eksploatacije podzemnih voda vrela Perućac i eksploatacionih rezervi podzemnih voda ovog sistema, može se zaključiti da bi vrednosti eksploatacije bila značajno manja od rezervi u svim mesecima, odnosno da se jedino tokom letnjih meseci može očekivati povećani pritisak na sistem. Imajući to u vidu, minimalna vrednost eksploatacije bi se mogla nadomestiti izgradnjom podzemne akumulacije, u kome bi se deponovao višak vode, koji istekne tokom prolećnih i letnjih meseci, a koji se ne zahvati i ne iskoristi za potrebe ekosistema (Milanović P. & Milanović S. 2000; Jemcov et al. 2010; 2011).

Iz tabele 7.2 može se videti da karstni sistem vrela Seljašnice generalno spada u klasu *Potencijalno pod pritiskom* sa aspekta eksploatacije podzemnih voda, ukoliko se posmatra celokupni period osmatranja. Takav zaključak može se izvući na osnovu oba primenjena kriterijuma, budući da gledano prema odnosu zahvaćenih količina i eksploatacionih rezervi, procenat iznosi 52,3%, dok je odnos zahvaćenih količina i novoinfiltrirane vode 19,1%. Ovakav kvantitativni status karstnog sistema vrela Seljašnice najčešće se javlja tokom letnjih meseci, kada je efektivna infiltracija najmanja, a eksploatacija konstantna, budući da su tada i potrebe za vodom najveće. Ipak, karstni sistem vrela Seljašnice se veoma brzo „oporavi“ nakon letnjih meseci i recesionog perioda, tako da se skoro celokupna novoinfiltrirana voda potroši na popunjavanje rezervi podzemnih voda, a manji deo ističe na vrelo. To se može vrlo jasno videti

i na uporednom dijagramu (Sl. 6.26) bruto padavina, efektivne infiltracije i isticanja na vrelu Seljašnice, kada novoinfiltrirana voda ne izaziva brzu i jaku reakciju na vrelu, već se veći deo akumulira u sistemu kao kompenzacija isteklih voda tokom recesionog perioda. Sa druge strane, tokom prolećnih meseci, tj. naročito nakon perioda topljenja snega i intenzivnih kiša (period april-maj posebno), dolazi do ekstremnih pikova na vrelu i brze reakcije sistema, budući da je sistem napunjen. Stoga, kao mera regulacije može se razmatrati izgradnja podzemne akumulacije kako bi se zadržale vode koje prirodno isteknu tokom prolećnih meseci, a koje bi umirile disproporciju između trenutnog stanja rezervi i eksploatacije tokom letnjih meseci.

Kada je reč o karstnom sistemu vrela Mokra, može se zaključiti da je on pod kvantitativnim pritiskom prema oba kriterijuma ukoliko se posmatra celokupni period osmatranja, budući da odnos Q_{zahv}/Q_{expl} iznosi 88,8%, dok je odnos $Q_{zahv}/Q_{lef,av}$ 37,3%. Prosečna eksploatacija podzemnih voda ovog sistema iznosi 200 l/s, dok je proračunati ekološki optimum 60 l/s, a alarmni prag 30 l/s koji se mora ostaviti nizvodnim ekosistemima u svakom trenutku. Kao i u slučaju vrela Seljašnice, i karstni sistem vrela Mokre suočava se sa kvantitativnim pritiskom tokom letnjih meseci, kada je infiltracija praktično na nultom nivou, izdašnost vrela na minimumu, a potrebe za vodom su najveće. Konstantna eksploatacija u tim kritičnim (recesionim, tj. letnjim) periodima zapravo predstavlja „pozajmicu“ koja se uspešno kompenzuje s prvim kišama nakon recesije, kao i tokom perioda visokih voda, što nije redak slučaj u hidrogeologiji karsta (Stevanović et al. 2022a). Na taj način, crpljenjem konstantne količine vode sa vrela Mokre podrazumeva se činjenica da će se rezerve ovog sistema obnoviti u periodu velikih voda, kada je prihranjivanje mnogo veće nego vrednost zahvaćenih količina, što je uočljivo pogotovo na uporednom dijagramu efektivne infiltracije, bruto padavina i izdašnosti vrela Mokre (Sl. 6.46). Na pomenutom dijagramu, jasno je da visoke vrednosti efektivne infiltracije ne izazivaju uvek reakciju na vrelu, što je direktna posledica stanja rezervi podzemnih voda u sistemu, tako da nakon recesije, prvo se popunjavaju rezerve sistema, pa se tek sa zasićenjem sistema pojavljuje reakcija na vrelu. Stoga, iako odnos infiltrirane vode i eksploatacionih rezervi sa količinom vode koja se eksploatiše ukazuje na kvantitativni pritisak, on nije uvek uniforman tokom hidrološke godine, budući da se nakon recesije i tokom prolećnih meseci kompenzuje kritični period. Regulacijom karstne izdani, u smislu izgradnje podzemne akumulacije kako bi se zadržale veće količine voda tokom proleća, koje prirodno ističu, a ne koriste se, mogli bi se amortizovati periodi kada je vrelo na ekstremnom minimumu, pogotovo tokom recesionog perioda.

Potencijalne količine podzemnih voda koje se mogu zahvatiti na vrelu Mlave, a da karstni sistem ne bude pod pritiskom, iznose prosečno oko 284 l/s. S obzirom na to da se radi o dubokoj sifonalnoj cirkulaciji, tokom prolećnih meseci, odnosno u periodima visokih voda moguće je crpeti i dosta veću količinu vode, budući da je očigledno da se sistem vrlo uspešno kompenzuje periode niskih voda velikim rezervoarom. Alarmni prag za vrelo Mlave iznosi 116 l/s, i to je količina vode ispod koje ne bi smela da padne izdašnost vrela koja bi u vidu preliva odlazila nizvodno i bivala iskorišćena za zavisne ekosisteme, pre svega u vidu ribnjaka. Svakako, ovo su alarmne vrednosti, a poželjno je ostaviti i veću količinu vode, posebno imajući u vidu veoma osetljive zone ekosistema nizvodno od većine vrela Kučaja i Beljanice (Milanović S. et al. 2014). Ukoliko bi se hipotetički koristila voda vrela Mlave za vodosnabdevanje stanovništva, navedene količine vode bi se bez problema mogle koristiti, uz poštovanje vodoprivrednog i biološkog ograničenja. Eksploatacione rezerve podzemnih voda karstnog sistema vrela Mlave razmatrane su i kao regionalno izvorište sa koga bi se snabdevao Beograd i okolne opštine (Stevanović et al. 1986; 2007), što samo potvrđuje značaj i akumulacione sposobnosti ovog sistema. Eventualne nedostajuće količine tokom letnjih meseci (jun-septembar) mogle bi se obezbediti regulacionim

merama u zoni isticanja vrela, ubacivanjem pumpe u sifon vrela ili drugom vrstom vodozahvata i crpenjem statičkih rezervi podzemnih voda karstnog sistema (Stevanović et al. 2007).

Tabela 7.2 pokazuje da bi se iz sistema vrela Oko Bijeke moglo eksploatisati prosečno oko 160 l/s, a da sistem ne bude pod pritiskom. Ekološki optimum ovog sistema iznosi 120 l/s, što bi ukazivalo na eksploatacione rezerve u iznosu od 480 l/s. Količina vode (tj. alarmni prag) u ekstremnim uslovima, koja se mora ostaviti nizvodnim korisnicima i zavisnim ekosistemima iznosi 10 l/s. Razmatrajući minimalne i maksimalne vrednosti izdašnosti ovog vrela, jasno je da bi se za nesmetanu eksploataciju podzemnih voda morale primeniti mere regulacije karstne izdani. Prva mera regulacije moglo bi biti probno crpenje u malovodnim uslovima, čime bi se proverila akumulativna sposobnost ovog karstnog sistema. Crpenjem u malovodnim uslovima zapravo bi se vršila nadeksploatacija statičkih rezervi (ukoliko postoje), dok bi se tokom perioda velikih voda one dopunjavale, budući da su potrebe u vodi tada daleko manje od maksimalnih izdašnosti vrela. Ukoliko pak ne postoje uslovi za nadeksploataciju u kritičnim periodima godine, onda bi izgradnja podzemne akumulacije uspešno amortizovala ekstremne pikove čime bi vršilo deponovanje potrebnih količina vode, što bi omogućilo nesmetano vodosnabdevanje tokom cele godine, budući da je optimalno prosečno višegodišnje zahvatanje procenjeno na 160 l/s. Na ovom primeru vrlo jasno se može videti poznata činjenica da problem u karstu zapravo ne predstavljaju količine vode, već njena izuzetno neravnomerna vremenska distribucija. To najbolje potvrđuje činjenica da se optimizovana količina vode od 160 l/s iznosi svega 7,5% vode koja se infiltrira u sistem, tako da postoji veliki prostor za zadržavanje prirodno isteklih voda u periodima ekstremnih maksimuma.

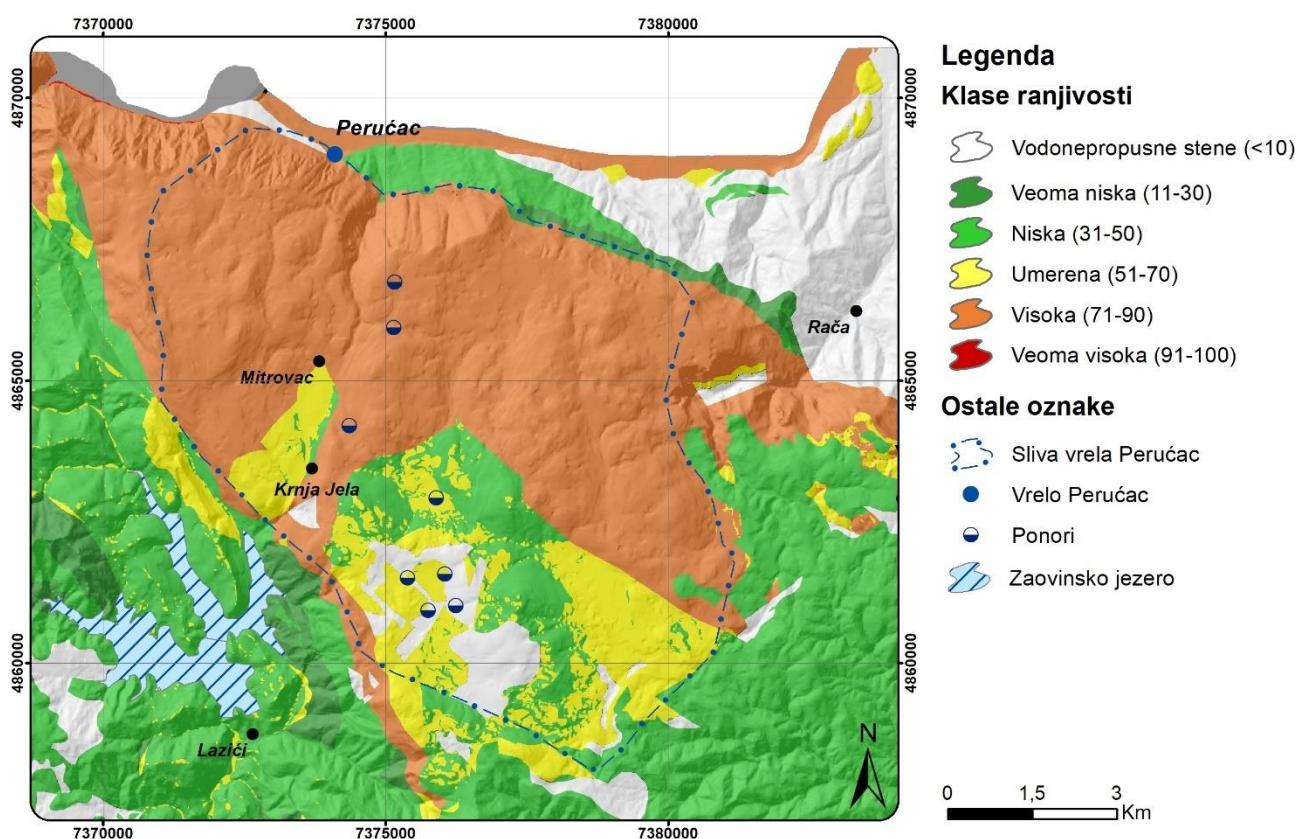
Karstni sistem vrela Rijeke Crnojevića odlikuje se još većom količinom vode koja bi se hipotetički mogla eksploatisati iz ovog sistema. Naime, optimizovana količina zahvaćene vode na godišnjem nivou iznosi 380 l/s, pri kojima karstni sistem vrela Rijeke Crnojevića ne bi bio pod kvantitativnim pritiskom. Dinamičke rezerve ovog sistema su veoma značajne, budući da su procenjene na 1,43 m³/s, što predstavlja količinu vode koja ističe na vrelu u 50% osmatračkog perioda (2015-2020). Ekološki optimum ovog sistema iznosi 290 l/s, tako da eksploatacione rezerve iznose 1,14 m³/s. Alarmni prag ispod koga ne bi smela da padne izdašnost vrela iznosi 90 l/s, što je posebno važno za zavisne ekosisteme, imajući u vidu bogatu faunu u Rijeci Crnojevića, odnosno da ova reka značajno kontribuira ukupnom vodnom bilansu Skadarskog jezera. I u slučaju karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića, postoji potreba za regulacijom karstne izdani u vidu akumulacije ekstremnih pikova u periodima velikih voda koji bi nadomestili smanjenu vrednost eksploatacije tokom letnjih meseci i time izravnali eksploatacione rezerve podzemnih voda. Regulacija karstne izdani u vidu nadeksploatacije sistema bila bi prva opcija, kao kod Oka Bijeke, a zatim izgradnja podzemne akumulacije. Ipak, procena je da bi potrebe stanovništva u vodi u ovom regionu bile manje od eksploatacionih količina vode, tako da bi se eventualno zahvatanje podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića moglo iskoristiti i za udaljena naseljena mesta.

S obzirom na veoma složen sistem dreniranja karstnog sistema vrela Bosne, ali i komplikovan proces korišćenja voda ovog sistema za vodosnabdevanje stanovništva Sarajeva, pri analizi kvantitativnih pritisaka usvojena je vrednost od 400 l/s. Ova količine eksploatisane vode pozicionira karstni sistem vrela Bosne u kategoriju *Nije pod pritiskom* budući da je ona višestruko ispod količina vode koje se infiltriraju u sistem, odnosno količina voda koje su ocenjene kao eksploatacione rezerve (3,38 m³/s). Alarmni prag ispod kog ne bi smela da padne izdašnost vrela Bosne procenjena je na prosečnu godišnju vrednost od 440 l/s. Obezbeđivanje ove vrednosti je krucijalno pri upravljanju karstnim sistemom vrela Bosne, imajući u vidu akvatični ekosistem koji je direktno zavisan od isticanja podzemnih voda na vrelu Bosne, odnosno od terestričnog ekosistema „Vrelo Bosne“ koje je proglašeno spomenikom prirode.

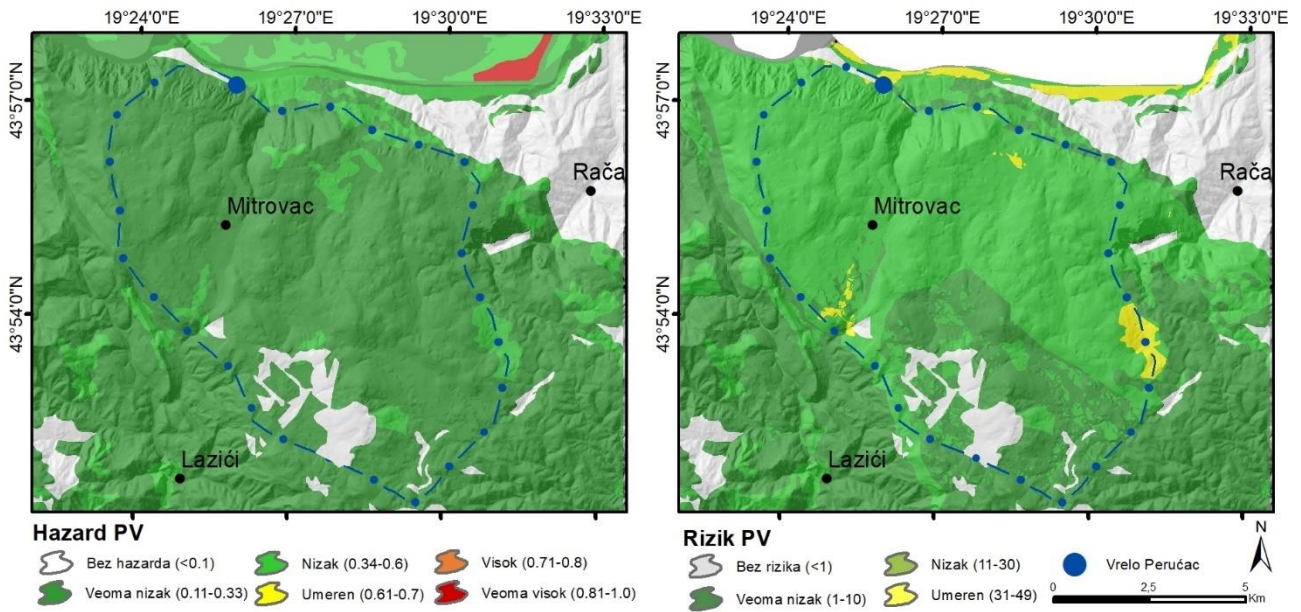
Ukoliko bi se javila potreba za direktnim povećanjem kapaciteta eksploatacane vode na vrelu Bosne, to bi bilo omogućenom primenom određenih mera regulacije karstne izdani. Regulacione mere koje bi uspešno rešile ovaj nedostatak odnose se na ubacivanje pumpe u sifonski kanal vrela Bosne ili drugom vrstom vodozahvata, kojom bi se crpele statičke rezerve, imajući u vidu velike rezerve i veliku akumulativnu moć ovog sistema.

7.2 Ocena kvalitativnih pritisaka na karstne podzemne vode odabranih karstnih sistema

Ocena pritisaka na kvalitet podzemnih voda karstnih sistema izvršena je na osnovu kreiranih karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda prema difuznim zagađivačima, saglasno metodologiji izloženoj u poglavlju 4.3.3. Na sl. 7.1 i 7.2 dat je prikaz navedenih karata za karstni sistem vrela Perućac, sa kojih se vidi dominantna *Visoka* i *Umerena* ranjivost podzemnih voda, *Veoma nizak* i *Nizak* hazard podzemnih voda, kao i *Nizak* rizik podzemnih voda.

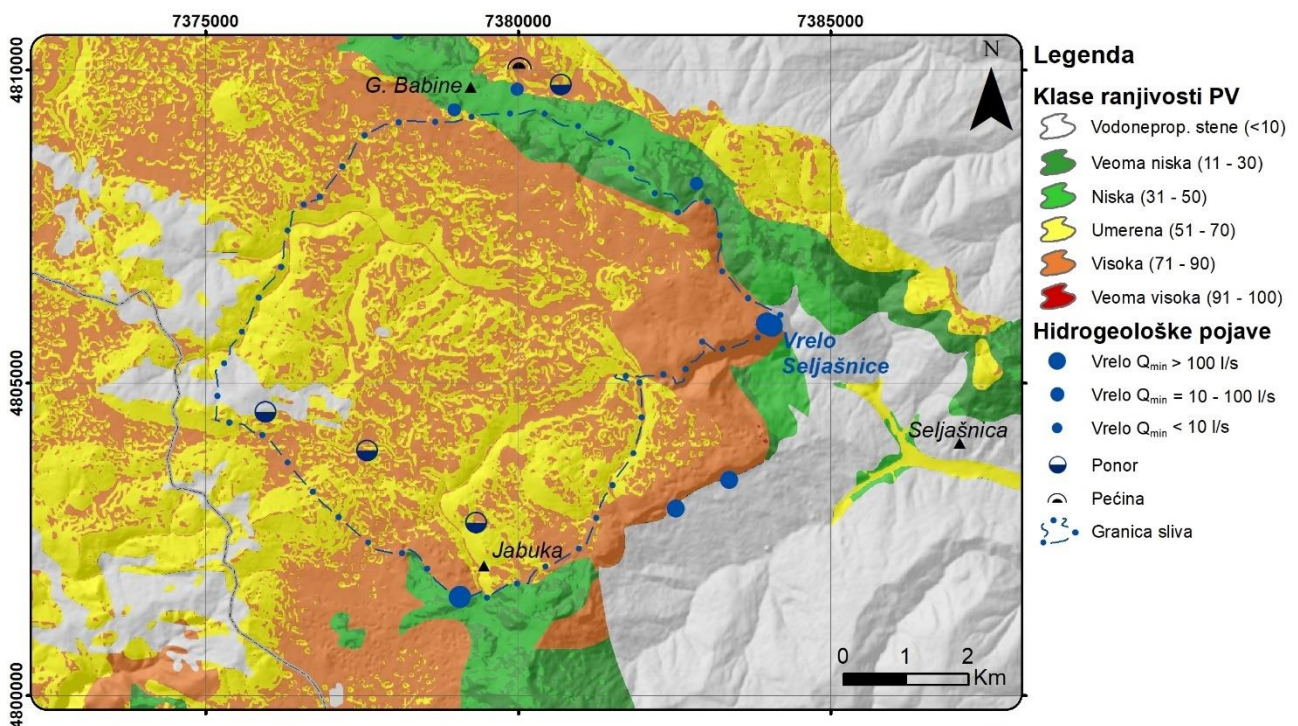


Sl. 7.1. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Perućac

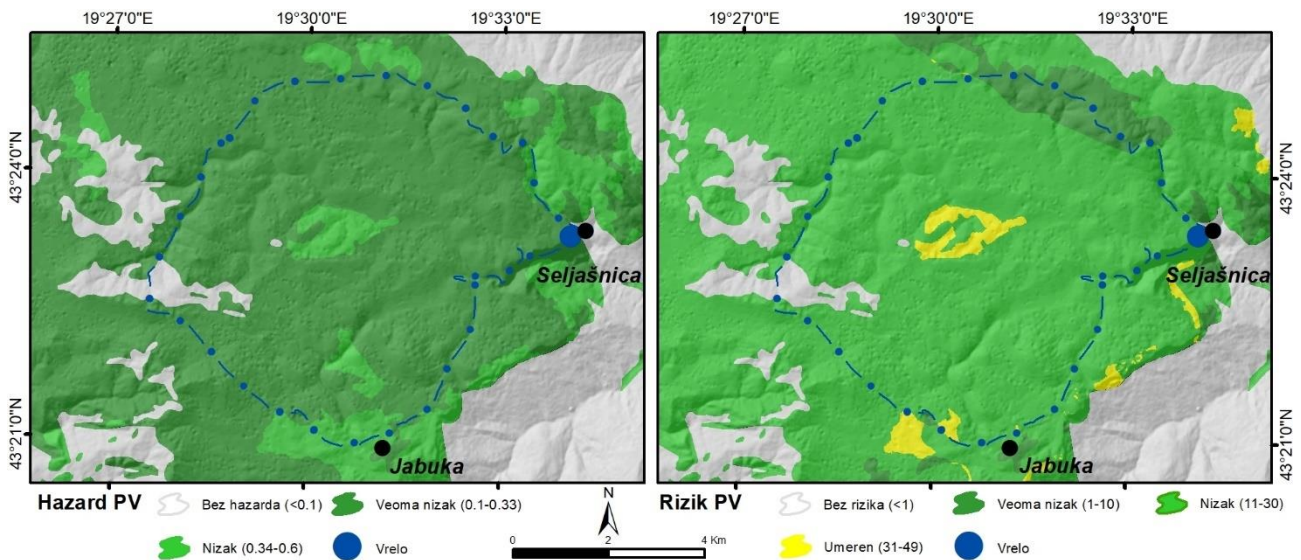


Sl. 7.2. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Perućac

Na sl. 7.3 i 7.4 dat je prikaz karata ranjivosti, hazarda i rizika za karstni sistem vrela Seljašnice, sa kojih se vidi dominantna Umerena i Visoka ranjivost podzemnih voda, Veoma nizak i Nizak hazard podzemnih voda, kao i Nizak i Umeren rizik podzemnih voda.

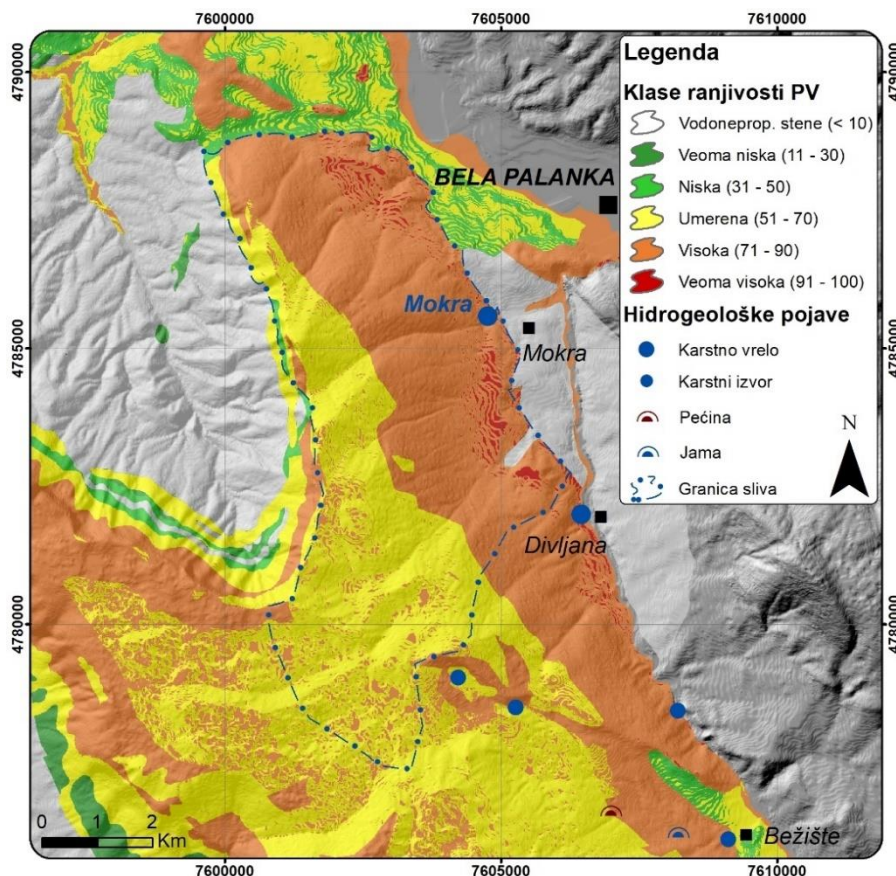


Sl. 7.3. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Seljašnice

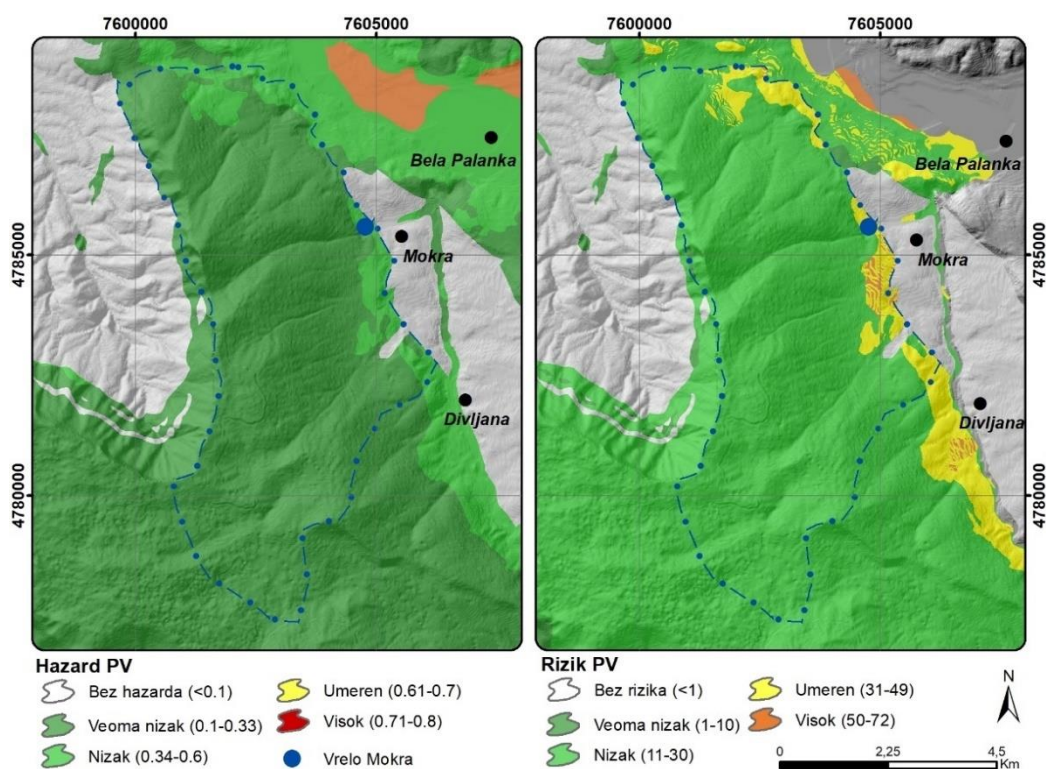


Sl. 7.4. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Seljašnice

Kada je reč o karstnom sistemu vrela Mokra, na sl. 7.5 i 7.6 dat je prikaz pomenutih karata za ovaj karstni sistem, gde je uočljiva dominacija *Visoke* i *Umerene ranjivosti* sa prisustvom *Veoma visoke ranjivosti* u zaleđu vrela, zatim *Veoma nizak* i *Nizak hazard*, kao i *Nizak* i *Umeren rizik*, sa *Visokim rizikom* u zaleđu vrela, koji je posledica pomenute visoke ranjivosti na istom prostoru.

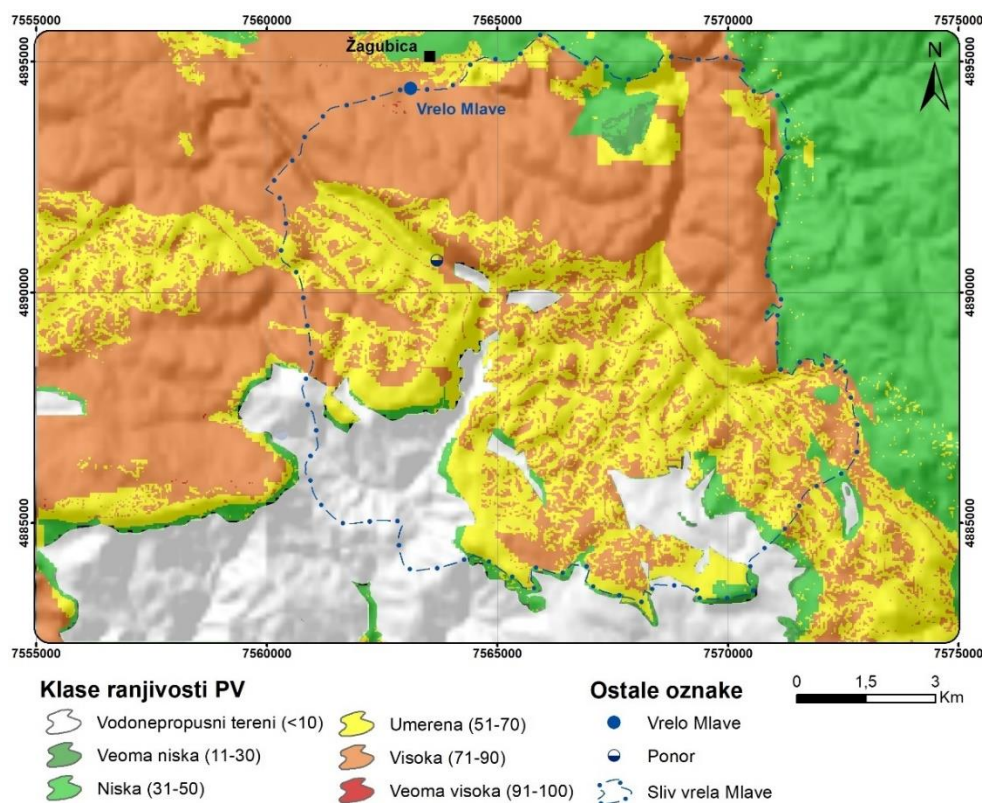


Sl. 7.5. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Mokra

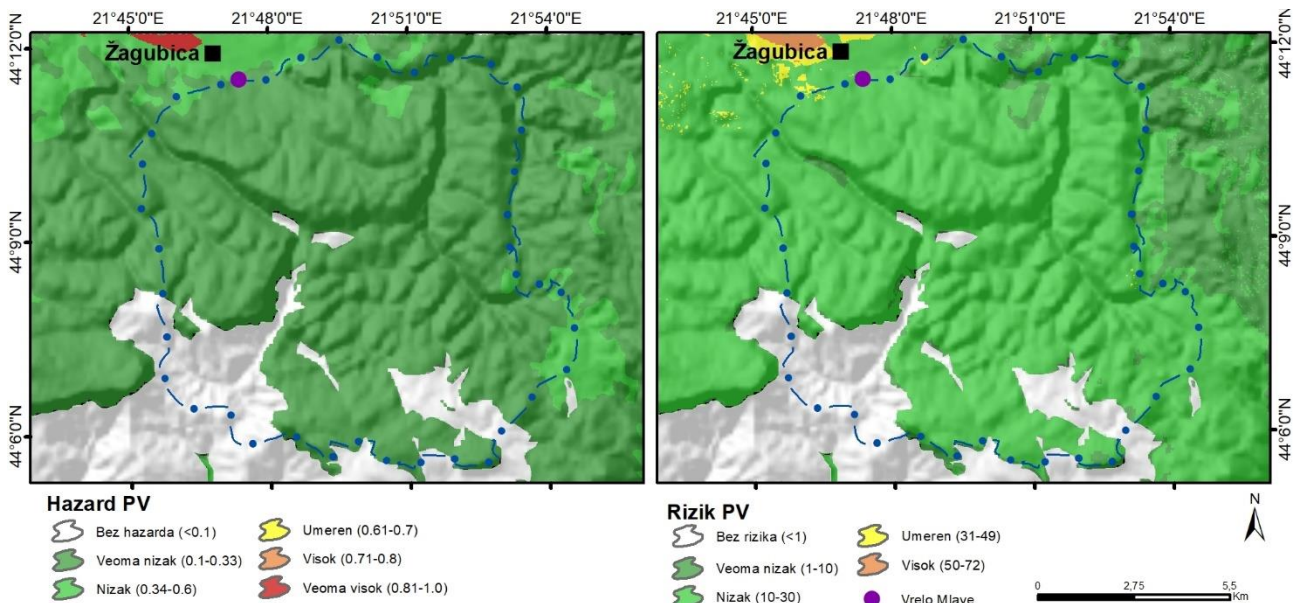


Sl. 7.6. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Mokra

Karte ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Mlave dat je na sl. 7.7 i 7.8 sa kojih se vidi dominacija klasa *Visoka* i *Umerena* prirodna ranjivosti podzemnih voda, odnosno *Veoma nizak* hazarda i *Nizak* rizik od zagađenja.

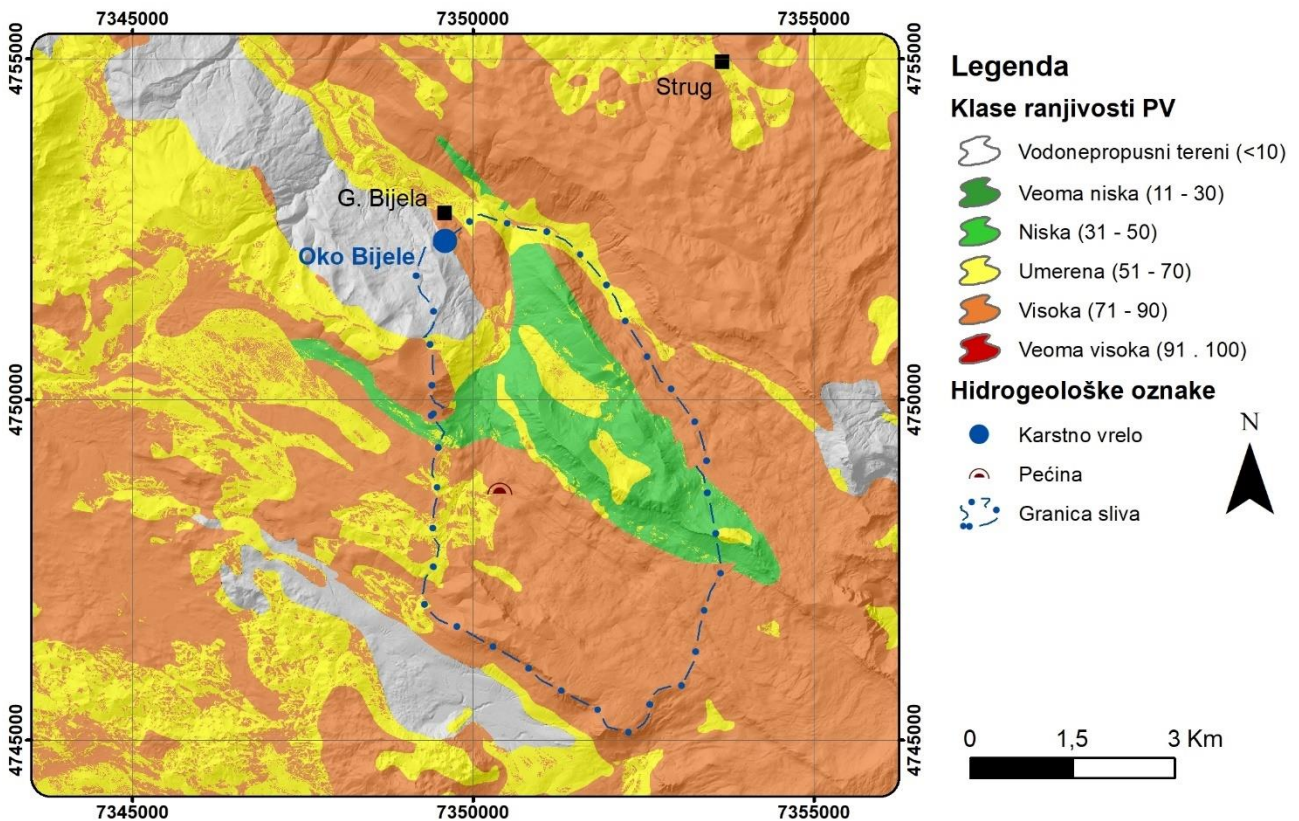


Sl. 7.7. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Mlave

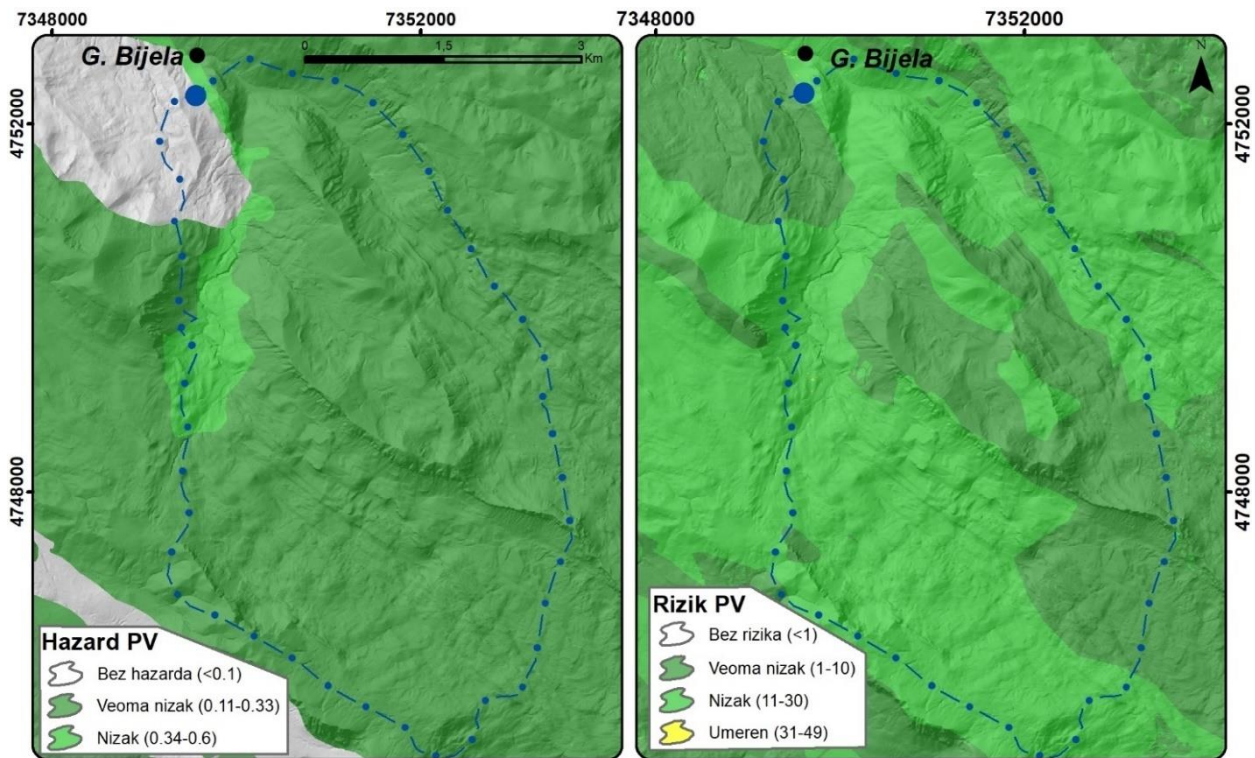


Sl. 7.8. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Mlave

Na sl. 7.9 i 7.10 dat je prikaz karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda za karstni sistem vrela Oko Bijele, sa koje se vidi da klase *Niska* i *Visoka ranjivosti* dominiraju slivom, uz prisustvo *Umerene* ranjivosti. Što se hazarda tiče, najveću distribuciju zauzima klasa *Nizak hazard*, dok su kao proizvod pomenutih karata dominantne klase *Umeren* i *Nizak rizik* podzemnih voda.

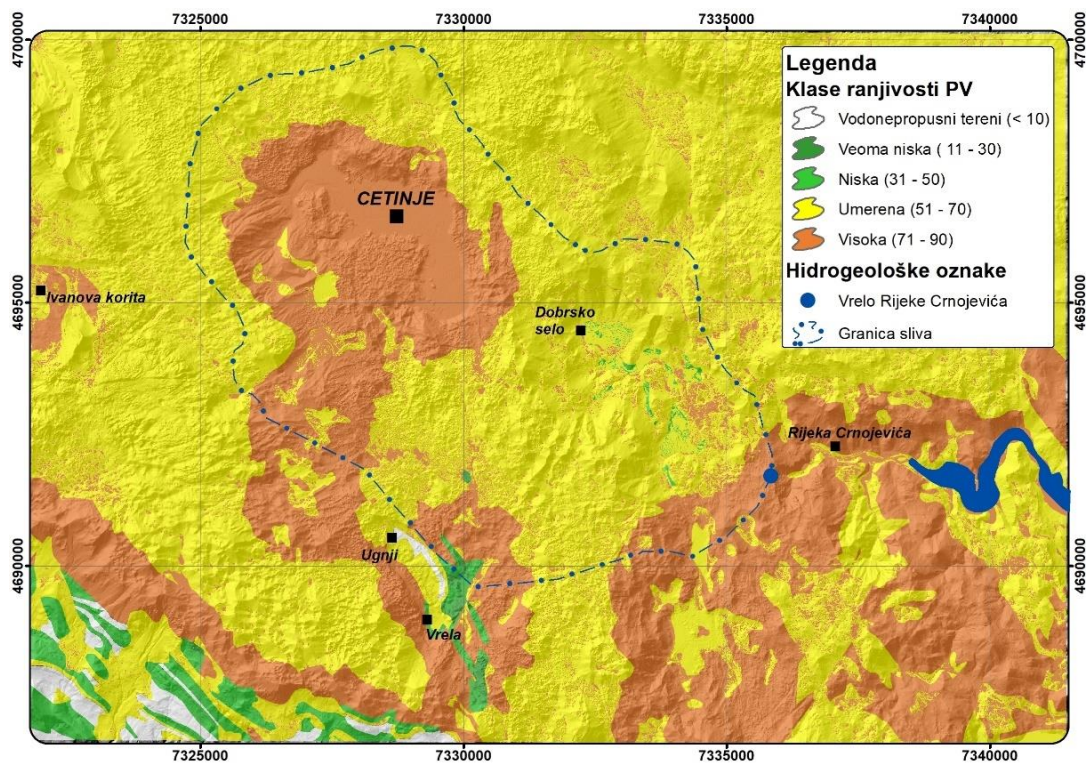


Sl. 7.9. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Oko Bijele

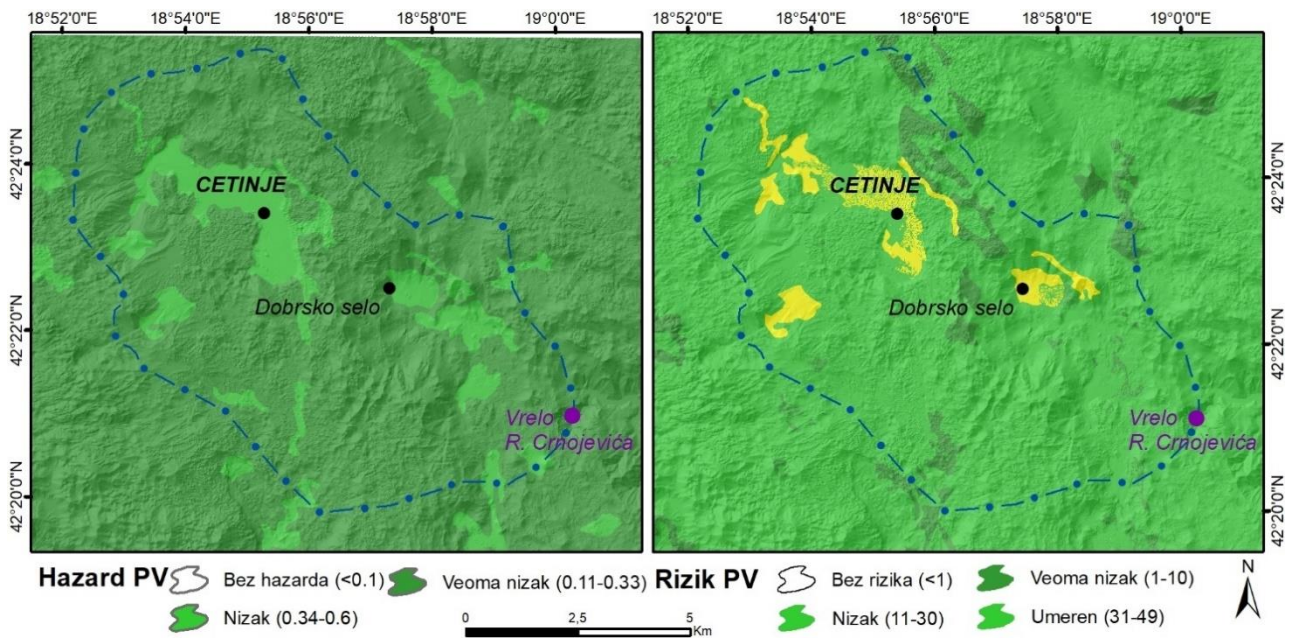


Sl. 7.10. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Oko Bijele

Na sl. 7.11 i 7.12 dat je prikaz karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda za karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića. Klase *Umerena* i *Visoka ranjivosti* dominiraju slivom vrela Rijeka Crnojevića, dok *Veoma nizak* i *Nizak hazard* imaju najveću distribuciju na slivu. Kao proizvod ove dve karte, *Nizak* i *Umeren rizik* su dominantne klase u okviru sliva ovoga vrela.

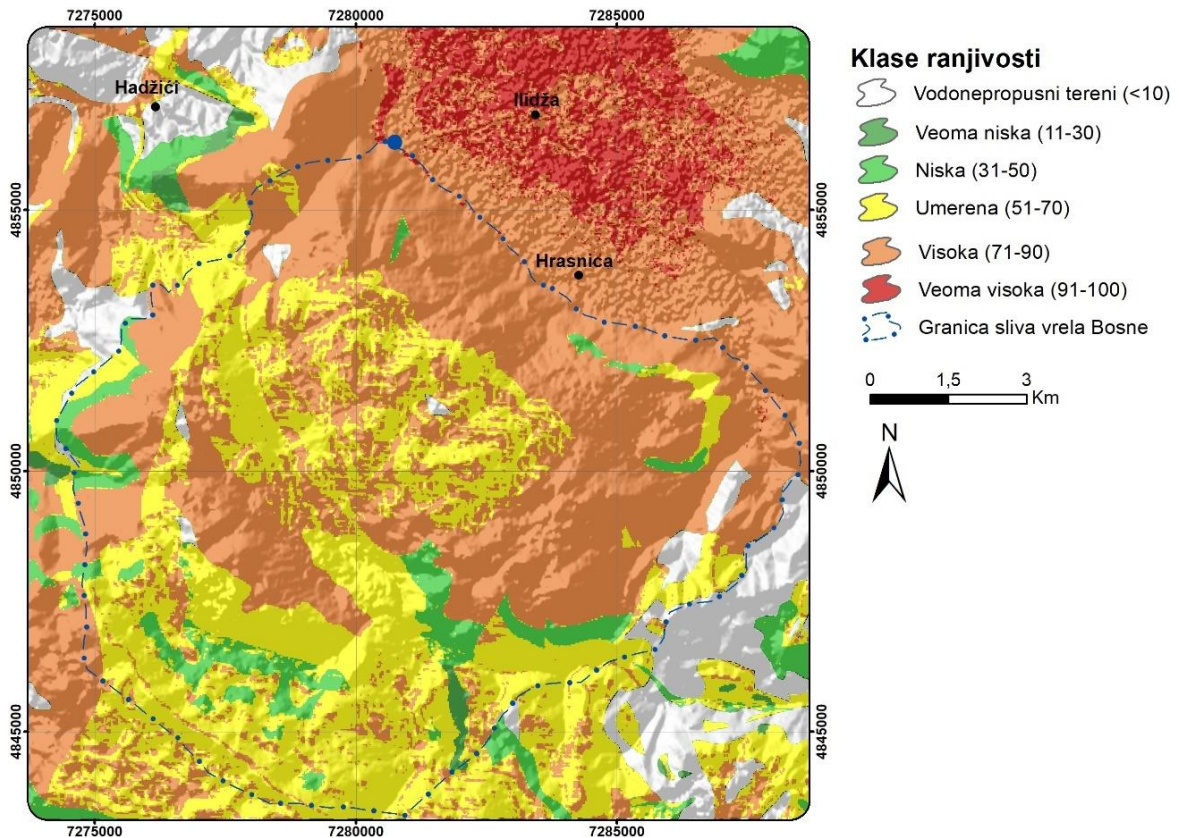


Sl. 7.11. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića

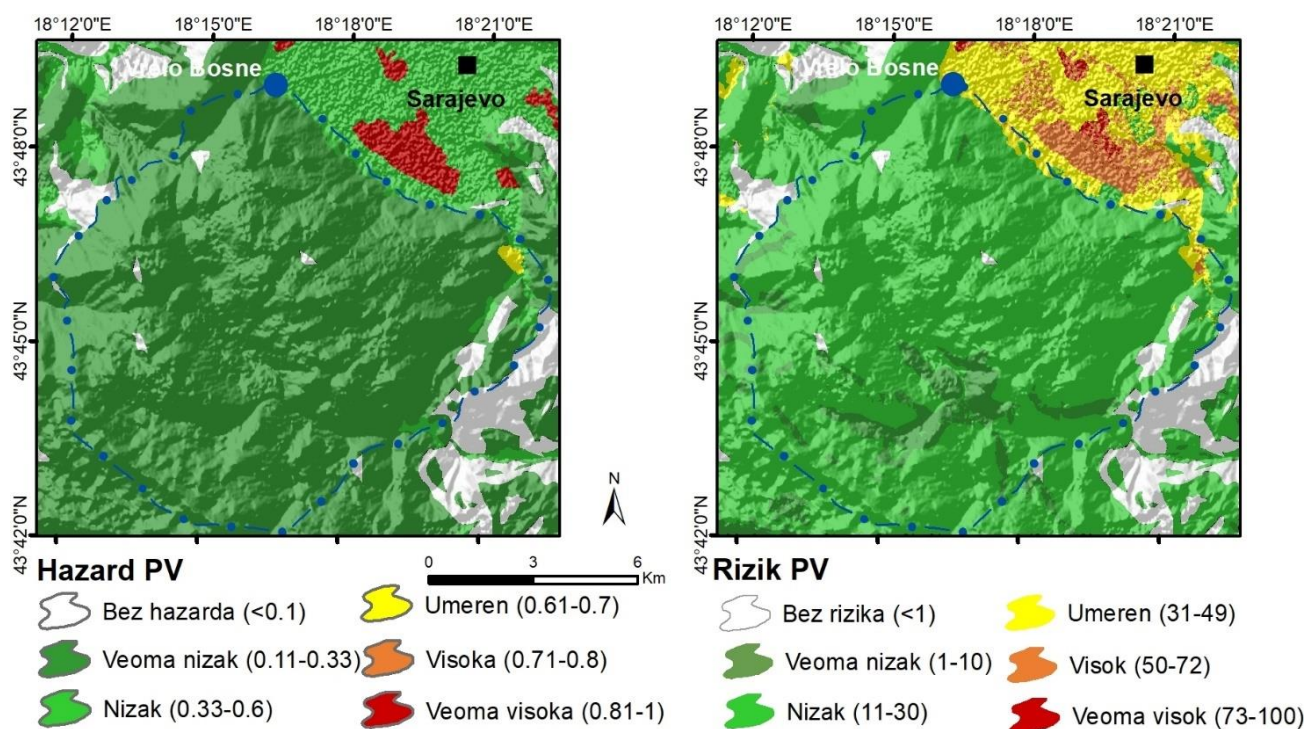


Sl. 7.12. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrela Rijeke Crnojevića

Sl. 7.13 i 7.14 pokazuju karte ranjivosti, hazarda i rizika za karstni sistem vrela Bosne, sa kojih se vidi dominacija klasa *Umerena* i *Visoka* ranjivost podzemnih voda, odnosno *Nizak* hazard i rizik prirodni rizik podzemnih voda od zagađenja.



Sl. 7.13. Finalna karta ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi za karstni sistem vrela Bosne



Sl. 7.14. Karta hazarda (levo) i rizika (desno) podzemnih voda prema difuznim zagađivačima za karstni sistem vrelo Bosne

U cilju ocene pritiska na kvalitet karstnih podzemnih voda navedenih karstnih sistema, izvršen je proračun prostorne distribucije svake od klasa ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda u okviru slivnog područja svakog sistema, što je predstavljeno u tabeli 7.3, gde su površine svake klase ranjivosti, hazarda i rizika date u km² i kao procentualna zastupljenost u odnosu na celokupnu površinu sliva. Finalno, pritisak na kvalitet podzemnih voda određen je na osnovu metodologije predstavljene u poglavlju 4.3.3.4.

Tabela 7.3a. Prostorna distribucija (u km² i %) klasa ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda prema difuznim zagađivačima karstnih sistema vrelo Perućac, Seljašnice, Mokre i Mlave, kao i ocena pritiska na kvalitet karstnih podzemnih voda

	Klasa	PERUĆAC		SELJAŠNICA		MOKRA		MLAVA	
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
RANJIVOST	Vodoneprop.tereni	3,6	4,9	1,1	2,62	0,33	0,82	13,9	12,1
	Veoma niska	0,4	0,5	0,88	2,10	0	0	0,7	0,6
	Niska	8,5	11,3	0,79	1,89	0,17	0,43	4,3	3,8
	Umerena	13,12	17,49	17,55	41,88	16,30	40,74	42,7	37,2
	Visoka	49,39	65,86	21,58	51,50	22,28	55,71	53,0	46,2
	Veoma visoka	0,0	0,0	0,003	0,007	0,92	2,30	0,0	0,0
	Σ	75	100	42	100	40	100	115	100
HAZARD	Bez hazarda	3,6	4,9	1,1	2,61	0,33	0,82	13,9	12,1
	Veoma nizak	67,48	89,98	37,82	89,82	36,23	90,56	97,5	85,2
	Nizak	3,9	5,2	3,19	7,57	3,45	8,62	3,1	2,7
	Umeren	0	0	0	0	0	0	0	0
	Visok	0	0	0	0	0	0	0	0
	Veoma visok	0	0	0	0	0	0	0	0
	Σ	75	100	42	100	40	100	115	100

RIZIK	Bez rizika	3,6	4,9	1,1	2,61	0,33	0,82	13,9	12,2
	Veoma nizak	15,98	21,31	1,67	3,98	0,06	0,15	2,1	1,8
	Nizak	54,15	72,21	38,06	90,39	36,78	91,94	98,4	85,9
	Umeren	1,2	1,6	1,27	3,03	2,62	6,55	0,1	0,1
	Visok	0,0	0,0	0	0	0,21	0,53	0	0
	Veoma visok	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0
	Σ	75	100	42	100	40	100	115	100
KVALITATIVNI PRITISCI		POTENCIJALNO POD PRITISKOM		POTENCIJALNO POD PRITISKOM		POTENCIJALNO POD PRITISKOM		POTENCIJALNO POD PRITISKOM	

Tabela 7.3b. Prostorna distribucija (u km² i %) klasa ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda prema difuznim zagađivačima karstnih sistema vrela Oko Bijele, Rijeke Crnojevića i Bosne, kao i ocena pritiska na kvalitet karstnih podzemnih voda

Klasa	OKO BIJELE		RIJEKA CRNOJEVIĆA		VRELO BOSNE		
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
RANJIVOST	Vodoneprop.tereni	0,91	3,90	0	0	2,0	1,8
	Veoma niska	0,0	0,0	0,0719	0,1	0,5	0,4
	Niska	6,40	27,37	0,54	0,78	7,4	6,3
	Umerena	3,56	15,23	40,01	57,61	43,45	37,19
	Visoka	12,52	53,50	28,83	41,50	63,41	54,28
	Veoma visoka	0,0003	0,0011	0	0	0,1	0,1
	Σ	23	100	69	100	117	100,0
HAZARD	Bez hazarda	0,91	3,90	0	0	2,0	1,8
	Veoma nizak	20,4	87,1	58,30	83,90	111,70	95,69
	Nizak	2,11	9,00	11,19	16,10	3,0	2,6
	Umeren	0	0	0	0	0,0	0,0
	Visok	0	0	0	0	0,0	0,0
	Veoma visok	0	0	0	0	0,0	0,0
	Σ	23	100	69	100	117	100,0
RIZIK	Bez rizika	0,91	3,89	0	0	2,0	1,8
	Veoma nizak	5,04	21,45	4,32	6,22	10,05	8,61
	Nizak	17,53	74,66	60,56	87,22	102,91	88,11
	Umeren	0,001	0,003	4,52	6,50	1,6	1,4
	Visok	0	0	0,03485	0,05	0,2	0,1
	Veoma visok	0	0	0	0	0,0	0,0
	Σ	23	100	69	100	117	100,0
KVALITATIVNI PRITISCI		POTENCIJALNO POD PRITISKOM		POTENCIJALNO POD PRITISKOM		POTENCIJALNO POD PRITISKOM	

Tabela 7.3 kvantitativno potvrđuje dominantne klase ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda, i ističe pritisak na kvalitet podzemnih voda, koji je ocenjen kao *Potencijalno pod*

pritisikom za svaki analizirani karstni sistem, na šta najviše ima uticaj visoka prirodna ranjivost podzemnih voda, budući da su hazardi podzemnih voda pretežno u klasama *Veoma nizak* i *Nizak hazard*. Ipak, ovde treba napomenuti da je reč o prirodnim hazardima, tj. da nisu razmatrani punktuelni zagađivači koji su najčešće antropogenog porekla, što je posebno važno za karstni sistem vrela Bosne, koji je ugrožen nepostojanjem adekvatne kanalizacione infrastrukture na Igmanu i Bjelašnici, odnosno za karstni sistem vrela Rijeke Crnojevića, budući da se sve otpadne vode sa Cetinje direktno infiltriraju u podzemlje. Takođe, ugroženost podzemnih voda karstnog sistema vrela Perućac bi se povećala uključivanjem zagađivača antropogenog porekla sa platoa Tare i Mitrovca, kao i sistema vrela Seljašnice, imajući u vidu domaćinstva i aktivnu poljoprivredu i drvnu industriju na platou Babine. Sa druge strane, na slivnim područjima vrela Mlave, Mokra i Oka Bijele ne očekuje se veća ugroženost uključivanjem punktuelnih zagađivača, budući na slabu naseljenost slivnih područja ovih vrela.

Ukoliko se uporede rezultati kvalitativnih pritisaka dobijenih na osnovu karata ranjivosti, hazarda i rizika sa rezultatima hemijskih analiza, može se utvrditi njihova sličnost. Naime, hemijske analize izrađene za sva razmatrana karstna vrela ukazale su na veoma dobar i postojan prirodni kvalitet karstnih podzemnih voda, budući da osnovni fizičko-hemijski parametri, kao i glavni katjoni i anjoni veoma malo osciliraju i da su oni uvek ispod maksimalno dozvoljenih koncentracija. Sa druge strane, praktično sve analize na svim karstnim vrelima (osim na vrelu Mlave), pokazale su mikrobiološku neispravnost podzemnih voda, usled pojave bakterija koje su najčešće fekalnog porekla. Osim toga, jedna analiza podzemnih voda karstnog sistema vrela Oko Bijele pokazala je povišen sadržaj nitrita, dok su analize podzemnih voda vrela Rijeke Crnojevića pokazale prisustvo amonijaka i fenola, osim bakteriološke neispravnosti. Uzroci za navedena bakteriološka zagađenja svakako su antropogenog porekla, odnosno potiču ili od poljoprivredne aktivnosti koja se obavlja u zaleđima vrela, tj. u okviru zone prihranjivanja, ili od nepostojanja kanalizacione infrastrukture tako da sve otpadne vode se infiltriraju direktno u karstnu sredinu, kao što je slučaj na prostoru Cetinja i Bjelašnice i Igmana iznad Sarajeva. Na taj način, može se zaključiti da pri nepostojanju hemijskih analiza karstnih podzemnih voda, izrada karata ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda može dati relativno pouzdane informacije o kvalitativnog statusu karstnih podzemnih voda.

Prema ODV, kvalitativni pritisci na podzemne vode mogu se definisati i na osnovu kritičnih vrednosti (engl. *threshold values*), koji u principu podrazumevaju prag iznad koga određeni hemijski parametar utiče na kvalitativni pritisak. Ni u ovom slučaju ODV ne daje decidno koje su to granične vrednosti, već se ostavlja svakoj državi da uspostavi svoj referentni standard u skladu sa lokalnim (hidro)geološkim uslovima. *Threshold* vrednosti mogu se uspostaviti formiranjem sledećih relacija (7.1) (Bulut et al. 2020):

$$\text{Ako je } GPD / MDK \geq 1, \text{ onda je } TV = GPD \quad (7.1a);$$

$$\text{Ako je } GPD / MDK \leq 1, \text{ onda je } TV = REF \quad (7.1b);$$

Gde su:

GPD – Granica prirodne detekcije (engl. natural background levels) hemijskog parametra;

MDK – Maksimalno dozvoljene koncentracije hemijskog parametra prema aktuelnom referentnom standardu vode za piće;

TV – *threshold* vrednost.

Granica prirodne detekcije hemijskog parametra može se odrediti na osnovu statističkih testova i funkcija distribucije hemijskih parametara (Bulut et al. 2020), za šta je neophodan kontinuirani monitoring podzemnih voda koji će dati relevantne podatke o hemizmu

podzemnih voda. Definisanje ovih kritičnih vrednosti je još jedan razlog zbog kojih je neophodno formirati monitoring mrežu podzemnih voda koja će kontinualno pratiti kvantitet i kvalitet podzemnih voda, ne samo karstnih, već i ostalih tipova izdani.

8 FORMIRANJE I PRIMENA STOHAŠTIČKOG I REGRESIONOG MODELA KARSTNIH PODZEMNIH VODA U FUNKCIJI VERFIKACIJE METODOLOGIJE OCENE PRITISAKA

8.1 Aplikacija stohastičkog modeliranja na odabranim područjima

8.1.1 Stohastički model kvantiteta podzemnih voda na primeru vrela Bosne

Simulacioni i prediktivni stohastički model isticanja podzemnih voda primenjen je za vremenske serije isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne. Kao ulazni parametar pri kreiranju simulacionog stohastičkog ARCR modela korišćene su vrednosti efektivne infiltracije, proračunate na osnovu korigovanih vrednosti kiše i vodenog ekvivalenta snega za klimatološku stanicu Bjelašnica, dok su kao izlazne veličine korišćene vremenske serije isticanja podzemnih voda na vrelu Bosne. Korišćenje efektivne infiltracije kao ulazne veličine pri formiranju modela podrazumeva amortizaciju impulsnih šokova, uzrokovanih individualnim kišnim epizodama, što korišćenjem samo bruto padavina pri kreiranju modela nije moguće. Za kreiranje simulacionog modela korišćeni su podaci za period oktobar 2015 – septembar 2017. godine, dok je period 1.10.2017 – 30.9.2018. korišćen za verifikaciju i kalibraciju modela.

Simulacioni ARCR model 4. reda, kojim je izvršena simulacija i predviđanje isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne predstavljen je jednačinom (8.1):

$$Q_t = 0,201775 + 1,615031Q_{t-1} - 0,99068Q_{t-2} + 0,448055Q_{t-3} - 0,12094Q_{t-4} + 0,022182I_{ef,t-1} - 0,01746I_{ef,t-2} + 0,00869I_{ef,t-3} - 0,00678I_{ef,t-4} \quad (8.1)$$

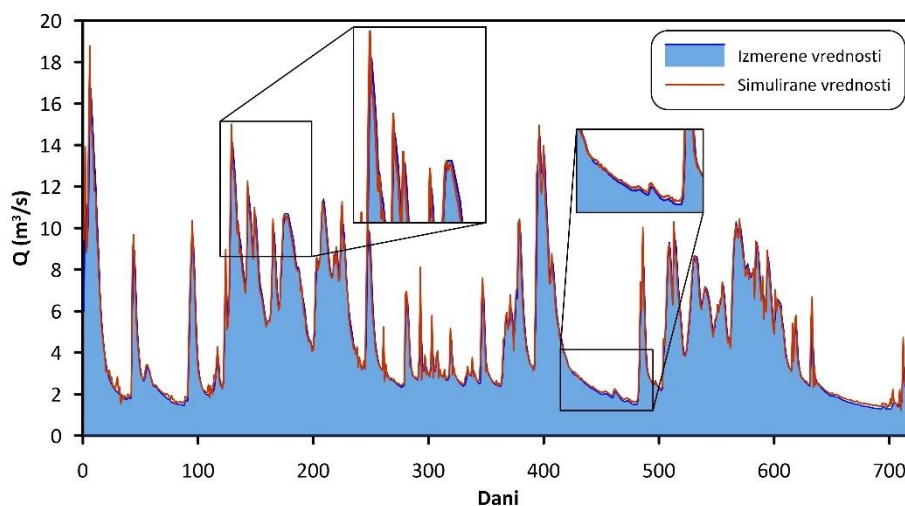
gde su:

Q_t – simulirana vrednost isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne u trenutku t ;

$Q_{t-1...t-4}$ – isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne 1 do 4 dana pre trenutka t ;

$I_{ef,t-1...t-4}$ – efektivna infiltracija karstnog sistema vrela Bosne 1 do 4 dana pre trenutka t ;

Grafički prikaz i komparacija izmerenih realnih vrednosti isticanja podzemnih voda vrela Bosne i simuliranih vrednosti isticanja primenom ARCR modela 4. reda za period oktobar 2015 – septembar 2017. godine dat je na sl. 8.1, sa koje se vidi praktično perfektno slaganje izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja i u periodima velikih i u periodima malih voda (uveličani delovi komparativnog hidrograma). Prosečna vrednost reziduala modela iznosi 7,64%, odnosno 366,7 l/s. Iako je stohastičkim modelima generalno vrlo teško precizno simulirati maksimalne pikove isticanja podzemnih voda, simulacioni model za vrela Bosne je uspešno simulirao i vrednosti isticanja pri velikim vodama. Takođe, koeficijent korelacije simuliranih i izmerenih vrednosti od 0.979 ukazuje na skoro idealnu vezu ove dve promenljive.



Sl. 8.1. Komparacija izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja podzemnih voda vrela Bosne primenom ARCR modela za period oktobar 2015 – septembar 2017. godine sa uveličanim simulacijama velikih i malih voda

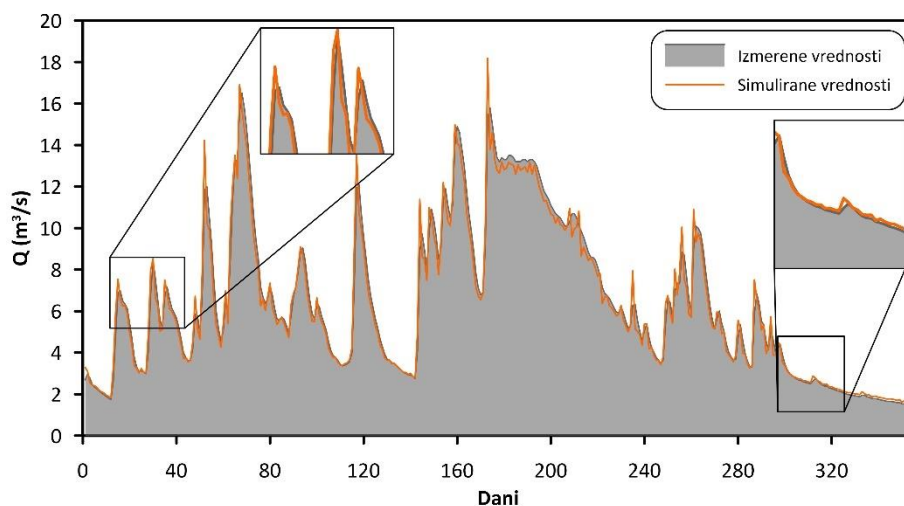
U cilju provere boniteta modela, izvršena je analiza varijansi modela i reziduala, čiji su rezultati prikazani u ANOVA tabeli (engl. *Analysis of Variance*), prikazanoj u tabeli 8.1, koja testira simulacioni model preko F koeficijenta koji sledi Fišerovu raspodelu.

Tabela 8.1. ANOVA tabela analize varijansi modela i reziduala za karstni sistem vrela Bosne; Legenda: **SK** – suma kvadrata; **BSS** – broj stepeni slobode; **SVSK** – srednja vrednost sume kvadrata

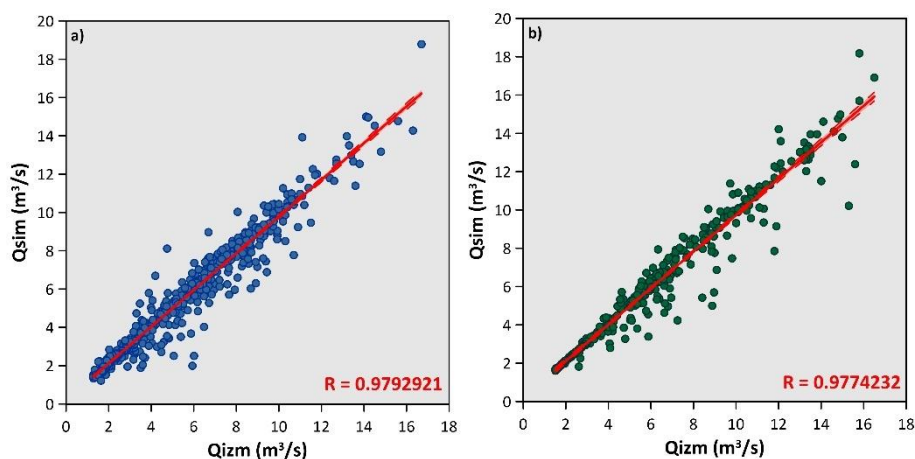
Komponenta	SK	BSS	SVSK	\sqrt{SVSK}	F statistika	F tablična vrednost za $\alpha = 0,05$
Modela	3778	8	472,3	21,73		
Reziduala	187	356	0,527	0,726	29,93	1,94
Ukupno	3965	364	10,69	3,269		

Bonitet modela pokazuje se na osnovu komparacije F koeficijenta i tablične vrednosti za interval poverenja $\alpha = 0.05$ (tj. 95% verovatnoća). S obzirom da je vrednost F koeficijenta simulacionog modela isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne 29,93, a tablična vrednost 1,94 može se konstatovati da je model veoma dobar.

U cilju verifikacije i kalibracije simulacionog modela, izvršena je simulacija isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne za vremensku seriju osmatranja od oktobra 2017. do septembra 2018. godine, koja nije uključena pri kreiranju inicijalnog modela. Naime, jednačina (8.1) simulacionog ARCR modela 4. reda formirana na osnovu perioda osmatranja 2015-2017 iskorišćena je za simulaciju dnevnih vrednosti isticanja podzemnih voda ovog sistema za period 1.10.2017 – 30.9.2018, dok je kao ulazna veličina korišćena efektivna infiltracija za simulirani period (2017-2018). Na sl. 8.2 dat je komparativni prikaz simuliranih i izmerenih vrednosti isticanja podzemnih voda vrela Bosne za dati period. Vrednosti reziduala su slične kao u slučaju vremenskih serija koje su korišćene za kreiranje modela – prosečna razlika izmerenih i simuliranih vrednosti za period 2017-2018 iznosi 6,25% odnosno 398,07 l/s, dok je koeficijent korelacije 0.977 (Sl. 8.3). Rezultati validacije modela još jednom potvrđuju bonitet modela, odnosno njegovu visoku pouzdanost.



Sl. 8.2. Komparacija izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne za period oktobar 2017 – septembar 2018. godine sa uveličanim simulacijama velikih i malih voda, u cilju verifikacije ARCR simulacionog modela isticanja ovog sistema



Sl. 8.3. Korelacija izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja podzemnih voda karstnog sistema vrela Bosne primenom ARCR modela: a) period 2015-2017. godina; b) period 2017-2018. godina

Simulacioni i prediktivni model isticanja podzemnih voda vrela Bosne predstavlja izuzetno koristan alat pri upravljanju podzemnim vodnim resursima u realnom vremenu, budući da model 4. reda koji je iskorišćen u ovom primeru daju prognozu isticanja vrela na osnovu prihranjivanja sistema u prethodna 4 dana. Takođe, svrha modela može biti i u prognozi isticanja podzemnih voda na osnovu unapred zadatih vrednosti kiše i snega, koje su uključene u efektivnu infiltraciju (ulazna veličina modela), što je posebno važno pri sezonskoj prognozi isticanja podzemnih voda, na osnovu koje je moguće predvideti vrednost isticanja na dnevnom nivou u periodu topljenja snega ili u recesionom periodu. Tako, na osnovu kreiranog modela relativno jednostavno se mogu prognozirati buduće vrednosti isticanja vrela Bosne, kako bi se videlo kada se može očekivati popunjavanje rezervi sistema, odnosno kada će isticanje biti na minimumu i koliko će trajati. Stoga, model može poslužiti pri definisanju mera regulacije karstne izdani, kao i pri određivanju perioda deponovanja („čuvanja“) viška vode koje su neophodne tokom letnjih meseci kada je potreba za njom najveća, a sistem u periodu recesije.

Kreirani stohastički model se može iskoristiti npr. pri odlučivanju o mogućnostima dopunskog zahvatanja podzemnih voda vrela Bosne, s obzirom na to da se podzemne vode ovog vrela indirektno koriste za vodosnabdevanje stanovništva Sarajeva. Na taj način, moguće je predvideti periode u kojima bi se mogla zahvatiti dodatna količina vode, tako da karstni sistem

ostane u kategoriji *Nije pod kvantitativnim pritiskom*, što je posebno važno u periodima letnjih meseci. Na kraju, osim problema vodosnabdevanja, simulacioni i prediktivni model može se iskoristiti i sa aspekta prognoze poplavnih talasa, imajući u vidu veoma visoke vrednosti isticanja tokom perioda velikih voda, što bi bilo u sklopu sistema ranog upozorenja kako bi se stanovništvo na vreme zaštitilo od nepogoda i izlivanja vode iz rečnih korita, što je posebno značajno za stanovništvo opštine Ilidža i okolnih naselja.

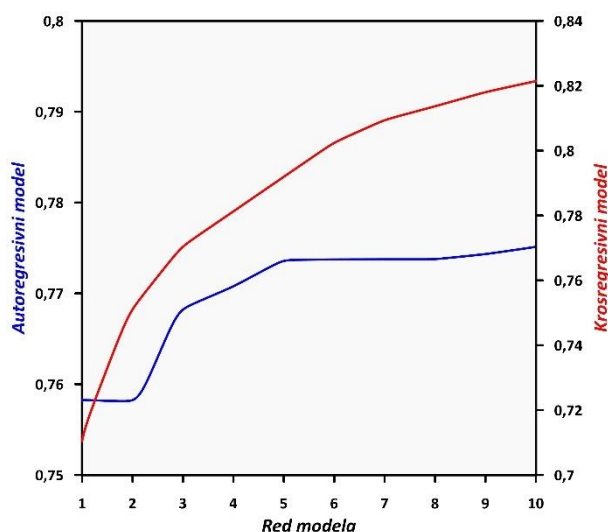
Sve navedeno ukazuje na značaj simulacionih modela kojima se predviđa ponašanje režima podzemnih karstnih voda pri različitim hidrometeorološkim stanjima. Stoga, razvoj simulacionih modela mora predstavljati neizostavnu tehniku pri upravljanju podzemnim vodnim resursima, bilo oni kaptirani ili ne.

8.1.2 Stohastički model kvantiteta podzemnih voda na primeru vrele Rijeke Crnojevića i transfer rezultata na neizučene terene

Transfer rezultata sa izučenih na neizučene karstne terene česta je praksa u hidrogeologiji karsta, s obzirom na mali fond podataka kojima se raspolaže na većini karstnih primera u regionu. Stoga, transfer rezultata istraživanja i analiza karstnih podzemnih voda na neizučene terene mogu dati indikacije ponašanja nepoznatih karstnih sistema. Primeri transfera analiza sličnih karstnih sistema pokazali su da se metoda analogije može koristiti radi dobijanja preliminarnih informacija o ponašanju sličnih, relativno neizučenih karstnih terena (Ristić Vakanjac, 2012; Kovács, 2021).

Stohastički model kvantiteta podzemnih voda kreiran je takođe za vrelo Rijeke Crnojevića, kako bi se regresiona jednačina mogla iskoristiti za simulaciju isticanja karstnih podzemnih voda koje ističu na vrulji Bolje Sestre, koja se koriste za vodosnabdevanje Crnogorskog primorja. Rezultati stohastičke analize i simulacije na osnovu modela koji je kreiran za vrelo Rijeke Crnojevića su iskorišćene za simulaciju i predviđanje vrednosti izdašnosti vrulje Bolje Sestre, tako što su parametri jednačine regresionog modela za Rijeku Crnojevića iskorišćeni za simulaciju izdašnosti vrulje Bolje Sestre, uz korišćenje padavina sa klimatološke stanice Podgorica, koje predstavljaju ulaz u sistem Boljih Sestara. Ovaj transfer rezultata nije retkost u hidrogeologiji karsta, s obzirom da se metoda analogije često koristi kod terena za koje ne postoje pouzdani ulazni podaci, ali imaju slične hidrogeološke odlike terena sa terenima za koje su određeni ulazni i izlazni podaci (Geoprojekt, 2022).

U cilju simulacije isticanja podzemnih voda kreirani su autoregresivni (AR) i krosregresivni (KR) modeli isticanja vrele Rijeke Crnojevića za period 2010-2015 na osnovu vremenskih serija isticanja vrele Rijeke Crnojevića osmatranih na stanici Brodske njive, odnosno padavina osmatranih na stanici Cetinje (Geoprojekt, 2022). Autoregresivni model ima koeficijent autoregresije u rasponu od 0,758242884 (red modela 1) do 0,775126835 (red modela 10), dok kros-regresivni model ima koeficijent kros-regresije od 0,710486373 (red modela 1) do 0,821419172 (red modela 10) (Geoprojekt, 2022). Na slici 8.4 prikazani su koeficijenti regresije za kreirani AR i KR model za vrelo Rijeke Crnojevića.

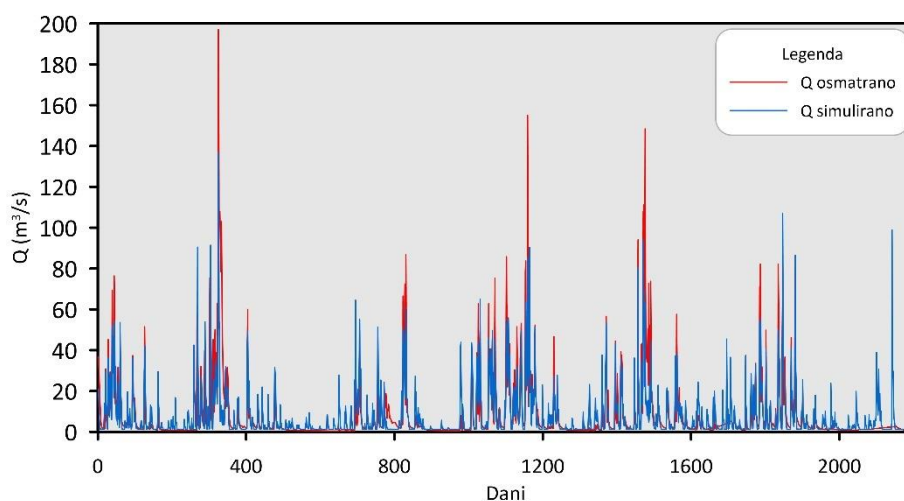


Sl. 8.4 AR (plava linija) i KR (crvena linija) model vrele Rijeke Crnojevića (Geoprojekt, 2022)

Kros-regresivni model je odabran za simulaciju isticanja, s obzirom da je bilo potrebno kreirati simulacioni model koji bi mogao da se iskoristi i za neizučene terene gde se raspolaže samo podacima o padavinama. Stoga, KR model koji simulira isticanje samo na osnovu padavina je iskorišćen za simulaciju i transfer rezultata. Za simulaciju isticanja podzemnih voda vrele Rijeke Crnojevića usvojen je 4. red kros-regresivnog modela (jednačina 8.2).

$$Q_t = 1.273102 + 0.37945P_{t-1} + 0.122813P_{t-2} + 0.085219P_{t-3} + 0.085141P_{t-4} \quad (8.2)$$

Rezultati simulacije isticanja podzemnih voda prikazani na sl. 8.5, sa koje se vidi dobro poklapanje simuliranih i izmerenih vrednosti isticanja podzemnih voda ovog vrele.



Sl. 8.5 Uporedni dijagram izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja vrele Rijeke Crnojevića na osnovu KR modela 4. reda (Geoprojekt, 2022)

Parametri regresione jednačine (8.2) KR modela 4. reda preneti su na obližnji neizučeni teren – vrulju Bolje Sestre, u cilju simulacije isticanja i popunjavanje niza nedostajućih podataka o izdašnosti ove vrulje, uz korišćenje padavina sa stanice Podgorica u periodu april – jul 2021. Simulacija dnevnih vrednosti izdašnosti vrulje Bolje Sestre data je na slici 8.6, sa koje se uočava veća vrednost reziduala tokom perioda velikih voda, budući da KR model nema mogućnost amortizacije uticaja obilnih kišnih epizoda (Geoprojekt, 2022). U cilju kalibracije sračunatih rezultata, utvrđivanjem korelacije između simuliranih i merenih vrednosti isticanja, kreirana je

polinomna funkcija četvrtog stepena (8.3), kojom je neophodno kalibrisati simulirane vrednosti kako bi model mogao da pruži pouzdanije izlazne rezultate.

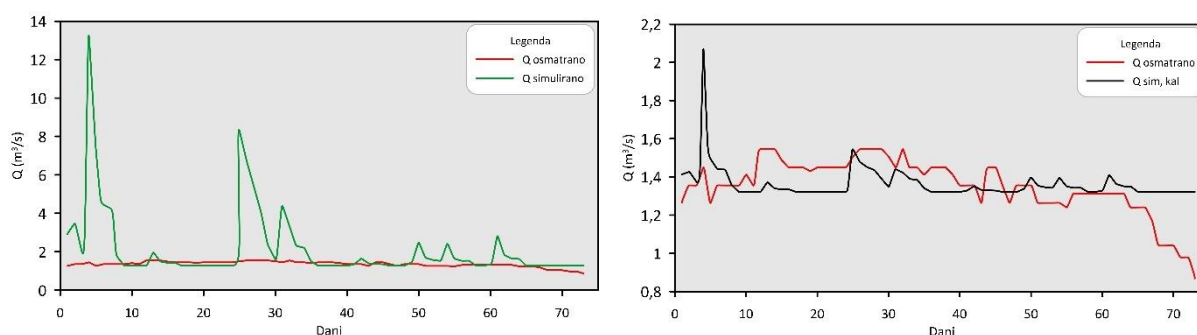
$$Q_{sim,cal} = 1.1625 + 0.1673Q_{sim} - 0.0376Q_{sim}^2 + 0.0036Q_{sim}^3 - 0.0001Q_{sim}^4 \quad (8.3)$$

gde je,

$Q_{sim,cal}$ - kalibrisana simulirana vrednost izdašnosti vrulje Bolje Sestre;

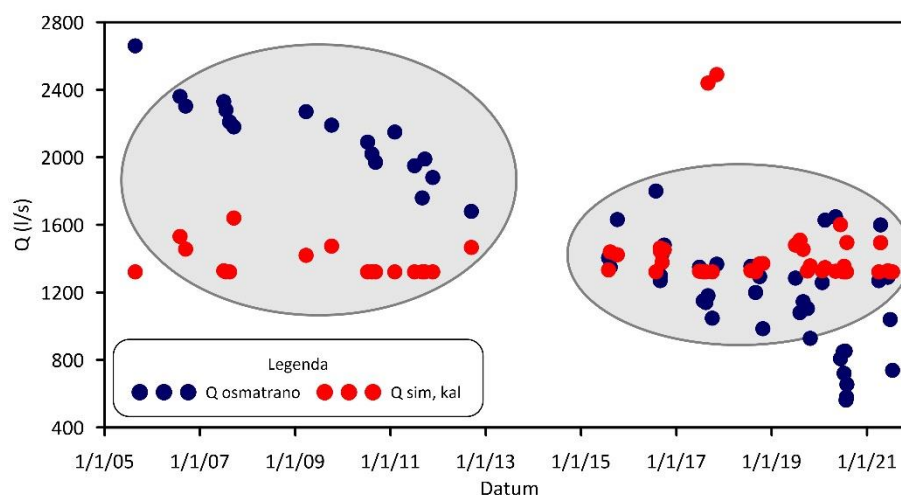
Q_{sim} - izdašnost vrulje Bolje Sestre, simulirana parametrima KR modela 4. reda, izrađenog za vrelo Rijeke Crnojevića

Kalibracijom rezultata simulacionog modela dobija se realnija simulacija dnevnih vrednosti isticanja vrulje Bolje Sestre, što se može videti i na sl. 8.7. Koeficijent korelacije između izmerenih vrednosti i simuliranih kalibrisanih vrednosti isticanja vrulje Bolje Sestre na osnovu parametara modela dobijenih za vrelo Rijeke Crnojevića iznosi 0.25, što ukazuje na relativno slabu korelaciju.



Sl. 8.7. Uporedni dijagram osmatranih i simuliranih (levo) i osmatranih i kalibrisanih simuliranih (desno) vrednosti isticanja vrulje Bolje Sestre na osnovu parametara KR modela 4. reda kreiranog za vrelo Rijeka Crnojevića (Geoprojekt, 2022)

Izrađeni KR model transferisan na vrulju Bolje Sestre, može se iskoristiti i za kreiranje hibridne vremenske serije isticanja podzemnih voda Boljih Sestara za period 2005-2021. godina, s obzirom da su u tom periodu sporadično vršena hidrometrijska merenja. Uključivanjem podataka o padavinama sa stanice Podgorica u pomenutom periodu, moguće je kreirati sintetički niz podataka o isticanju podzemnih voda prethodnih 15-ak godina i uporediti sa rezultatima hidrometrijskih merenja. Tako, kreiranje vremenske serije isticanja podzemnih voda vrulje Bolje Sestre izvedeno je za prethodnih 15 godina, preciznije od 2005. godine, kada je izvršeno prvo hidrometrijsko merenje. Uporedni prikaz izmerenih vrednosti sa kalibrisanim i simuliranim vrednostima izdašnosti vrulje Bolje Sestre od 2005. do 2021. godine dat je na sl. 8.8. Na pomenutom dijagramu jasno se mogu uočiti dva različita simulaciona perioda: prvi sa vrlo visokim vrednostima reziduala i drugu sa nižim rezidualima i mnogo boljim poklapanjem simuliranih i merenih vrednosti. Prvi period je karakterističan za interval od 2005. do 2011. godine, kada nije bilo eksploatacije podzemnih voda, tj. kada je izvorište tek pušteno u rad (2011. godine). Tako ogromne razlike mogu ukazivati na to da se karstna izdan Boljih Sestara u tom periodu, osim efektivne infiltracije padavina na karstnim terenima Kolozuba prihranjivala i infiltracijom aluvijalnih podzemnih voda nastalih poniranjem površinskih voda Morače i Cijevne, što kros-regresivni model ne uzima u obzir.



Sl. 8.8. Uporedni prikaz izmerenih i kalibrisanih simuliranih vrednosti isticanja vrulje Bolje Sestre, gde se uočava veće rasipanje tačaka u periodu 2005 - 2012 i dobro poklapanje tačaka u periodu 2015 - 2021.

Sa druge strane, period od 2015. do 2021. godine karakterističan je po tome što se u većini slučajeva izmerene i simulirane vrednosti poklapaju, sa postojanjem greške reziduala od oko 10%. To može nedvosmisleno ukazivati na direktan uticaj efektivne infiltracije padavina na izdašnost vrulje, odnosno na mogućnost da je vrulja Bolje Sestre u pomenutom periodu izgubila svoj dodatni način prihranjivanja iz intergranularne izdani, tj. površinskih tokova Morače i Cijevne, tako da je izdašnost formirana samo na osnovu efektivno infiltriranih padavina na karstnim terenima. Izostanak dodatnog prihranjivanja iz površinskih tokova Morače i Cijevne vrlo verovatno je posledica eksploatacije šljunka iz korita tih reka, što je naročito bilo izraženo u periodu 2015-2021 i prouzrokovalo je veštačku promenu u koritu, što je reorijentisalo tok infiltriranih vode. Svakako, nešto veće rezidualne vrednosti u periodu od 2015 - 2021 mogu se objasniti i nesavršenošću modela, ali takođe i greškama kod hidrometrijskih merenja proticaja na izvorištu Bolje Sestre u smislu da kvazi-stacionarni režim toka nije uvek dostignut prilikom merenja protoka, često kao posledica rada pumpe (Geoprojekt, 2022).

Koncept kreiranja simulacionog modela za izučene terene i njegov transfer na neizučena područja može dati vrlo korisne informacije o hidrogeološkim karakteristikama takvih terena. Takav primer predstavlja i vrulja Bolje Sestre, na kome je vrlo jasno uočen problem prekomerne eksploatacije šljunka iz korita površinskih tokova koji prihranjuju karstni sistem. Pomenuti model je, iako sa svim svojim manama i nesavršenošću, dao konkretne rezultate i usmerio hidrogeološka istraživanja na rešavanje problema opadanja kapaciteta izvorišta koji predstavlja osnov turizma na Crnogorskom primorju.

8.1.3 Stohastički model kvaliteta podzemnih voda na primeru vrela Mokra

Kao što je bio slučaj sa kvantitativnom komponentom režima podzemnih voda, simulacioni i prediktivni model moguće je formirati i za vremenske serije hemijskih parametara kako bi se ustanovile oscilacije kvaliteta podzemnih voda u vremenu. To mogu biti serije osmatranja električne provodljivosti, mutnoće, mikrobiološkog i bakteriološkog zagađenja, odnosno bilo kog drugog parametra koji može imati negativne posledice na korišćenje podzemnih voda u bilo koje svrhe. Primena simulacionih modela kvaliteta podzemnih voda nije retkost u hidrogeološkoj praksi (Margeta & Fistanic, 2004; Kovačić & Ravbar, 2015; Ristić Vakanjac et al. 2018; Petrović & Marinović, 2019). Simulacioni model koji je kreiran za karstni sistem vrela Mokre, formiran je na osnovu efektivne infiltracije kao ulazne veličine i dnevnih vrednosti mutnoće vode kao izlazne veličine, budući da je povišena mutnoća posledica pikova isticanja podzemnih voda prouzrokovanih visokim vrednostima efektivne infiltracije, koje u sebe

uključuju kišu i sneg kao glavne vidove prihranjivanja ovog karstnog sistema. Uzročno-posledična veza efektivne infiltracije i mutnoće potvrđena je i kros-korelacionom analizom ove nezavisne i zavisne promenljive, što je prikazano na sl. 8.9, sa koje se vidi da se mutnoća obično javlja sa jednim danom zakašnjenja u odnosu na efektivnu infiltraciju.

Simulacioni ARCR model 4. reda formiran je za vremenske serije efektivne infiltracije i mutnoće karstnog sistema vrela Mokre u cilju prognoze budućih vrednosti ovog hemijskog parametra. Rezultati simulacije dati su na sl. 8.10, odnosno jednačinom (8.4):

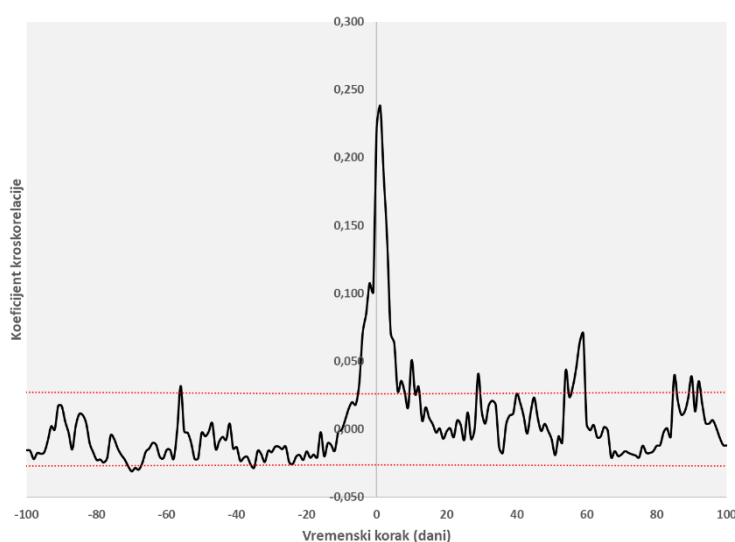
$$NTU_t = 0,2052 + 0,9962NTU_{t-1} - 0,5375NTU_{t-2} + 0,2735NTU_{t-3} - 0,0923NTU_{t-4} + 0,0097I_{ef,t-1} - 0,0144I_{ef,t-2} + 0,0309I_{ef,t-3} - 0,0166I_{ef,t-4} \quad (8.4)$$

gde su:

NTU_t – simulirana vrednost mutnoće podzemnih voda karstnog sistema Mokra u trenutku t ;

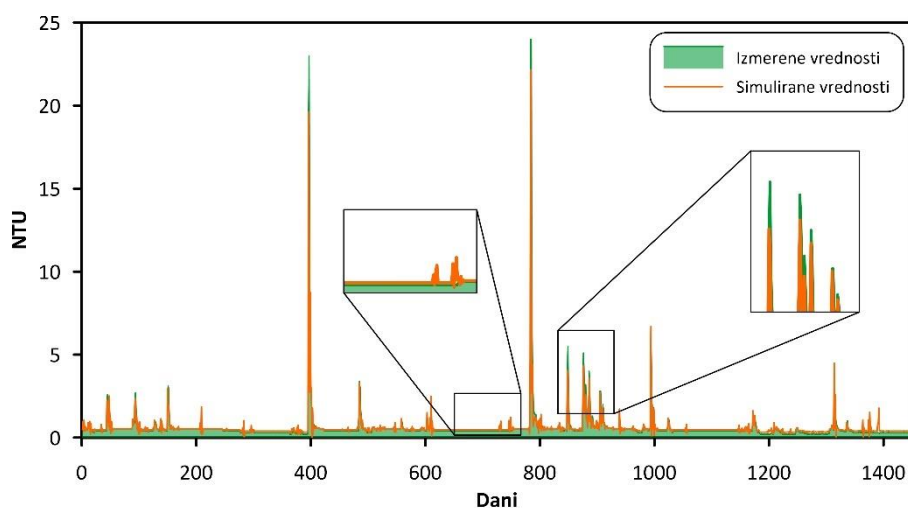
$NTU_{t-1...t-4}$ – mutnoća podzemnih voda karstnog sistema Mokra 1 do 4 dana pre trenutka t ;

$I_{ef,t-1...t-4}$ – efektivna infiltracija karstnog sistema Mokra 1 do 4 dana pre trenutka t ;



Sl. 8.9. Kros-korelogram efektivne infiltracije i mutnoće za podzemne vode karstnog sistema vrela Mokre za period oktobar 2015 – septembar 2019. godine

Sl. 8.10 pokazuje skoro perfektno slaganje izmerenih i simuliranih vrednosti mutnoće podzemnih voda tokom celokupnog perioda za koji je model kreiran. Naime, model veoma dobro simulira vrednosti mutnoće podzemnih voda i u periodu velikih i u periodu malih voda (uveličani delovi komparativnog hidrograma), kao i tokom ostalih dana hidrološke godine. Prosečna vrednost reziduala modela iznosi 32%, odnosno 0,194 NTU jedinica. Koeficijent korelacije simuliranih i izmerenih vrednosti od 0.76 ukazuje na jaku vezu ove dve promenljive.



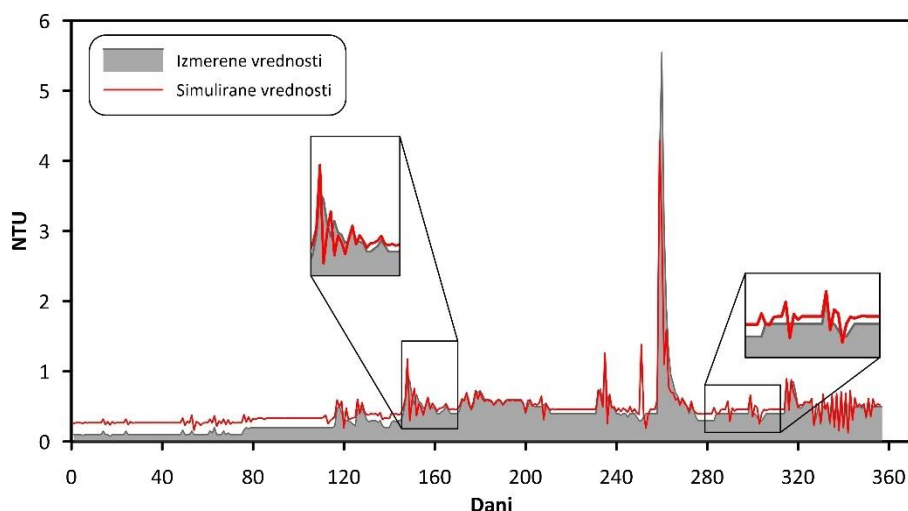
Sl. 8.10. Komparacija izmerenih i simuliranih vrednosti mutnoće podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokre primenom ARCR modela za period oktobar 2015 – septembar 2019. godine sa uveličanim simulacijama velikih i malih voda

U cilju provere boniteta modela, izvršena je analiza varijansi modela i reziduala u okviru ANOVA tabele (Tabeli 8.2). Bonitet modela definisan je na osnovu intervala poverenja $\alpha = 0.05$, te imajući u vidu proračunatu vrednost F koeficijenta simulacionog modela mutnoće podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokre od 7,8, i tabličnu vrednost od 1,94 može se konstatovati da je model relativno pouzdan.

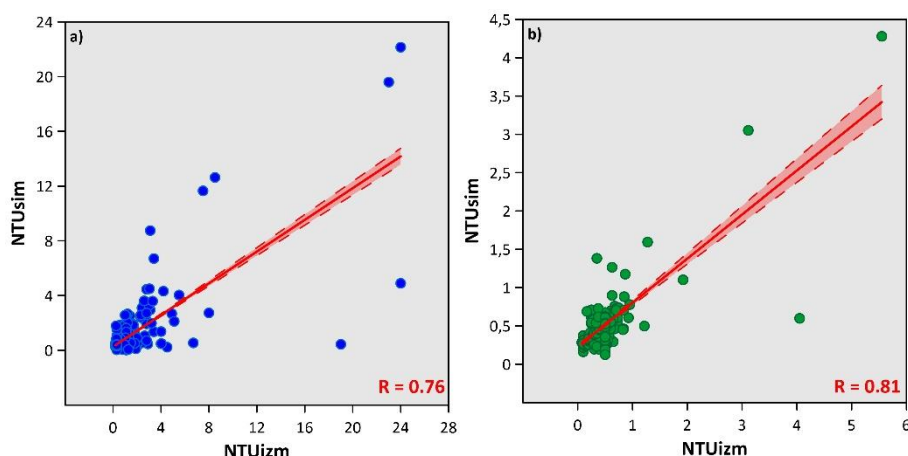
Tabela 8.2. ANOVA tabela analize varijansi modela i reziduala za karstni sistem vrela Mokra; Legenda: **SK** – suma kvadrata; **BSS** – broj stepeni slobode; **SVSK** – srednja vrednost sume kvadrata

Komponenta	SK	BSS	SVSK	\sqrt{SVSK}	F statistika	F tablična vrednost za $\alpha = 0,05$
Modela	35	8	4,29	2,07	7,8	1,94
Reziduala	25	356	0,07	0,26		
Ukupno	60	364	0,13	0,36		

I u primeru karstnog sistema vrela Mokre, izvršena je verifikacija simulacionog modela mutnoće u periodu oktobar 2019 – septembar 2020. godine, koji nije korišćen pri proračunu parametara inicijalnog modela. Sl. 8.11 prikazuje simulaciju mutnoće u periodu oktobar 2019 – septembar 2020. godine na osnovu jednačine (8.4), tj. parametara simulacionog ARCR modela 4. reda. Model pokazuje veoma dobro poklapanje izmerenih i prediktivnih vrednosti mutnoće tokom celokupne hidrološke godine, dok se samo u početnom periodu javljaju veći reziduali. Vrednosti reziduala su manje nego u slučaju vremenskih serija koje su korišćene za kreiranje modela – 30,43% odnosno 0,138 NTU jedinica, dok je koeficijent korelacije 0.81 (Sl. 8.12), čime je još jednom potvrđen bonitet, ali i pouzdanost simulacionog modela.



Sl. 8.11. Komparacija izmerenih i simuliranih vrednosti mutnoće podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokre za period oktobar 2019 – septembar 2020. godine sa uveličanim simulacijama velikih i malih voda, u cilju validacije ARCR simulacionog modela mutnoće ovog sistema



Sl. 8.12. Korelacija izmerenih i simuliranih vrednosti mutnoće podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokre primenom ARCR modela: a) period 2015-2019. godina; b) period 2019-2020. godina

Potencijalni pritisak na kvalitet podzemnih voda karstnog sistema vrela Mokre potvrđen je simulacionim modelom, koji pokazuje visoku osetljivost hemijskog parametra mutnoće na promenu efektivne infiltracije, tj. prihranjivanja sistema. Primena prognostičkog modela mutnoće podzemnih voda takođe nalazi svoju praktičnu primenu u upravljanju podzemnim vodnim resursima, pogotovo onim koja su kaptirana za vodosnabdevanje stanovništva, kao što je slučaj sa vrelom Mokra, sa koga se snabdeva Niš. Kreiranje simulacionog modela fluktuacije mutnoće podzemnih voda u okviru upravljanja podzemnim vodama imalo bi značajnu funkciju u sistemu ranog upozoravanja, budući da pouzdani prognostički modeli mogu nekoliko dana unapred najavljujivati moguće pogoršanje kvaliteta podzemnih voda, što bi na kraju omogućilo pravovremeno reagovanje nadležnih. Formiranjem ovakvog modela u funkciji upozorenja na pogoršanje kvaliteta podzemnih voda preventivno bi se moglo delovati na zatvaranje izvorišta i prekid distribucije kaptiranih količina vode, kao što je bio slučaj sa izvorištem Mokra tokom 2020. godine (Marinović & Petrović, 2021). Takođe, osim preventivnog delovanja sa aspekta zatvaranja izvorišta, ovakav prognostički model bi najavom pogoršanja kvaliteta voda usled povišene koncentracije mutnoće, upozorio donosiocima odluka da unapred obezbede dodatne količine vode kako bi se osiguralo kontinuirano vodosnabdevanje stanovništva.

8.2 Aplikacija logističke regresione analize na odabranim područjima

8.2.1 Odabir i rezultati primene metode logističke regresione analize

Logistička regresiona (LR) analiza primenjena je u okviru doktorske disertacije u cilju definisanja verovatnoće pojave izdašnosti vrela Perućac, Seljašnice, Mokre, Mlave, Oka Bijele, Rijeke Crnojevića i vrela Bosne ispod srednjegodišnje vrednosti, kako bi se predvideo kvantitativni pritisak na navedene karstne sisteme. Naime, u tom cilju kreirani su LR modeli za svako navedeno vrelo, tako što su definisani prediktori koji direktno ukazuju na pogoršanje kvantitativnog statusa karstnih podzemnih voda. Istovremeno, definisana verovatnoća pojave kvantitativnog pritiska iskorišćena je kao očekivani rezultat za neizučena karstna vrela u bližem okruženju svake analizirane pojave.

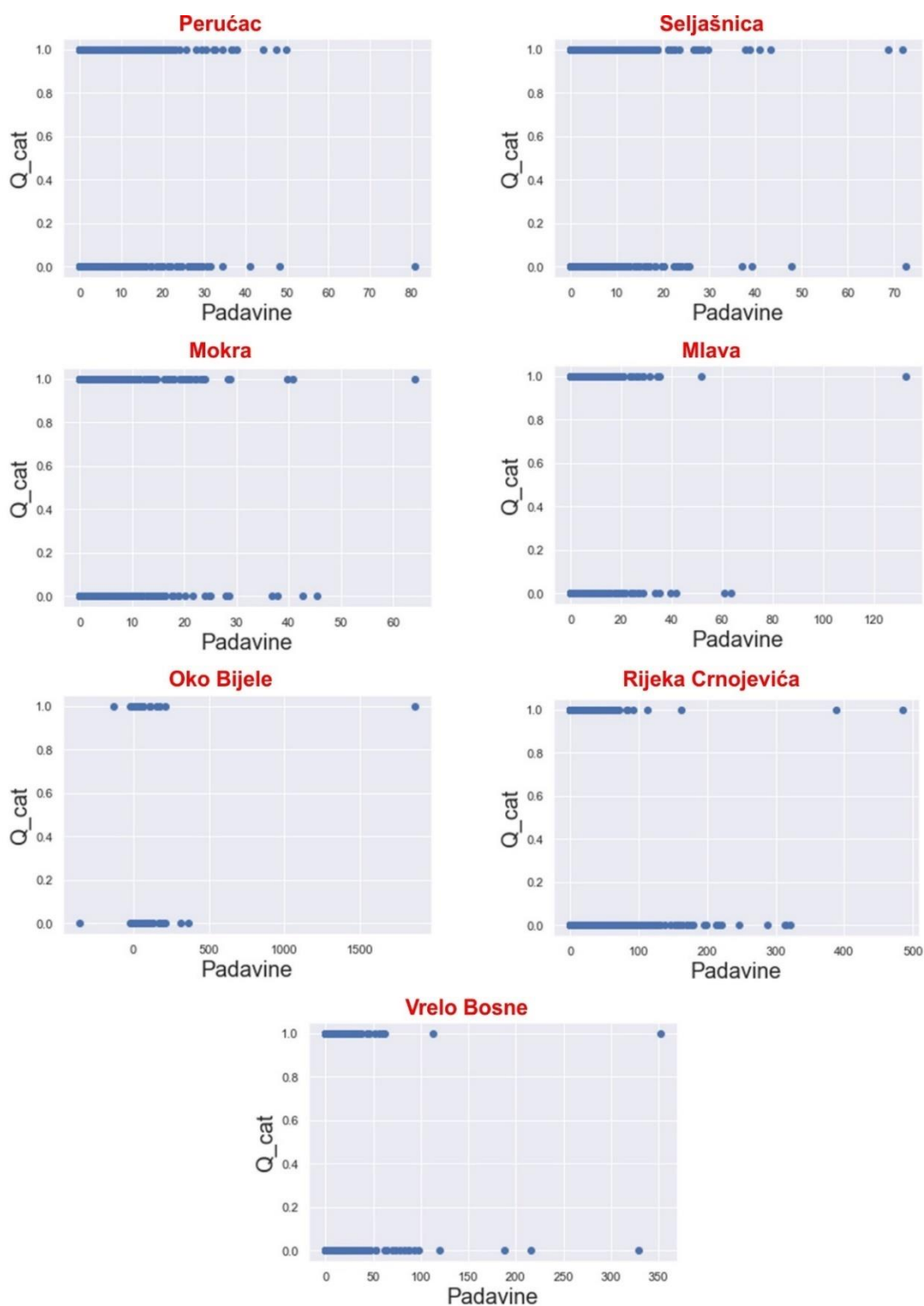
U okviru LR analize, odabrani su sledeći prediktori za koje se smatra da utiču na krajnji ishod:

- Kiša;
- Sneg;
- Potencijalna evapotranspiracija;
- Stvarna evapotranspiracija;
- Efektivna infiltracija;
- Intercepcija u (van)vegetacionom periodu;
- Intercepcija u periodima bez snega.

Navedene nezavisne varijable predstavljaju parametre bilansne jednačine karstnih podzemnih voda, koje utiču na krajnji ishod, što je u ovom slučaju vrednost isticanja podzemnih voda odabranih karstnih vrela iznad ili ispod srednjegodišnje izdašnosti.

Univarijantna LR analiza primenjena je tako što je formiran regresioni model samo na osnovu svake pojedinačne nezavisne varijable u cilju definisanja iznad- ili ispodprosečne vrednosti isticanja karstnih podzemnih voda, što je podrazumevalo pretvaranje vremenske serije izdašnosti vrela u kategoričku varijablu sa vrednostima 0 i 1, tako da kada je Q_{vrela} jednako 1 tada je vrednost isticanja manja od prosečne višegodišnje vrednosti (vrelo ima smanjenu izdašnost), a kada je Q_{vrela} jednako 0, tada je proticaj veći od prosečne višegodišnje vrednosti izdašnosti vrela.

Preliminarni rezultati univarijantne LR analize su prikazani na sl. 8.13 u vidu logaritamskih dijagrama, kako bi se videla distribucija sirovih ulaznih podataka u odnosu na izdašnost vrela (u dihotomnom obliku). Na sl. 8.13 prikazani su rezultati LR modela kreiranog samo na osnovu vremenske serije padavina u vidu kiše, budući da je analizom ustanovljeno da se identični izgledi dijagrama dobijaju za svaku nezavisnu varijablu.



Sl. 8.13. Univarijantna logistička regresiona analiza za odabrana karstna vrela na osnovu kišnih padavina kao ulaznog nezavisnog prediktora i izdašnosti vrela, izraženog kao kategorička varijabla

Analizom logaritamskog dijagrama za svaku nezavisnu varijablu, odnosno dijagrama na sl. 8.13 na kome je predstavljen LR model na osnovu kišnih padavina, uočava se da univarijantna LR analiza nije pogodna za raspoložive podatke, pogotovo ako se uporede sa teorijskim dijagramom LR analize (videti sl. 4.14, poglavlje 4.4.3). Osnovni problemi koji utiču na to da univarijantna LR analiza nije pouzdana za analizu vremenskih serija na sirovim podacima i varijablama koje su razmatrane su sledeći:

- Postojanje linearnosti između pojedinih varijabli;
- Postojanje autokorelacije u nizovima;
- Postojanje multikolinearnosti među varijablama koje treba da uđu u LR model.

Osim ovih, jasno je da se pouzdan LR model za prognozu izdašnosti vrela koja je veća ili manja od srednjegodišnje ne može formirati samo na osnovu jedne varijable koja predstavlja ulaz u karstni sistem, tj. na osnovu samo jednog člana bilansne jednačine karstnih podzemnih voda, već se mora uključiti više prediktora koji očigledno utiču na bilans. Navedeni razlozi generalno ukazuju na to da podaci koji se zasnivaju na vremenskim serijama nisu pogodni za LR analizu. Iz tog razloga kreirane su nove kategoričke (dihotomne) varijable koje u svojim nizovima sadrže samo vrednosti 0 i 1, te je kao naredni korak izvršena višestruka logistička regresija, koja u sebi uključuje više prediktora.

Promenljive koje predstavljaju potencijalne prediktorske varijable (engl. *explanatory variables*) obuhvaćene modelima su iste kao kod univarijantne LR analize (dakle kiša, sneg, potencijalna evapotranspiracija, stvarna evapotranspiracija, efektivna infiltracija, intercepcija u (van)vegetacionom periodu i intercepcija u periodima bez snega). Prvi korak pri kreiranju višestrukog LR modela bio je pretvaranje vremenskih serija svih prediktora u dihotomne varijable, tako što je svaki prediktor sveden na binarni zapis 0 ili 1, u zavisnosti da li se konkretna vrednost serije nalazi iznad ili ispod prosečne višegodišnje vrednosti iste vremenske serije (Tabela 8.3.). Vremenska serija isticanja podzemnih voda je takođe svedena na dihotomni oblik, kao i u slučaju univarijantne LR analize.

Tabela 8.3. Transformacija prediktora u kategoričke (dihotomne) varijable pri formiranju višestrukog LR modela

Naziv prediktora	Promenljiva	Nova varijabla	Vrednost 1	Vrednost 0
Sneg	X	Sneg_Cat	Ispod višegodišnjeg proseka	Iznad višegodišnjeg proseka
Padavine	X	Padavine_Cat	Ispod višegodišnjeg proseka	Iznad višegodišnjeg proseka
Potencijalna evapotranspiracija	X	Pot_ET_Cat	Iznad višegodišnjeg proseka	Ispod višegodišnjeg proseka
Stvarna ET	X	Stv_ET_Cat	Iznad višegodišnjeg proseka	Ispod višegodišnjeg proseka
Efektivna infiltracija	X	Ef_Inf_Cat	Ispod višegodišnjeg proseka	Iznad višegodišnjeg proseka
Intercepcija veg/vanvegetacioni period	X	Int_VV_Cat	Iznad višegodišnjeg proseka	Ispod višegodišnjeg proseka
Intercepcija- bez snega	X	Int_bs_Cat	Iznad višegodišnjeg proseka	Ispod višegodišnjeg proseka
Izdašnost vrela	Y	Q_Cat	Ispod višegodišnjeg proseka	Iznad višegodišnjeg proseka

Višestruki LR model kreiran je na osnovu kôda prilagođenog za *Python* programski jezik:

```
y = data['Q_Cat']
x1 = data[['Sneg_Cat', 'Padavine_Cat', 'Pot_ET_Cat', 'Stv_ET_Cat', 'Ef_Inf_Cat', 'Int_VV_Cat', 'Int_bs_Cat']]
x = sm.add_constant(x1)
reg_log = sm.Logit(y,x)
results_log = reg_log.fit()
# Get the regression summary
results_log.summary()y = data ['Q']
```

Pri finalnom kreiranju LR modela primenjena je *stepwise* metoda za eliminaciju prediktora iz modela, za koje je iteracijama utvrđeno da nemaju statističku značajnost pri formiranju krajnjeg ishoda (Čuk, 2017). Kriterijumi za uključivanje promenljivih u model bio je prag $P < 0.05$, dok je kriterijum za eliminaciju promenljivih iz modela $P > 0.025$.

Postupak iterativnog formiranja višestrukog LR modela primenjen je na svim odabranim primerima, dok je samo na primeru vrela Mlave prikazan detaljan postupak sa objašnjenjem sprovedene analize, tako što je prvo prikazan model sa svim razmatranim varijablama, a zatim je prikazan model u koji su ušle samo statistički značajne varijable. Na svim ostalim primerima, prikazani su samo višestruki LR modeli sa statistički značajnim varijablama.

Iterativni koraci pri kreiranju višestrukog LR modela prikazani su na sl. 8.14, sa koje se u prvoj iteraciji vidi pseudo koeficijent determinacije, logaritamska transformacije verovatnoće i koeficijent značajnost modela (označeno plavom, zelenom i bež bojom) koji pokazuju ispravnost i značaj modela.

Prva iteracija		Druga iteracija																																																																																																										
model summary	Logit Regression Results	model summary	Logit Regression Results																																																																																																									
	<table border="1"> <tr><td>Dep. Variable:</td><td>Q_Cat</td><td>No. Observations:</td><td>1827</td></tr> <tr><td>Model:</td><td>Logit</td><td>Df Residuals:</td><td>1819</td></tr> <tr><td>Method:</td><td>MLE</td><td>Df Model:</td><td>7</td></tr> <tr><td>Date:</td><td>Sat, 30 Jul 2022</td><td>Pseudo R-squ.:</td><td>0.7758</td></tr> <tr><td>Time:</td><td>18:44:38</td><td>Log-Likelihood:</td><td>-274.44</td></tr> <tr><td>converged:</td><td>True</td><td>LL-Null:</td><td>-1224.2</td></tr> <tr><td>Covariance Type:</td><td>nonrobust</td><td>LLR p-value:</td><td>0.000</td></tr> </table>		Dep. Variable:	Q_Cat	No. Observations:	1827	Model:	Logit	Df Residuals:	1819	Method:	MLE	Df Model:	7	Date:	Sat, 30 Jul 2022	Pseudo R-squ.:	0.7758	Time:	18:44:38	Log-Likelihood:	-274.44	converged:	True	LL-Null:	-1224.2	Covariance Type:	nonrobust	LLR p-value:	0.000	<table border="1"> <tr><td>Dep. Variable:</td><td>Q_Cat</td><td>No. Observations:</td><td>1827</td></tr> <tr><td>Model:</td><td>Logit</td><td>Df Residuals:</td><td>1822</td></tr> <tr><td>Method:</td><td>MLE</td><td>Df Model:</td><td>4</td></tr> <tr><td>Date:</td><td>Sun, 31 Jul 2022</td><td>Pseudo R-squ.:</td><td>0.7731</td></tr> <tr><td>Time:</td><td>11:17:20</td><td>Log-Likelihood:</td><td>-277.76</td></tr> <tr><td>converged:</td><td>True</td><td>LL-Null:</td><td>-1224.2</td></tr> <tr><td>Covariance Type:</td><td>nonrobust</td><td>LLR p-value:</td><td>0.000</td></tr> </table>	Dep. Variable:	Q_Cat	No. Observations:	1827	Model:	Logit	Df Residuals:	1822	Method:	MLE	Df Model:	4	Date:	Sun, 31 Jul 2022	Pseudo R-squ.:	0.7731	Time:	11:17:20	Log-Likelihood:	-277.76	converged:	True	LL-Null:	-1224.2	Covariance Type:	nonrobust	LLR p-value:	0.000																																																	
Dep. Variable:	Q_Cat	No. Observations:	1827																																																																																																									
Model:	Logit	Df Residuals:	1819																																																																																																									
Method:	MLE	Df Model:	7																																																																																																									
Date:	Sat, 30 Jul 2022	Pseudo R-squ.:	0.7758																																																																																																									
Time:	18:44:38	Log-Likelihood:	-274.44																																																																																																									
converged:	True	LL-Null:	-1224.2																																																																																																									
Covariance Type:	nonrobust	LLR p-value:	0.000																																																																																																									
Dep. Variable:	Q_Cat	No. Observations:	1827																																																																																																									
Model:	Logit	Df Residuals:	1822																																																																																																									
Method:	MLE	Df Model:	4																																																																																																									
Date:	Sun, 31 Jul 2022	Pseudo R-squ.:	0.7731																																																																																																									
Time:	11:17:20	Log-Likelihood:	-277.76																																																																																																									
converged:	True	LL-Null:	-1224.2																																																																																																									
Covariance Type:	nonrobust	LLR p-value:	0.000																																																																																																									
coefficient table	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>coef</th> <th>std err</th> <th>z</th> <th>P> z </th> <th>[0.025</th> <th>0.975]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>const</td><td>30.2571</td><td>4.013</td><td>7.539</td><td>0.000</td><td>22.391</td><td>38.123</td></tr> <tr><td>Sneg_Cat</td><td>0.3847</td><td>0.279</td><td>1.381</td><td>0.167</td><td>-0.161</td><td>0.931</td></tr> <tr><td>Padavine_Cat</td><td>4.2515</td><td>1.213</td><td>3.506</td><td>0.000</td><td>1.875</td><td>6.628</td></tr> <tr><td>Pot_ET_Cat</td><td>1.0460</td><td>0.572</td><td>1.827</td><td>0.068</td><td>-0.076</td><td>2.168</td></tr> <tr><td>Stv_ET_Cat</td><td>-1.0457</td><td>0.569</td><td>-1.838</td><td>0.066</td><td>-2.161</td><td>0.070</td></tr> <tr><td>Ef_Inf_Cat</td><td>1.5254</td><td>0.270</td><td>5.650</td><td>0.000</td><td>0.996</td><td>2.055</td></tr> <tr><td>Int_VV_Cat</td><td>-6.1997</td><td>1.322</td><td>-4.689</td><td>0.000</td><td>-8.791</td><td>-3.608</td></tr> <tr><td>Int_bs_Cat</td><td>-25.4445</td><td>3.137</td><td>-8.112</td><td>0.000</td><td>-31.592</td><td>-19.297</td></tr> </tbody> </table>		coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]	const	30.2571	4.013	7.539	0.000	22.391	38.123	Sneg_Cat	0.3847	0.279	1.381	0.167	-0.161	0.931	Padavine_Cat	4.2515	1.213	3.506	0.000	1.875	6.628	Pot_ET_Cat	1.0460	0.572	1.827	0.068	-0.076	2.168	Stv_ET_Cat	-1.0457	0.569	-1.838	0.066	-2.161	0.070	Ef_Inf_Cat	1.5254	0.270	5.650	0.000	0.996	2.055	Int_VV_Cat	-6.1997	1.322	-4.689	0.000	-8.791	-3.608	Int_bs_Cat	-25.4445	3.137	-8.112	0.000	-31.592	-19.297	coefficient table	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>coef</th> <th>std err</th> <th>z</th> <th>P> z </th> <th>[0.025</th> <th>0.975]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>const</td><td>29.7321</td><td>3.919</td><td>7.588</td><td>0.000</td><td>22.052</td><td>37.412</td></tr> <tr><td>Padavine_Cat</td><td>4.0107</td><td>1.185</td><td>3.385</td><td>0.001</td><td>1.689</td><td>6.333</td></tr> <tr><td>Ef_Inf_Cat</td><td>1.5871</td><td>0.258</td><td>6.164</td><td>0.000</td><td>1.082</td><td>2.092</td></tr> <tr><td>Int_VV_Cat</td><td>-6.1105</td><td>1.298</td><td>-4.709</td><td>0.000</td><td>-8.654</td><td>-3.567</td></tr> <tr><td>Int_bs_Cat</td><td>-24.7681</td><td>3.037</td><td>-8.155</td><td>0.000</td><td>-30.718</td><td>-18.814</td></tr> </tbody> </table>		coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]	const	29.7321	3.919	7.588	0.000	22.052	37.412	Padavine_Cat	4.0107	1.185	3.385	0.001	1.689	6.333	Ef_Inf_Cat	1.5871	0.258	6.164	0.000	1.082	2.092	Int_VV_Cat	-6.1105	1.298	-4.709	0.000	-8.654	-3.567	Int_bs_Cat	-24.7681	3.037	-8.155	0.000	-30.718	-18.814
		coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]																																																																																																					
	const	30.2571	4.013	7.539	0.000	22.391	38.123																																																																																																					
	Sneg_Cat	0.3847	0.279	1.381	0.167	-0.161	0.931																																																																																																					
	Padavine_Cat	4.2515	1.213	3.506	0.000	1.875	6.628																																																																																																					
	Pot_ET_Cat	1.0460	0.572	1.827	0.068	-0.076	2.168																																																																																																					
	Stv_ET_Cat	-1.0457	0.569	-1.838	0.066	-2.161	0.070																																																																																																					
	Ef_Inf_Cat	1.5254	0.270	5.650	0.000	0.996	2.055																																																																																																					
	Int_VV_Cat	-6.1997	1.322	-4.689	0.000	-8.791	-3.608																																																																																																					
Int_bs_Cat	-25.4445	3.137	-8.112	0.000	-31.592	-19.297																																																																																																						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]																																																																																																						
const	29.7321	3.919	7.588	0.000	22.052	37.412																																																																																																						
Padavine_Cat	4.0107	1.185	3.385	0.001	1.689	6.333																																																																																																						
Ef_Inf_Cat	1.5871	0.258	6.164	0.000	1.082	2.092																																																																																																						
Int_VV_Cat	-6.1105	1.298	-4.709	0.000	-8.654	-3.567																																																																																																						
Int_bs_Cat	-24.7681	3.037	-8.155	0.000	-30.718	-18.814																																																																																																						

Sl. 8.14. Iterativni pristup kreiranju višestrukog LR modela za vrelo Mlave

Crvenom bojom za prvu iteraciju označene su značajnosti svake nezavisne varijable, a u finalni višestruki LR model ulaze samo one sa verovatnoćom $P < 0.05$, što su u ovom slučaju kišne padavine, efektivna infiltracija, intercepcija u (van)vegetacionom periodu i intercepcija u periodima bez snega. Drugi korak, tj. druga iteracija (sl. 8.14) formira višestruki LR model samo

sa značajnim prediktorima, a ispravnost ovog postupka ogleda se u praktično istim vrednostima pseudo koeficijenta determinacije, logaritamske transformacije verovatnoće i koeficijenta značajnost modela koji su sračunati sa svim prediktorima. Tako, sračunati su finalni koeficijenti značajnih varijabli za predikciju verovatnoće isticanja vrela Mlave u iznosu većem ili manjem od srednjegodišnje vrednosti.

Na osnovu koeficijenata sračunatih binarnom LR analizom, moguće je formirati regresionu jednačinu (8.5) za definisanje verovatnoće pojave isticanja podzemnih voda na **vrelu Mlave** koja je ispod ili iznad srednjegodišnje izdašnosti:

$$\text{Logit}(p) = 29.7321 + 4.0107 \times \text{Padavine_Cat} + 1.5871 \times \text{EfInf_Cat} - 6.1105 \times \text{Int}_{vV_cat} - 24.7661 \times \text{Int}_{bScat} \quad (8.5)$$

Primenom jednačine (8.5) može se izračunati šansa da isticanje podzemnih voda vrela Mlave bude ispod srednje višegodišnje vrednosti, pa tako u slučaju kada je vrednost kišnih padavina i efektivne infiltracije ispod višegodišnjeg proseka, a vrednosti intercepcije u (van)vegetacionom i periodu bez snega iznad njega (sve varijable pripadaju kategoričkoj klasi 1), može se napisati sledeća jednačina (8.6):

$$\text{Logit}(p) = 29.7321 + 4.0107 \times 1 + 1.5871 \times 1 - 6.1105 \times 1 - 24.7661 \times 1 \quad (8.6a)$$

$$\text{Logit}(p) = 4.453 \quad (8.6b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7):

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\text{logit}(p)}} \quad (8.7)$$

dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.9885, odnosno postoji šansa od 98,85% da će vrelo Mlave imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a intercepcija iznad višegodišnjeg proseka. Ova vrednost predstavlja i šansu za povećanjem kvantitativnog pritiska ukoliko se značajni prediktori smanje (kiša i efektivna infiltracija) ili povećaju (intercepcija) u odnosu na višegodišnji prosek.

Stepenovanjem Ojlerovog broja koeficijentima višestrukog LR modela za svaku varijablu, može se iskazati osetljivost modela na promenu svake nezavisne varijable. Višestruki LR model pokazuje izrazito veliku verovatnoću da će biti smanjena izdašnost vrela Mlave kada su kišne padavine ispod višegodišnjeg proseka (55 puta, odnosno $e^{4.0107}$ su veće šanse). Ukoliko je efektivna infiltracija ispod godišnjeg proseka, 5 puta (tj. $e^{1.58}$) su veće šanse da će biti registrovana izdašnost na vrelu Mlave ispod višegodišnjeg proseka. Sa druge strane, veoma male su šanse da će izdašnost vrela Mlave biti ispod višegodišnjeg proseka ukoliko je intercepcija iznad godišnjeg proseka (intercepcija u (van)vegetacionom periodu pokazuje smanjenje od 0.0022 puta, tj. $e^{-6.1105}$, dok intercepcija bez snega pokazuje smanjenje izdašnosti od 2×10^{-11} , tj. $e^{-24.7661}$). Ove poslednje dve varijable pokazuju gotovo beznačajan uticaj na krajnji ishod događaja, međutim kada se izbace iz modela, kišne padavine gube statističku značajnost, te ih je neophodno zadržati u modelu.

Identični iterativni koraci kreirani su pri formiranju višestrukih LR modela za sve ostale odabrane karstne sisteme. Finalni koeficijenti regresionih jednačina za svaku lokaciju dati su u objedinjenoj tabeli 8.4.

Tabela 8.4. Koeficijenti i statistički parametri prediktora za svaki karstni sistem pri formiranju višestrukog LR modela

Lokacija	Varijabla	Koeficijent	Standardna greška	P> z
PERUĆAC	Padavine_Cat	0.242	0.12	0.044
	Pot_Et_Cat	0.9614	0.17	0.000
	Stv_Et_Cat	-1.5711	0.169	0.000
	Ef_Inf_Cat	0.7434	0.133	0.000
	Konstanta	0.1194	0.12	0.360
SELJAŠNICA	Padavine_Cat	0.3296	0.133	0.013
	Pot_Et_Cat	0.8255	0.117	0.000
	Ef_Inf_Cat	0.7571	0.145	0.000
	Konstanta	-0.2293	0.137	0.095
MOKRA	Padavine_Cat	0.2845	0.146	0.050
	Pot_Et_Cat	1.1278	0.118	0.000
	Stv_Et_Cat	-1.3395	0.116	0.000
	Ef_Inf_Cat	1.1432	0.183	0.000
	Konstanta	-0.4485	0.162	0.006
MLAVA	Padavine_Cat	4.0107	1.185	0.001
	Ef_Inf_Cat	1.5871	0.258	0.000
	Int_VV_Cat	-6.1105	-4.709	0.000
	Int_bs_Cat	-24.7661	3.037	0.000
	Konstanta	29.7321	3.919	0.000
OKO BIJELE	Padavine_Cat	1.1544	0.125	0.000
	Pot_Et_Cat	0.4949	0.118	0.000
	Ef_Inf_Cat	1.4595	0.123	0.000
	Konstanta	-1.2461	0.134	0.000
RIJEKA CRNOJEVIĆA	Padavine_Cat	1.981	0.166	0.000
	Pot_Et_Cat	2.0601	0.214	0.000
	Ef_Inf_Cat	1.8224	0.173	0.000
	Konstanta	-1.909	0.166	0.000
VRELO BOSNE	Sneg_Cat	1.3676	0.213	0.000
	Padavine_Cat	0.5054	0.157	0.001
	Stv_Et_Cat	0.4059	0.162	0.012
	Ef_Inf_Cat	1.5957	0.169	0.000
	Konstanta	-2.3973	0.213	0.000

Na osnovu koeficijenata sračunatih binarnom višestrukom logističkom regresijom (tab. 8.4), moguće je formirati regresionu jednačinu za svaki karstni sistem. Tako, višestruka LR jednačina za **karstni sistem vrela Perućac** ima sledeći oblik (8.8):

$$\text{Logit}(p) = 0.1194 + 0.242 \times \text{Padavine}_{\text{cat}} + 0.9614 \times \text{Pot}_{\text{Et}_{\text{cat}}} - 1.5711 \times \text{Stv}_{\text{Et}_{\text{cat}}} + 0.7434 \times \text{Ef}_{\text{Inf}_{\text{cat}}} \quad (8.8)$$

Primenom jednačine (8.8) može se izračunati šansa da isticanje podzemnih voda vrela Perućac bude ispod srednje višegodišnje vrednosti, ukoliko je vrednost kišnih padavina i efektivne infiltracije ispod višegodišnjeg proseka, a vrednosti potencijalne i stvarne evapotranspiracije iznad njega (sve varijable pripadaju kategoričkoj klasi 1) (8.9):

$$\text{Logit}(p) = 0.1194 + 0.242 \times 1 + 0.9614 \times 1 - 1.5711 \times 1 + 0.7434 \times 1 \quad (8.9a)$$

$$\text{Logit}(p) = 0.375 \quad (8.9b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.6214, odnosno postoji šansa od **62,14%** da će vrelo Perućac imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a stvarna i potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka, što predstavlja i šansu za povećanim kvantitativnim pritiskom na karstne podzemne vode ovog sistema.

Višestruki LR model vrela Perućac pokazuje 1.27 puta (tj. $e^{0.242}$) veću šansu da će biti smanjena izdašnost vrela kada su kišne padavine ispod višegodišnjeg proseka, dok ukoliko je efektivna infiltracija ispod godišnjeg proseka, 2.1 puta (tj. $e^{0.7434}$) su veće šanse da će biti registrovana izdašnost na vrelu Perućac ispod višegodišnjeg proseka. U slučaju da je potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka, postoji 2.61 (tj. $e^{0.9614}$) puta veća šansa da će vrelo Perućac imati izdašnost manju od višegodišnjeg proseka, dok u slučaju vrednosti stvarne evapotranspiracije iznad višegodišnjeg proseka, šanse za isti ishod su 0.207 (tj. $e^{-1.5711}$) veće, što u principu pokazuje da ova varijabla gotovo i da ne utiče na model, ali pri njenom izostavljanju iz modela, kišne padavine gube statističku značajnost.

Višestruka LR jednačina za **karstni sistem vrela Seljašnice** je data relacijom (8.10):

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -0.2293 + 0.3296 \times \text{Padavine}_{\text{Cat}} + 0.8255 \times \text{Pot}_{\text{Et}_{\text{Cat}}} \\ & + 0.7571 \times \text{Ef_Inf_Cat} \end{aligned} \quad (8.10)$$

Primenom jednačine (8.10) može se izračunati verovatnoća da isticanje podzemnih voda vrela Seljašnice bude ispod srednje višegodišnje vrednosti, ukoliko je vrednost kišnih padavina i efektivne infiltracije ispod višegodišnjeg proseka, a vrednosti potencijalne evapotranspiracije iznad njega (8.11):

$$\text{Logit}(p) = -0.2293 + 0.3296 \times 1 + 0.8255 \times 1 + 0.7571 \times 1 \quad (8.11a)$$

$$\text{Logit}(p) = 1.683 \quad (8.11b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.8434, odnosno postoji šansa od **84,34%** da će vrelo Seljašnice imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka. To je ujedno i verovatnoća pojave kvantitativnog pritiska na ovaj karstni sistem.

Višestruki LR model vrela Seljašnice pokazuje 1.39 puta (tj. $e^{0.3296}$) veću šansu da će biti smanjena izdašnost vrela kada su kišne padavine ispod višegodišnjeg proseka, dok ukoliko je efektivna infiltracija ispod godišnjeg proseka, 2.13 puta (tj. $e^{0.7571}$) su veće šanse da će biti registrovana izdašnost na vrelu Seljašnice ispod višegodišnjeg proseka. U slučaju da je potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka, postoji 2.28 (tj. $e^{0.8255}$) puta veća šansa da će vrelo Seljašnice imati izdašnost manju od višegodišnjeg proseka.

Za **karstni sistem vrela Mokra** formirana je višestruka LR jednačina (8.12), na osnovu LR modela koji uključuje kišne padavine, potencijalnu i stvarnu evapotranspiraciju i efektivnu infiltraciju kao značajne prediktore:

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -0.4485 + 0.2854 \times \text{Padavine}_{\text{Cat}} + 1.1278 \times \text{Pot}_{\text{Et}_{\text{Cat}}} \\ & - 1.3395 \times \text{Stv}_{\text{Et}_{\text{Cat}}} + 1.1432 \times \text{Ef_Inf_Cat} \end{aligned} \quad (8.12)$$

Ukoliko se razmatra slučaj kada svi prediktori pripadaju dihotomnoj kategoriji 1, tj. kada su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod višegodišnjeg proseka, a potencijalna i stvarna evapotranspiracija iznad, može se proračunati verovatnoća pojave izdašnosti vrela Mokra ispod višegodišnjeg proseka primenom jednačine (8.13):

$$\text{Logit}(p) = -0.4485 + 0.2854 \times 1 + 1.1278 \times 1 - 1.3395 \times 1 + 1.1432 \times 1 \quad (8.13a)$$

$$\text{Logit}(p) = 0.7684 \quad (8.13b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.6833, odnosno postoji šansa od **68,33%** da će vrelo Mokra imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka (tj. povećani kvantitativni pritisak), ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a stvarna i potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka.

Ukoliko se razmatra šansa za pojavom izdašnosti vrela Mokra ispod višegodišnjeg proseka na osnovu svake varijable zasebno, višestruki LR model pokazuje 1.33 puta (tj. $e^{0.2854}$) veću šansu da će biti smanjena izdašnost vrela kada su kišne padavine ispod višegodišnjeg proseka, dok ukoliko je efektivna infiltracija ispod godišnjeg proseka, 3.13 puta (tj. $e^{1.1432}$) su veće šanse da će biti registrovana izdašnost na vrelu Mokra ispod višegodišnjeg proseka. U slučaju da je potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka, postoji 3.08 (tj. $e^{1.1278}$) puta veća šansa da će vrelo Mokre imati izdašnost manju od višegodišnjeg proseka, dok za vrednosti stvarne evapotranspiracije iznad višegodišnjeg proseka postoji 0.26 ($e^{-1.3395}$) puta veća šansa za pojavom isticanja podzemnih voda na vrelu Mokra ispod višegodišnjeg proseka. Međutim, s obzirom na vrlo mali uticaj stvarne evapotranspiracije, može se zaključiti da ova varijabla ima najmanji uticaj na konačan ishod.

Višestruki LR model **karstnog sistema vrela Oko Bijele** prikazan jednačinom (8.14) pokazuje da su kišne padavine, potencijalna evapotranspiracija i efektivna infiltracija značajni prediktori za konačan ishod:

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -1.2461 + 1.1544 \times \text{Padavine}_{\text{Cat}} + 0.4949 \times \text{Pot}_{\text{Et}_{\text{Cat}}} \\ & + 1.4595 \times \text{Ef_Inf_Cat} \end{aligned} \quad (8.14)$$

U slučaju kada su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod višegodišnjeg proseka, a potencijalna evapotranspiracija iznad, može se proračunati verovatnoća pojave izdašnosti vrela Oko Bijele ispod višegodišnjeg proseka primenom jednačine (8.15):

$$\text{Logit}(p) = -1.2461 + 1.1544 \times 1 + 0.4949 \times 1 + 1.4595 \times 1 \quad (8.15a)$$

$$\text{Logit}(p) = 1.8627 \quad (8.15b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.8657, odnosno postoji šansa od **86,57%** da će vrelo Oko Bijele imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka. Takođe, ovaj procenat odnosi se na šansu za povećani kvantitativni pritisak ukoliko se obistini pozitivan ishod.

Posmatrajući svaku nezavisnu varijablu posebno, može se zaključiti da višestruki LR model vrela Oko Bijele pokazuje 3.17 (tj. $e^{1.1544}$) puta veću šansu za pojavom isticanja podzemnih voda na vrelu Oko Bijele, ukoliko se kišne padavine javljaju ispod višegodišnjeg proseka, dok je verovatnoća za istim ishodom veća ukoliko efektivna infiltracija bude ispod višegodišnjeg proseka – 4.26 puta (tj. $e^{1.4596}$). Najmanju šansu da isticanje vrela Oko Bijele padne ispod višegodišnjeg proseka dobija se ukoliko je potencijalna evapotranspiracija iznad proseka – 1.63 puta, odnosno $e^{0.4949}$.

Varijable koje su značajne za pozitivan ishod pri višestrukoj LR analizi **karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića** su kišne padavine, potencijalna evapotranspiracija i efektivna infiltracija. LR jednačina za ovo vrelo je data relacijom (8.16):

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -1.909 + 1.981 \times \text{Padavine}_{\text{cat}} + 2.0601 \times \text{Pot}_{\text{Et}_{\text{cat}}} \\ & + 1.8224 \times \text{Ef_Inf_Cat} \end{aligned} \quad (8.16)$$

Pozitivan ishod višestrukog LR modela, tj. slučaj kada je isticanje na vrelu Rijeke Crnojevića ispod višegodišnjeg proseka, može se očekivati kada značajni prediktori pripadaju dihotomnoj kategoriji 1, tj. kada su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka, što je predstavljeno jednačinama (8.17):

$$\text{Logit}(p) = -1.909 + 1.981 \times 1 + 2.0601 \times 1 + 1.8224 \times 1 \quad (8.17a)$$

$$\text{Logit}(p) = 3.954 \quad (8.17b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.9812, odnosno postoji šansa od **98,12%** da će vrelo Rijeke Crnojevića imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su kišne padavine i efektivna infiltracija ispod, a potencijalna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka. Ovaj procenat se takođe odnosi i na šansu za povećanje kvantitativnog pritiska ovog sistema.

Ukoliko se posmatra šansa za pozitivnim ishodom za vrelo Rijeke Crnojevića na osnovu svakog prediktora zasebno, može se zaključiti da su šanse 7.24 (tj. $e^{1.981}$) puta veće ukoliko su padavine ispod višegodišnjeg proseka. Takođe, ukoliko je efektivna infiltracija ispod višegodišnjeg proseka, šanse za pozitivnim ishodom su 6.18 (tj. $e^{1.8224}$) puta veće, dok u slučaju vrednosti potencijalne evapotranspiracije iznad višegodišnjeg proseka, verovatnoća pojave isticanja podzemnih voda na vrelo Rijeke Crnojevića je 7.84 (tj. $e^{2.0601}$) puta veća.

Višestruka LR analiza izvedena za **karstni sistem vrele Bosne** je pokazala da su značajne varijable za ovo vrelo sneg, kišne padavine, stvarna evapotranspiracija i efektivna infiltracija, što se može videti iz LR jednačine (8.18):

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -2.3973 + 1.3676 \times \text{Sneg}_{\text{cat}} + 0.5054 \times \text{Padavine}_{\text{cat}} + \\ & 0.4056 \times \text{Stv}_{\text{Et}_{\text{cat}}} + 1.5957 \times \text{Ef_Inf_Cat} \end{aligned} \quad (8.18)$$

Verovatnoća da se isticanje podzemnih voda na vrelo Bosne javi ispod višegodišnjeg proseka može se proračunati na osnovu jednačine LR modela (8.18), zamenom zavisnih prediktorima njihovim pozitivnim dihotomnim oblikom, tj. kada su sneg, kiša i efektivna infiltracija ispod, a stvarna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka (8.19):

$$\text{Logit}(p) = -2.3973 + 1.3676 \times 1 + 0.5054 \times 1 + 0.4056 \times 1 + 1.5957 \times 1 \quad (8.19a)$$

$$\text{Logit}(p) = 1.477 \quad (8.19b)$$

Transformacijom $\text{logit}(p)$ funkcije preko izraza (8.7) dobija se verovatnoća pozitivnog ishoda od 0.8143, odnosno postoji šansa od **81,43%** da će vrelo Bosne imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka, ukoliko su sneg, kiša i efektivna infiltracija ispod, a stvarna evapotranspiracija iznad višegodišnjeg proseka. Procenatni iznos od 81.43% odnosi se i na šansu za povećanim kvantitativnim pritiskom na podzemne vode ovog karstnog sistema.

Proračun verovatnoće pojave isticanja na vrelo Bosne ispod višegodišnjeg proseka na osnovu svake zasebne varijable pokazuje da ukoliko se sneg smanji ispod višegodišnjeg proseka, 3.925 puta (tj. $e^{1.3676}$) je veća šansa za pozitivnim ishodom, dok ukoliko je kiša ispod svog višegodišnjeg proseka, šansa sa pozitivnim ishodom je 1,65 puta veća (tj. $e^{0.5054}$). Takođe, ukoliko se efektivna infiltracija smanji na nivo ispod višegodišnjeg proseka, verovatnoća pozitivnog ishoda je 4.93 puta veća (tj. $e^{1.5957}$). Najmanju verovatnoću za pozitivnim ishodom daju vrednosti stvarne evapotranspiracije iznad višegodišnje vrednosti – 1,5 puta (tj. $e^{0.4059}$).

Provera tačnosti višestrukih LR modela odabranih karstnih sistema definisana je preko matrice konfuzije koja je data u tabeli 8.5. Iz navedene tabele se vidi da je višestruki LR model sa najmanjom preciznošću onaj za vrelo Perućac, koji je u 1206 slučajeva (od 1827 podataka) predvideo tačan ishod, dok je u 621 slučaju pogrešno predvideo ishod, što ukazuje na tačnost modela od 66,01%. Među LR modelima najveće preciznosti ističu su modeli kreirani za karstni sistem vrela Mlave, koji ima tačnost predikcije u 93,32% slučajeva, dok je tačnost LR modela za karstni sistem vrela Rijeka Crnojevića 87,58%. Višestruki LR modeli ostalih karstnih sistema imaju red veličine 70-73%, što znači da modeli u skoro $\frac{3}{4}$ slučajeva predviđaju tačnu kategoriju, čime se definiše relativno velika preciznost višestrukih LR modela.

Tabela 8.5. Matrica konfuzije za proveru performansi višestrukih LR modela odabranih karstnih sistema

PERUĆAC	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	90	546	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	75	1116		1206	66,01	621	33,99
SELJAŠNICA	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	57	444	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	47	1279		1336	73,13	491	26,87
MOKRA	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	266	340	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	179	1042		1308	71,59	519	28,41
MLAVA	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	621	97	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	25	1084		1705	93,32	122	6,68
OKO BIJELE	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	217	335	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	165	1110		1327	72,63	500	27,37
RIJEKA CRNOJEVIĆA	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	198	178	1827	Total	%	Total	%
Realno 1	49	1402		1600	87,58	227	12,42
VRELO BOSNE	Predviđeno 0	Predviđeno 1	N	Tačno predviđenih		Netačno predviđenih	
Realno 0	335	135	1096	Total	%	Total	%
Realno 1	192	434		769	70,16	327	29,84

Na osnovu primenjene LR analize na odabranim karstnim sistemima, mogu se dati glavni zaključci i predlozi za dalje analize i istraživanja u ovom domenu hidrogeologije karsta:

- Verovatnoća pojave ispodprosečne vrednosti isticanja podzemnih voda, tj. povećanog kvantitativnog pritiska primenom LR modela na odabranim karstnim terenima oscilira od 62.14% za sistem Perućca do 98,85% za sistem vrela Mlave. Osim za sistem vrela Mokra (68.33%), svi ostali sistemi imaju verovatnoću pojave preko 80%;
- Rezultati LR analize su pokazali logične rezultate, s obzirom na to da je sasvim izvesno očekivati da se smanji izdašnost, odnosno da ona bude ispod srednjegodišnje vrednosti ukoliko su i padavine i efektivna infiltracija ispod, a evapotranspiracija i intercepcija iznad višegodišnjeg proseka;
- Karstni sistem vrela Bosne je jedini od svih primera koji je pri višestrukoj LR analizi pokazao veliki značaj snežnih padavina u ukupnom bilansu podzemnih voda.

- Razmatranje dodatnih elemenata i faktora bilansa podzemnih voda, kao što su npr. temperatura vazduha, brzina vetra, vlažnost vazduha, deficit vlage i dr., tj. uključivanje vremenske serije potencijalne evapotranspiracije sračunate prema drugim empirijskim jednačinama;
- Određivanje verovatnoće pojave isticanja podzemnih voda na nivou Q_{20} ili Q_{30} ukoliko su značajni prediktori ispod ili iznad srednjegodišnje vrednosti;
- Sezonsko određivanje verovatnoće pojave ekstremnih maksimalnih i minimalnih vrednosti isticanja podzemnih voda na nivou Q_1 i Q_{99} na osnovu ekstremnih vrednosti ulaznih prediktora (kiša, sneg, evapotranspiracija, efektivna infiltracija);
- Korišćenje LR modela za određivanje verovatnoće pojave uticaja klimatskih promena na isticanje podzemnih voda, tj. definisanja verovatnoće isticanja podzemnih voda na nivou Q_{20} ili Q_{30} pri npr. smanjenju ulaznih parametara bilansa (padavina, snega) za 20-30%, odnosno povećanja evapotranspiracije (gubitaka) za isti procenat.

9 RAZVOJ UPRAVLJAČKOG MODELA ZA ODRŽIVO KORIŠĆENJE KARSTNIH PODZEMNIH VODA

9.1 Ekonomski i vodoprivredni aspekt održivog korišćenja karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana

Menadžment vodnih resursa obuhvata politički, socio-ekonomski i naučni aspekt, balansirajući između realno procenjenih potreba za vodom i raspoloživih količina. Politički aspekt se, pre svega odnosi na prava i obaveze proistekle iz aktuelnih zakona, pravilnika i propisa iz domena vodne regulative, koji moraju tretirati vodne resurse istovremeno kao socijalnu i ekonomsku kategoriju, uz poštovanje koncepta održivog razvoja i zaštite životne sredine. Ukoliko su zakonski akti usklađeni sa navedenim faktorima, socio-ekonomski aspekt upravljanja vodnim resursima je lakše implementirati, budući da on podrazumeva dostupnost vode, kao esencije ljudskog postojanja, svuda i svima. To znači da cena vode (u smislu lokalnog i regionalnog vodosnabdevanja stanovništva) mora biti društveno prihvatljiva svim slojevima, dok istovremeno naknada za korišćenje vode kao industrijske sirovine (u prehrambenoj industriji ili u vidu direktne zarade od vode preko fabrika za flaširanje) mora biti nesumnjivo veća. Takav pristup navodi i Krešić (2009) ističući prednosti tretiranja vodnih resursa kao ekonomskog i javnog dobra, o kome će se svi korisnici brinuti, čime bi se neutralisala (ili makar kontrolisala i smanjila) tzv. *spirala povećanja potreba za vodom* koja inicira proporcionalno povećanje eksploatacije i crpenja podzemnih voda. Nasuprot ovom pristupu, ukoliko bi se vodni resursi posmatrali samo kao ekonomska kategorija (u smislu izvora zarade), potencijalna degradacija podzemnih voda i životne sredine je neminovna. Tome može doprineti i nekontrolisano izdavanje vodnih dozvola i koncesija za eksploataciju podzemnih voda, ali i prelazak sistema javnog snabdevanja vodom u privatni sektor, što je u nekim državama sveta skoro po pravilu imalo instantne negativne efekte po stanovništvo, pre svega u smislu višestrukog povećanja cene vode.

Osnovni princip menadžmenta podzemnim vodnim resursima jeste njihovo iskorišćavanje za potrebe snabdevanja stanovništva pijaćom vodom, za šta je neophodno proračunati realne potrebe za vodom. Podzemne vode predstavljaju vitalan resurs koji većinski učestvuje u vodosnabdevanju stanovništva Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine. Procena je da se na godišnjem nivou u Republici Srbiji eksploatiše oko $580 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$, od čega se oko $145 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$ crpi preko kaptiranih vrela i izvora (Stevanović & Dokmanović, 2015).

Broj priključaka na vodovodnu mrežu u Republici Srbiji trenutno iznosi nešto više od 80%, kada se razmatraju i korisnici u gradskim i u seoskim naseljima, dok je projekcija broja i procenta priključaka data u tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Projekcija broja stanovnika i broja priključaka na vodovodnu mrežu u Srbiji (bez KiM) do 2024. i 2034. godine (MPZŽS, 2015)

	Broj stanovnika (x 10 ⁶)			Procenat priključenosti			Broj korisnika (x 10 ⁶)		
	2012	2024	2034	2012	2024	2034	2012	2024	2034
Srbija	7.234	6.915	6.859	81	88	93	5.835	6.100	6.380

Kada je reč o specifičnoj potrošnji vode u Republici Srbiji, aktuelna *Strategija upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije* (MPZŽS, 2015) navodi podatak da je trenutna specifična potrošnja u Srbiji oko 320 l/st/dan. Takođe, autori Strategije navode heterogenost potrošnje po regionima, pa tako Vojvodina ima najmanju prosečnu potrošnju od 230 l/st/dan, prostor centralne Srbije ima specifičnu potrošnju od oko 320 l/st/dan, što je navedeni republički prosek, dok najveću specifičnu potrošnju ima područje grada Beograd od oko 400 l/st/dan. U

tabeli 9.2 dat je prikaz projekcije potreba za vodom u Republici Srbiji za dva projektovana perioda – 2024. i 2034. godina. Podaci u tabeli 9.2 prikazani su za dva vremenska preseka i dve varijante – potrebe bez rezervi i potrebe sa rezervama podzemnih voda uz veći koeficijent sigurnosti snabdevanja vodom za piće. Eksploatacija karstnih podzemnih voda je na nivou od oko 4,2 m³/s i koristi se kao jedini ili dopunski vid vodosnabdevanja u jugozapadnoj, zapadnoj, istočnoj i jugoistočnoj Srbiji (Dimkić et al. 2011).

Tabela 9.2. Projekcija potreba za vodom u Republici Srbiji (bez KiM) do 2024. i 2034. god. (MPZŽS, 2015)

		Vodosnabdevanje		Industrija	Navodnjavanje
		Bez rezerve	Sa rezervom		
2024	(x10 ⁶) m ³ /god	763,95	840,35	146,60	Nema podataka
	m ³ /s	24,22	26,65	4,64	
2034	(x10 ⁶) m ³ /god	826,89	950,96	288,40	1247,2
	m ³ /s	26,22	30,15	9,14	39,55

Vodosnabdevanje stanovništva Crne Gore u najvećem broju slučajeva obezbeđuje se preko kaptiranih karstnih vrela i izvora i bunara u kvartarnim sedimentima. Procena je da godišnja eksploatacija podzemnih voda na prostoru Crne Gore iznosi 105 x 10⁶ m³/god (Zelenakova et al. 2020). Najveći deo podzemnih voda koristi se za javno vodosnabdevanje za stanovništvo i turizam (63% ukupno eksploatisanih voda), dok se za potrebe industrije koristi 18,2%, a za poljoprivredu (navodnjavanje) 18,5% voda koje se godišnje eksploatišu na prostoru Crne Gore (ARBPM, 2019; DRBMP, 2019). Udeo podzemnih voda u vodosnabdevanju stanovništva Crne Gore iznosi preko 90%, tako da se od ukupno eksploatisanih podzemnih voda na teritoriji Crne Gore, karstnim podzemnim vodama snabdeva 77% stanovništva, podzemnim vodama iz intergranularne izdani 15%, dok se 8% stanovništva Crne Gore snabdeva iz površinskih akumulacija (Radulović M. et al. 2016).

Ukoliko se posmatra broj priključaka na vodovodnu mrežu u gradskim, prigradskim i seoskim područjima, može se zaključiti da postoji značajna disproporcija među tipovima naselja, budući da je 98,7% gradskog stanovništva Crne Gore priključeno na vodovodnu mrežu, dok je takva situacija kod 79% seoskog stanovništva. Prema autorima *Strategije upravljanja vodama Crne Gore do 2025. i 2035. godine* (MPRR, 2017), plan je da se ovaj procenat znatno poveća (tab 9.3):

Tabela 9.3. Projekcija broja stanovnika i broja priključaka na vodovodnu mrežu u Crnoj Gori do 2025. i 2035. godine (MPRR, 2017)

	Broj stanovnika			Procenat priključenosti			Broj korisnika		
	2015	2025	2035	2015	2025	2035	2015	2025	2035
Crna Gora	621810	629156	639115	79	91	96	491230	572532	613550

Kada je reč o projektovanim potrebama stanovništva za vodom, mora se uzeti u razmatranje nekoliko faktora – trenutni i projektovani broj stanovnika, kategorije potrošača, faktor civilizacije, specifična potrošnja stanovništva. Prema aktuelnoj *Strategiji upravljanja vodama Crne Gore* (MPRR, 2017), specifična potrošnja vode za stanovništvo biće na nivou evropskog proseka od 180 l/st/dan, budući da je Evropska unija u svojim aktuelnim dokumentima minimizirala specifičnu potrošnju stanovništva računajući na realne potrebe u vodi, recirkulaciju vodnih resursa i njihovu ponovnu upotrebu za industrijske potrebe. Prema podacima iz 2011. godine, specifična potrošnja je bila na nivou od 198 l/st/dan (Radulović M. et al. 2016). Sa druge strane, specifična potrošnja specifičnih kategorija je projektovana na značajno većem nivou (350-650 l/st/dan), što je i očekivano, imajući u vidu turističke objekte, koji su posebno značajni za primorsku oblast Crne Gore. Projekcija potrebnih količina voda za

javno vodosnabdevanje, turizam, industriju i navodnjavanje do 2025. i 2035. godine data je u tabeli 9.4. Projekcije za javno vodosnabdevanje date su u vidu potrebe bez rezervi i potrebe sa rezervama podzemnih voda uz veći koeficijent sigurnosti snabdevanja vodom za piće. Potrebe za industriju su ocenjene na nivou iz nekadašnje *Vodoprivredne osnove Crne Gore* iz 2001. godine, budući da se prema autorima Strategije (MPRR, 2017) nisu desile nikakve promene u oblasti razvoja industrije u međuvremenu. Na kraju, potrebe u navodnjavanju su obuhvatile celokupno zemljište pogodno za navodnjavanje koje je procenjeno na 74 090 ha, od kojih se planira navodnjavati 59 425 ha do 2025. god. (tj. 80%), dok se preostalih 14 665 ha planira uključiti u sistem navodnjavanja do kraja 2035. god. (MPRR, 2017).

Tabela 9.4. Projekcija potreba za vodom u Crnoj Gori do 2025. i 2035. god. (MPRR, 2017)

		Vodosnabdevanje		Turizam	Industrija	Navodnjavanje
		Bez rezerve	Sa rezervom			
2025	($\times 10^6$) m ³ /god	37,77	41,55	18	70,6	250
	m ³ /s	1,2	1,32	0,57	2,24	7,93
2035	($\times 10^6$) m ³ /god	40,63	44,69	20	98,9	320
	m ³ /s	1,29	1,42	0,63	3,14	10,15

Vodosnabdevanje stanovništva u Federaciji Bosne i Hercegovini i u Republici Srpskoj najvećim delom takođe zavisi od podzemnih vodnih resursa, koje imaju udeo od 89% u ukupnom vodosnabdevanju. Tabela 9.5 prikazuje procentualnu zastupljenost tipova izdani u ukupnom vodosnabdevanju stanovništva, industrije i poljoprivrede u Bosni i Hercegovini:

Tabela 9.5. Procentualna zastupljenost tipova izdani u vodosnabdevanju stanovništva Republike Srpske (ZZVS & ZZVM, 2012; ZZVB, 2012)

	Federacija BiH	Republika Srpska
Karstna izdan	37%	31%
Pukotinsko-karstna izdan	15%	
Intergranularna izdan	33%	56%
Površinske vode	12%	23%
Površinske akumulacije	3%	

Posmatrajući procentualnu zastupljenost stanovništva koje je priključeno na javnu vodovodnu mrežu, zapaža se velika disproporcija između urbanih i ruralnih naselja. Naime, na prostoru Federacije BiH 94% gradskog stanovništva je priključeno na javni vodovod, dok je u ruralnim naseljima svega 20% stanovništva na javnoj vodovodnoj mreži. Gledajući prema broju stanovnika, od 2,3 miliona stanovnika Federacije BiH, oko 1,4 miliona se snabdeva vodom sa javne vodovodne mreže, što iznosi oko 60% ukupnog stanovništva Federacije BiH (ZZVS & ZZVM, 2012). Skoro identična situacija je i u Republici Srpskoj, budući da se od ukupnog broja stanovnika RS 48% snabdeva iz gradskih vodovoda, 12% iz seoskih vodovoda, dok se 40% stanovnika snabdeva iz individualnih izvora snabdevanja, tako da se ukupno gledano 60% stanovništva Republike Srpske snabdeva iz javne vodovodne mreže (ZZVB, 2012). Prema podacima *Plana upravljanja vodnim resursima u slivu Save Bosne i Hercegovine* (PUVR sliva Save BiH, 2015), aktuelne godišnje količine zahvaćenih voda iznose 286×10^6 m³/god u Savskom slivu Federacije BiH, odnosno 270×10^6 m³/god u Savskom slivu Republike Srpske (tabela 9.6). Ukoliko se ove veličine uporede sa brojem stanovnika koji koriste navedene zapremine vode,

može se zaključiti da je bruto specifična potrošnja reda veličine 500 l/st/dan, što znači da ona uključuje potrošnju domaćinstava, škole, fakultete, kasarne i sve druge potrošače. Ukoliko bi se posmatrala samo potrošnja u domaćinstvima, specifična potrošnja vode se procenjuje na oko 120 l/st/dan, što svrstava oba entiteta Bosne i Hercegovine u evropski prosek potrošnje.

Tabela 9.6. Količine zahvaćenih voda za različite potrebe (u milionima m³/god) u Savskom slivu Bosne i Hercegovine (PUVR sliva Save BiH, 2015)

Kategorija	Federacije BiH	Republika Srpska	Brčko Distrikt	Savski sliv Bosne i Hercegovine
Javno vodosnabdevanje	182	97	2.8	282
Isporučena količina vode	62	57	1.8	121
Domaćinstvo	50	41	1.6	93
Gubici	120	40	1	161
	66%	41%	35%	57%
Industrija individualno vodosnabdevanje	80	104	/	184
Poljoprivreda	24	69	/	93
Suma	286	270	2.8	556

Iz tabele 9.6 se vidi da najveći deo zahvaćenih količina voda u Savskom slivu Bosne i Hercegovine potroši na javno vodosnabdevanje, dok se manje količine koriste za potrebe industrije i navodnjavanje. Takođe, treba napomenuti da industrija u Federaciji BiH troši oko 76×10^6 m³/god vode iz sopstvenih izvora vodosnabdevanja, dok ta zapremina u Republici Srpskoj iznosi 150×10^6 m³/god sa dodatnih 18×10^6 m³/god koje uzima iz javnog vodovoda. Veoma mala površina obradivog zemljišta (ispod 1% ukupnog obradivog zemljišta) se navodnjava u oba entiteta, te je ona praktično zanemariva, ali se projektuje povećanje potreba i za ovom delatnošću u budućnosti.

S obzirom na to da je trenutno u procesu donošenje novog plana upravljanja na nivou cele Bosne i Hercegovine, trenutno su dostupni podaci iz prethodnog Plana sa projekcijama do 2021. godine, odnosno prethodnih Strategija do 2020. godine. Tabela 9.7 prikazuje projekcije potreba za vodi u Savskom slivu Federacije Bosne i Hercegovine i Republike Srpske do 2021. godine.

Tabela 9.7. Projekcija potreba za vodom u 2021. godini za različite kategorije u Savskom slivu Federacije BiH i Republike Srpske (prema PUVR sliva Save u FBiH i RS, 2015)

Kategorija	Federacija BiH		Republika Srpska	
	(x10 ⁶) m ³ /god	m ³ /s	(x10 ⁶) m ³ /god	m ³ /s
Javno vodosnabdevanje	187	5.93	101	3.2
Industrija	100	3.17	134	4.25
Poljoprivreda	33	1.05	83	2.63
Ukupno	320	10.15	318	10.08

S obzirom na to da su karstne podzemne vode dominantan resurs u vodosnabdevanju stanovništva istočne i zapadne Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine, neophodno je posvetiti im posebnu pažnju kako bi se projektovane potrebe zadovoljile. Da bi se ovakav resurs privedo nameni, neophodno je pravilno dimenzionisati koncepciju i metodologiju detaljnih hidrogeoloških istraživanja, koja bi obuhvatala kontinuirano praćenje fizičkih, hemijskih i bakterioloških karakteristika karstnih vrela i njihove izdašnosti, čime bi se dobili konkretni podaci o kvalitetu i kvantitetu vode u vidu pojavljivanja minimalnih i maksimalnih količina istekle vode. Zatim neophodno bi bilo postaviti gušću mrežu meteoroloških stanica, koje bi na različitim lokacijama i nadmorskim visinama kontinuirano pratile količinu padavina i temperature vazduha, kao najbitnije klimatske parametre. Dalje, neophodna bi bila geofizička istraživanja u cilju definisanja stepena i baze karstifikacije, ali i izvođenje dodatnih opita trasiranja podzemnih voda. Pored toga, bilo bi obavezno izvođenje istražnog bušenja radi definisanja debljine karbonatnog kompleksa, gde bi se preko bušotina i testova crpenja definisao optimalni režim podzemnih voda. Nakon izvođenja predloženih istraživanja, usledila bi verifikacija rezervi i njihova kategorizacija (B kategorija), kao i obavezan monitoring u periodu eksploatacije.

Iz prethodnih tabela, jasno se može videti da je u svim razmatranim zemljama projektovano povećanje potreba za vodom u narednih 10 godina, što će neminovno povući za sobom potrebe za povećanjem eksploatacije podzemnih voda na postojećim izvorištima. Stoga, posebno treba uzeti u razmatranje eksploataciju karstnih podzemnih voda za vodosnabdevanje stanovništva, budući da karstni tereni Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine akumuliraju značajne rezerve ovog resursa.

Kada je reč o kaptiranju podzemnih karstnih voda, Stevanović (2015c) navodi nekoliko načina zahvatanja podzemnih voda u karstu:

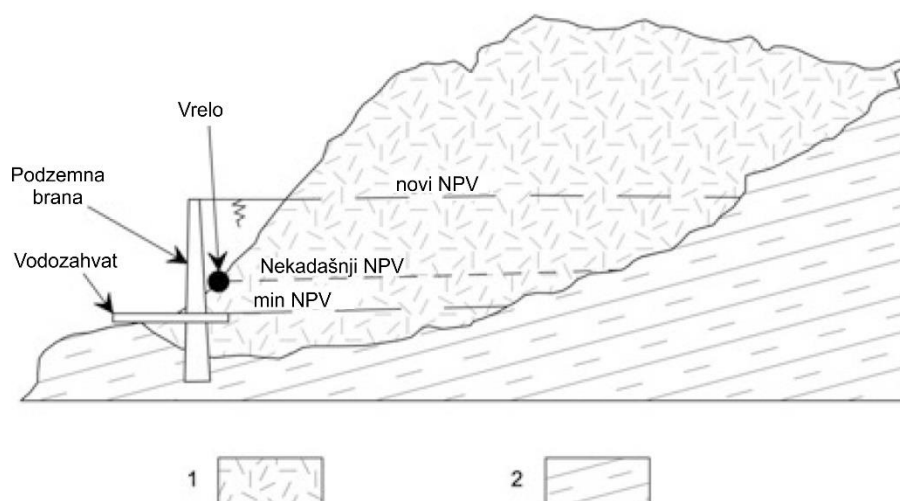
- Zahvatanje podzemnih karstnih voda na mestu isticanja (karstnom vrelu);
- Zahvatanje karstnog podzemnog toka u okviru sliva veštačkim objektima – branama, bunarima i sl.

Prednosti eksploatacije karstnih podzemnih voda ogledaju se pre svega u izuzetnom prirodnom kvalitetu ovih voda, tako da je pre distribucije ovih voda ka potrošačima, najčešće dovoljno samo osnovna dezinfekcija u vidu hlorisanja, što je čest slučaj na izvorištima koja već kaptiraju karstne vode. Ipak, najčešći problem koji se javlja u karstu sa aspekta kvaliteta odnosi se na povišenu mutnoću u periodima visokih voda, koja obično vodi poreklo od suspendovanog nanosa koji se aktivira nailaskom velike količine vode. Takođe, povišen sadržaj bakterija može biti posledica antropogenog zagađenja u zoni prihranjivanja, budući da je prirodna ranjivost karstnih sistema visoka i da zagađivač brzo i lako prodire do nivoa podzemnih voda u karstu.

Prednost je i količina vode kojom obično karstni sistemi centralnog Balkana raspolažu, tako da su ukupne eksploatacione količine voda na godišnjem nivou u karstu najčešće višestruko veće nego što su realne potrebe za vodom lokalnog stanovništva. Posmatrajući primere vrela Perućac, Seljašnice, Mokra, Mlava u Srbiji, Oko Bijele i Rijeke Crnojevića u Crnoj Gori, odnosno vrela Bosne u Bosni i Hercegovini, jasno se može videti da ovi sistemi akumuliraju značajnu količinu vode koja se može adekvatno iskoristiti. Ipak, rezerve ovih, ali i skoro svih ostalih karstnih sistema centralnog Balkana nisu jednake tokom hidrološke godine, već obično značajno osciliraju, s obzirom na to da karst ima izrazito nelinearan karakter i da se radi o vrlo dinamičnom sistemu. Tako, najveća količina vode koja je prirodno dostupna za zahvatanje javlja se tokom prolećnih i jesenjih meseci, dok su najmanje količine (minimumi izdašnosti) tokom leta, kada je i potreba najveća. Stoga, pored izgradnje kaptaznog objekta neophodno je

predvideti i regulacione mere karstne izdani koje će zadržati višak vode u periodima velikih voda, a koje se mogu iskoristiti za vodosnabdevanje u kritičnim, letnjim mesecima.

Gravitaciona vrela (Peručac, Seljašnica, Mokra, Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića) mogu biti reporni primeri kako izdašnost ovakvih sistema oscilira tokom hidrološke godine i koje regulacione mere treba primeniti. Naime, ekstremni maksimumi gravitacionih vrela najčešće se dešavaju tokom perioda mart-maj, kada dolazi do obilnih kiša i otapanja snega, a vegetacioni period je u začetku tako da se manja količina vode potroši na evapotranspiraciju, intercepciju i zasićenje zemljišne vlage, a veći deo na efektivnu infiltraciju. Sličan scenario prisutan je i tokom kasnih jesenjih meseci. U pomenutim periodima, reakcije vrela na kiše i otopljeni sneg su brze, s obzirom na to da se voda brzo infiltrira u podzemlje, tj. da se sistem brzo napuni. Sa druge strane, periodi letnjih meseci (jun-septembar) kod gravitacionih vrela su periodi kada sistemi ulaze u recesiju, odnosno kada efektivna infiltracija praktično izostaje, a kada na vrelu ističe samo bazni oticaj u vidu podzemnih voda koje su akumulirane u prethodnom periodu. Upravo taj period minimalnih izdašnosti treba premostiti budući da je potražnja za vodom tada najveća. Regulacione mere koje mogu amortizovati prolećne i jesenje maksimume i sprečiti prirodno isticanje ovih voda, tako da se one mogu deponovati i sačuvati za periode minimalnih izdašnosti najčešće podrazumevaju izgradnju podzemnih akumulacija (Sl. 9.1).



Sl. 9.1. Tipična konstrukcija podzemne brane. Legenda: 1 – karbonatni sedimenti; 2 – Vodonepropusni sedimenti; NPV – nivo podzemnih voda (Stevanović, 2015d)

Regulacione mere su posebno neophodne kod gravitacionih vrela sa jako visokim koeficijentima hidrodinamičke neravnomernosti, kao što je slučaj npr. kod vrela Oko Bijeje i Rijeke Crnojevića. Imajući u vidu da kod ovih vrela maksimumi mogu dostizati $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Oko Bijeje), odnosno preko $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rijeka Crnojevića), a da minimumi padnu na red veličine $10\text{-}50 \text{ l/s}$, jasno se uviđa potreba za izgradnjom akumulacije koja će amortizovati i sačuvati višak vode da bi se ona ravnomerno mogla koristiti tokom cele godine.

Kod uzlaznih vrela, kao što je slučaj sa vrelom Mlave i vrelom Bosne, situacija je povoljnija imajući u vidu da usled duboke sifonalne cirkulacije, režim ovih sistema je donekle ujednačen, tako da je odnos maksimuma i minimuma manji. Stoga, regulacione mere koje bi se nakon dodatnih istraživanja i analiza primarno, mogle implementirati obuhvataju najpre postavljanje pumpe u sifonski kanal, kojom bi se jednostavno pumpala veća količina vode od one koja prirodno istekne na vrelu, budući da voda ostaje u zaleđu vrela jer usled slabijeg hidrostatičkog pritiska ne može da savlada kolenasti kanal i uspon ka vrelu. Stoga, opravdano je vršiti crpenje pumpanjem voda iz sifonskog kanala u tim uslovima.

Osim regulacije karstne izdani na mestu isticanja, određene mere se mogu implemetirati i u slivnom području, kako bi se amortizovao vrlo dinamičan režim karstnih podzemnih voda. Ove mere obuhvataju regulisanje količine vode koja ponire u ponorskim zonama, zatim izgradnja vodonepropusnih zavesa kojima se podzemne vode usmeravaju u željenom pravcu, odnosno preusmeravanje površinskih tokova u iz jednog sliva u drugi i regulacija korita površinskih tokova, kako bi se smanjili gubici. Za sve ove intervencije neophodna su dodatna detaljna istraživanja i fizibiliti studije, kao i studije ocene uticaja na životnu sredinu.

Pored brojnih prednosti i pozitivnih aspekata eksploatacije podzemnih voda iz karsta, postoje određeni faktori koji mogu negativno uticati kako na veličinu eksploatacije, tako i na sâm sistem vodosnabdevanja. Ovi faktori se mogu podeliti u dve grupe: direktni i indirektni. U direktne faktore se ubrajaju geološke i hidrogeološke karakteristike terena, uslovi prihranjivanja i dreniranja karstne izdani, topografija terena i dr. Drugim rečima, to su faktori koji imaju direktan uticaj na količinu vode koja se može zahvatiti. Sa druge strane, indirektni faktori bi podrazumevali one faktore koji posredno utiču na veličinu eksploatacije. U njih spadaju klimatske promene, antropogena aktivnost, problemi u isporuci vode krajnjim potrošačima, neadekvatne procene realnih potreba za vodom, neadekvatna distributivna mreža sa aspekta velikih gubitaka vode iz sistema i dr.

9.2 Bilans i potencijal karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana

Karstne podzemne vode su, osim za vodosnabdevanje pijaćom vodom stanovništva, značajne i za industrijske i irigacione potrebe na ovom području. Velika prostorna distribucija karstnih sedimenata na prostoru dela centralnog Balkana omogućila je i akumulaciju veoma velikih količina karstnih podzemnih voda koje se svakodnevno koriste na ovom prostoru za različite potrebe. Na sl. 9.2 prikazan je dijagram sa koreliranim podacima o ukupnoj površini (u procentima) otvorenih karstnih terena u odnosu na površinu države i procentualnom zastupljenosti karstnih podzemnih voda u ukupnom vodosnabdevanju stanovništva. Korelacija je izvršena za određen broj zemalja u Evropi, a koeficijent korelacije od $R=0.7$ pokazuje dobru vezu među ovim podacima. Stevanović (2019) procenjuje da oko 678 miliona stanovnika planete koristi karstne podzemne vode za piće, što je oko 9,2% ukupne svetske populacije. Među njima je i stanovništvo Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine, koje su posebno istaknute na sl. 9.2.

Sa sl. 9.2 se uočava da Srbija ima najmanji procenat karstnih sedimenata u odnosu na površinu državne teritorije, dok Crna Gora ima najveću površinu teritorije pod otvorenim karstnim terenima u odnosu na površinu države. Takođe, Crna Gora je i najveći konzument karstnih podzemnih voda, što je i logično imajući u vidu veliki prostor pod karstom.

Grubi bilans karstnih podzemnih voda na godišnjem nivou za prostor Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine moguće je kreirati poznajući vrednosti otvorenih karstnih terena, godišnju sumu padavina, kao i prosečnu godišnju vrednost efektivne infiltracije. Tako, koristeći obrazac (9.1) Stevanovića (2019), mogu se proceniti potencijalne količine dinamičkih rezervi karstnih izdani pomenutih teritorija:

$$Q = P \times A \times I_{ef} \quad (9.1)$$

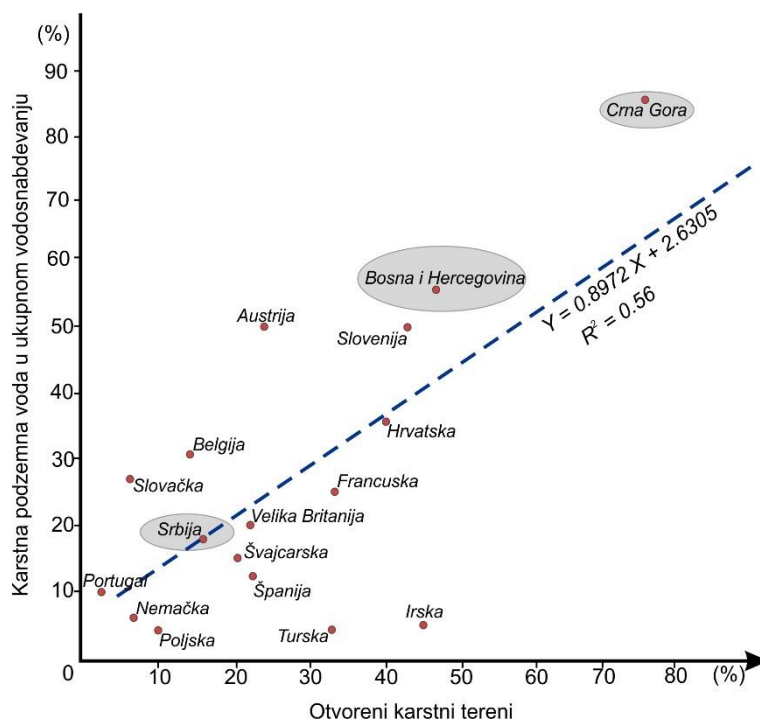
gde su:

Q – potencijalne dinamičke rezerve karstnih podzemnih voda;

P – prosečna godišnja suma padavina;

A – ukupna površina otvorenih karstnih terena;

I_{ef} – prosečna efektivna infiltracija u karstu.



Sl. 9.2. Korelacija procenta zastupljenosti otvorenih karstnih terena prema ukupnoj površini teritorije države i procentualnog učešća karstnih podzemnih voda u ukupnom vodosnabdevanju za odabrane zemlje Evrope (prema podacima COST 1995; Hartmann et al. 2014; Stevanović, 2019; modifikovano)

Proračun bilansa podzemnih voda karstnih izdani Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine prema obrascu (9.1) dat je u tabeli 9.8. Ulazni podaci koji su iskorišćeni za proračun bilansa dobijeni su na sledeći način: Prosečna vrednost padavina na prostoru Srbije procenjena je na 850 mm/god (Milovanović et al. 2017), prosečna godišnja suma padavina u Crnoj Gori je ocenjena na nivou od 1600 mm/god, prema podacima ZHMS Crne Gore¹⁹, dok je prosečna vrednost padavina u Savskom slivu Bosne i Hercegovine ocenjena na nivou od 1100 mm, na osnovu podataka iz entitetskih Planova upravljanja vodnim resursima (PUVR u slivu Save FBiH i RS, 2015). Površina karstnih terena na predmetnim terenima proračunata je na osnovu WOKAM baze podataka (Chen et al. 2017) i digitalizovanih geoloških karata. Prosečna vrednost efektivne infiltracije na prostoru karstnih terena Srbije sračunata je na osnovu podataka Stevanovića (1995), odnosno Radulovića M. et al. (2016) za prostor Crne Gore, dok je prosečna vrednost efektivne infiltracije za prostor Savskog sliva Bosne i Hercegovine ocenjena na nivou od 60% (Jolović, 2012). Prosečna vrednost zahvaćenih karstnih podzemnih u Srbiji ocenjena je na 4.2 m³/s (Dimkić et al. 2011), dok je ova vrednost u Crnoj Gori oko 5 m³/s (Radulović M. et al. 2016). S obzirom na nedostatak egzaktnog podatka o količini zahvaćene vode iz karsta u Savskom slivu Bosne i Hercegovine, ovaj podatak je aproksimiran na sledeći način: udeo karstnih podzemnih voda u ukupnom vodosnabdevanju stanovništva Federacije BiH iznosi 37%, dok je u Republici Srpskoj ovaj procenat 31%. Ukoliko se ovi procenti zahvaćenih voda iz karsta za vodosnabdevanje u oba entiteta izraze u odnosu na ukupno zahvaćenu količinu vode u Savskom slivu Federacije Bosne i Hercegovine od 286 x 10⁶ m³/god, odnosno Republike Srpske od 270 x 10⁶ m³/god (videti tabelu 9.6), može se sračunati da

¹⁹ Izvor: <http://meteo.co.me/page.php?id=40>, posećeno 31.8.2022. godine

prosečno godišnje zahvatanje voda iz karsta u Savskom slivu Federacije BiH iznosi $105.82 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$, tj. $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$, odnosno u Republici Srpskoj $83.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$, tj. $2.65 \text{ m}^3/\text{s}$. Ovaj podatak je iskorišćen za komparaciju trenutne eksploatacije karstnih podzemnih voda u oba entiteta i na nivou Savskog sliva Bosne i Hercegovine sa bilansnim rezervama podzemnih voda u karstu.

Tabela 9.8. Proračun bilansa podzemnih voda u karstu dela centralnog Balkana. Legenda: P – prosečne godišnje sume padavina; A – ukupna površina otvorenih karstnih terena; I_{ef} – prosečna vrednost efektivne infiltracije; Q_{pot} – potencijalne rezerve karstnih podzemnih voda; Q_{kor} – prosečna godišnja eksploatacija karstnih podzemnih voda; FI – faktor iskorišćenosti, sračunat kao odnos prosečne eksploatacije karstnih voda i potencijalnih rezervi voda u karstu (Q_{pot}/Q_{kor})

Područje	P (mm)	A (km ²)	I _{ef} (%)	Q _{pot}		Q _{kor}		FI
				m ³ /god	m ³ /s	m ³ /s	%	
SRBIJA	850	15 800	30	4.03×10^9	127.7	4.2	3.3	
CRNA GORA	1600	11 000	70	12.3×10^9	390.7	5	1.3	
FEDERACIJA BIH	1100	6 068	60	4×10^9	127	3.35	2.64	
SAVSKI SLIV	REPUBLIKA SRPSKA	1100	6 297	60	4.15×10^9	131.8	2.65	2.01
	BOSNA I HERCEGOVINA	1100	12 366	60	8.15×10^9	258.8	6	2.32

Ukoliko se posmatraju rezultati bilansnog proračuna karstnih izdani Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine, može se zaključiti da ove izdani akumuliraju veoma velike količine podzemnih voda. Među njima, najveći potencijal podzemnih voda u karstu ima Crna Gora, koja raspolaže sa $307.9 \text{ m}^3/\text{s}$, dok najmanjim potencijalom raspolaže Srbija sa $59.77 \text{ m}^3/\text{s}$. Oba entiteta Bosne i Hercegovine raspolažu sa ukupno oko $260 \text{ m}^3/\text{s}$ vode iz karsta, ukoliko se posmatra samo sliv Save. Sračunati rezultati se čine logičnim, imajući u vidu prostornu distribuciju karstnih terena na analiziranim područjima. Takođe, ukoliko se posmatra faktor iskorišćenosti, odnosno procenat trenutne eksploatacije u odnosu na potencijalne rezerve podzemnih karstnih voda na prostoru centralnog Balkana, može se zaključiti da se radi o vrlo niskoj vrednosti. Naime, od ukupnih potencijalnih rezervi podzemnih voda u karstu Srbije, koristi se 3.3%, procenat iskorišćenih karstnih voda u slivu Save Federacije BiH je 2.64%, Republike Srpske 2.01%, dok je na nivou Savskog sliva Bosne i Hercegovine 2.32%. Najmanji procenat eksploatacije ima Crna Gora – svega 1.3% potencijalnih rezervi u karstu. Ukoliko se ovi regionalni rezultati uporede sa faktorima iskorišćenja odabranih karstnih sistema, dobijaju se vrlo slični relativni odnosi – kaptirana vrela u Srbiji (Seljašnica i Mokra) su najviše iskorišćena, dok se na vrelu Bosne koristi nešto više od 10% eksploatacionih rezervi. Karstni sistemi koji su analizirani u okviru Dinarida Crne Gore nisu kaptirani, tako da nije moguće izračunati faktor iskorišćenja, što samo potvrđuje činjenicu o maloj vrednosti ovog faktora na celokupnom istraživanom terenu. Analizirani primeri su tako potvrdili regionalnu sliku kada je reč o potencijalu karstnih izdani centralnog Balkana – vode u karstnim izdanima ima i više nego dovoljno, ali se ona mora održivo koristiti i regulisati, pogotovo u periodima velikih i malih voda. To se posebno ističe na primerima Seljašnice i Mokre, koje su pokazale veoma visok faktor iskorišćenja karstnih podzemnih voda na godišnjem nivou, što je najviše posledica nepostojanja regulacionih mera koje bi „sačuvale“ višak vode koji ističe tokom perioda visokih voda.

Razmatrajući ukupni potencijal podzemnih voda, izražen kao količina raspoložive vode po stanovniku, još jednom se potvrđuje veliki značaj podzemnih voda u vodosnabdevanju stanovništva dela centralnog Balkana. Raspoloživost podzemnih voda po stanovniku u Srbiji

iznosi 18,426 m³/st/god, u Crnoj Gori 21,935 m³/st/god, dok je u celoj Bosni i Hercegovini (dakle, i Savski i Jadranski sliv) 11,282 m³/st/god (Stevanović, 2022), na osnovu čega se prostor zapadnog Balkana, a posebno Dinarida ističe kao jedan od vodom najbogatijih područja karsta na globalnom nivou (Stevanović et al. 2022b). Sve pomenuto direktno ukazuje na činjenicu da podzemne vode treba da budu strateški resurs br. 1 u narednom periodu, kada je u pitanju obezbeđivanje dovoljnih količina voda za kontinuirano vodosnabdevanje. Takođe, imajući u vidu projekcije o negativnom uticaju klimatskih promena na karstne podzemne vode u Srbiji (Stevanović et al. 2012) i Crnoj Gori (Stevanović & Blagojević, 2021), istraživanje, racionalna eksploatacija i zaštita vitalnog resursa kao što su karstne podzemne vode treba da bude glavni zadatak u godinama koje slede.

9.3 Projekcija razvoja monitoring mreže karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana

9.3.1 Definicija monitoringa karstnih podzemnih voda – vrste i tipovi

Osmatranje režima podzemnih voda predstavlja krucijalni korak ka njegovom održivom korišćenju. Samo u slučaju preciznog poznavanja vodnih resursa, moguće je njima adekvatno upravljati. Uspostavljanje monitoring mreže podzemnih voda značajno je sa aspekta racionalne eksploatacije i preventivne zaštite ovog resursa. Monitoring podzemnih voda može biti *kvantitativni* kada se osmatraju nivoi podzemnih voda u bunarima i izdašnost karstnih vrela i *kvalitativni* kada se vrši osmatranje hemijskih parametara koji se nalaze u podzemnim vodama. To podrazumeva uzorkovanje podzemnih voda unapred definisanom frekvencijom u cilju izrade hemijskih analiza podzemnih voda i praćenje parametara koji se javljaju u koncentracijama višim od maksimalno dozvoljenih vrednosti.

Osnovno načelo uspostavljanja kvantitativnog i kvalitativnog monitoringa podzemnih voda je definisanje programa osmatranja i kontrole količina i kvaliteta podzemnih voda u cilju dobijanja jasnog i sveobuhvatnog pregleda njihovih kvantitativnih i kvalitativnih osobina. Upravo u zavisnosti od stanja (statusa) podzemnih voda, zavisiće i način osmatranja. Prema tipu i prema ODV, monitoring podzemnih voda može biti: *nadzorni*, *operativni* i *istraživački* (Stevanović, 2011). *Nadzorni monitoring* podzemnih voda podrazumeva osmatranje podzemnih voda u cilju dobijanja podataka o njihovom kvantitetu i kvalitetu i procene dugoročnih promena u prirodnim ili antropogenom aktivnošću poremećenim uslovima. Nadzorni monitoring podzemnih voda obično se uspostavlja u uslovima dobrog kvantitativnog i hemijskog statusa, tj. kada podzemne vode nisu pod kvantitativnim ili kvalitativnim pritiskom. Ovaj tip monitoringa podzemnih voda podrazumeva praćenje hemijskih parametara u smislu održavanja dobrog kvaliteta podzemnih voda i nivoa podzemnih voda ili izdašnosti vrela.

Operativni monitoring podzemnih voda sprovodi se u cilju dobijanja više podataka o podzemnim vodama za koje je ustanovljen rizik pogoršanja bilo kvantitativnog bilo hemijskog statusa, kao i u cilju procene trenda promena parametara kvantiteta i/ili kvaliteta i programa mera koje treba preduzeti. Ovaj tip monitoringa podzemnih voda sprovodi se u uslovima kada su podzemne vode lošeg kvantitativnog i/ili hemijskog statusa, tj. kada su pod (potencijalnim) pritiskom na kvantitet ili kvalitet podzemnih voda. Cilj operativnog monitoringa ogleda se u preciznom definisanju hemijskih parametara koji prevazilaze maksimalno dozvoljene koncentracije, identifikaciji uzroka povišene koncentracije i utvrđivanju mera za prevođenje statusa podzemnih voda iz lošeg u dobar, dok se sa aspekta kvantiteta vrši permanentno praćenje nivoa podzemnih voda ili izdašnosti vrela uporedo sa eksploatacijom radi utvrđivanja perioda kada zahvatanje prevazilazi crpenje i kada je potrebno primeniti mere regulacije.

Istraživački monitoring podzemnih voda podrazumeva tip monitoringa koji se primenjuje u cilju identifikacije statusa podzemnih voda u uslovima kada ne postoje relevantne informacije i podaci o koncentracijama hemijskih parametara ili nivoima podzemnih voda i izdašnosti vrela. Najčešće je to slučaj kada podzemne vode nisu ni u kom periodu osmatrane i kod kojih ne postoje izrađene hemijske analize, koje bi mogle da definišu kategoriju pritisaka na kvalitet podzemnih voda. Ovaj tip monitoringa takođe može obuhvatiti i identifikaciju izvora zagađenja, karakteristike kontaminanata, prostorne i vremenske razmere kontaminacije i dr, dok sa aspekta kvantiteta se utvrđuju oscilacije izdašnosti vrela ili nivoa podzemnih voda. Važno je napomenuti da ODV ne predviđa istraživački monitoring za podzemne vode, iako je ovaj tip monitoring upravo najznačajniji sa aspekta upoznavanja podzemnih vodnih resursa, pogotovo u zemljama koje teže pristupu u EU (Srbija, Crna Gora, Bosna i Hercegovina) kod kojih je monitoring podzemnih voda neadekvatan i na relativno niskom nivou.

9.3.2 Prostorni i vremenski aspekt monitoringa karstnih podzemnih voda

Organizacija monitoring mreže predstavlja veoma odgovoran proces koji u sebi uključuje nekoliko faktora. Prilikom uspostavljanja monitoring mreže podzemnih voda neophodno je uzeti u obzir:

- Cilj i svrhu monitoringa, tj. koje podatke o podzemnim vodama je neophodno sakupiti pomoću monitoring mreže podzemnih voda;
- Vrstu i tip monitoringa zavisno od statusa podzemnih voda;
- Veličinu teritorije na kojoj se planira organizovanje monitoringa podzemnih voda;
- (Hidro)geološke karakteristike sredine;
- Raspoloživa finansijska sredstva.

Imajući u vidu funkciju monitoringa podzemnih voda, kao i njen prostorni aspekt, monitoring mreža može biti uspostavljena na *regionalnom* ili *lokalnom* nivou. Regionalna monitoring mreža može obuhvatati veći rečni sliv jedne ili više država (npr. monitoring podzemnih voda sliva Velike Morave), teritorijalnu jedinicu jedne zemlje (npr. monitoring podzemnih voda istočne Srbije) ili teritoriju cele države kada se monitoring podzemnih voda organizuje na nacionalnom nivou, uspostavljanjem nacionalne monitoring mreže. Sa druge strane, lokalna monitoring mreža organizuje se na znatno manjoj površini, kada se osmatranje podzemnih voda organizuje npr. u okviru sliva karstnog vrela, na jednom izvorištu podzemnih voda ili na lokalitetu koje predstavlja potencijalnu opasnost po podzemne vode (npr. osmatranja podzemnih voda blizu deponije ili drugih difuznih i punktuelnih zagađivača). Pored ovih, Milanović S. & Vasić (2015) navode različite kategorije monitoringa podzemnih voda u karstu (tabela 9.9).

Tabela 9.9. Kategorije monitoringa u karstu (Milanović S. & Vasić, 2015)

Tip	Lokacija	Oprema	Frekvencija osmatranja	Baza podataka monitoringa	Nivo monitoring mreže
Kvalitativni	Ponori	Za merenje toka vode	Kontinuirani	Prostorni prikaz	Lokalni
	Pećine	Za kvalitativne analize	Dnevni	Vremenske serije	Regionalni
Kvantitativni	Karstna vrela	Za testove crpenja	Nedeljni	Interpretacija podataka	Nacionalni
	Bunari	Za merenje NPV	Mesečni	Izveštavanje	Međugranični

Frekvencija monitoringa podzemnih voda zavisna je, pre svega od vrste i tipa monitoringa koji se organizuje (tabela 9.10 i 9.11).

Tabela 9.10. Predložena minimalna frekvencija nadzornog monitoringa podzemnih voda (ODV, Vodič br. 15)

		Tip izdani prema dinamičkim karakteristikama				
		Arteska izdan	Izdan sa slobodnim nivoom			Karstna izdan
			Intergranularna izdan Duboka	Plitka	Pukotinska izdan	
Početna frekvencija – glavni i dodatni parametri		Na 6 meseci	Na 3 meseca	Na 3 meseca	Na 3 meseca	Na 3 meseca
Dugoročna frekvencija: Glavni parametri	Visoka provodnost	Na 2 godine	1 godišnje	Na 6 meseci	Na 6 meseci	Na 6 meseci
	Niska provodnost	Na 6 godina	1 godišnje	1 godišnje	1 godišnje	Na 6 meseci
Dodatni parametri (validacija u toku)		Na 6 godina	Na 6 godina	Na 6 godina	Na 6 godina	-

Tabela 9.11. Predložena minimalna frekvencija operativnog monitoringa podzemnih voda (ODV, Vodič br. 15)

		Tip izdani prema dinamičkim karakteristikama				
		Arteska izdan	Izdan sa slobodnim nivoom			Karstna izdan
			Intergranularna izdan Duboka	Plitka	Pukotinska izdan	
Visoka ranjivosti PV	Kontinualni pritisak	-	Na 6 meseci	Na 6 meseci	Na 3 meseca	Na 3 meseca
	Povremeni pritisak	-	1 godišnje	Po potrebi	Po potrebi	Po potrebi
Niska ranjivost PV	Kontinualni pritisak	1 godišnje	1 godišnje	Na 6 meseci	Na 6 meseci	Na 3 meseca
	Povremeni pritisak	1 godišnje	1 godišnje	Po potrebi	Po potrebi	Po potrebi
Procena trenda		1 godišnje	Na 6 meseci	Na 6 meseci	Na 6 meseci	-

Monitoring kvaliteta podzemnih voda po pravilu se ređe implementira nego kvantitativni monitoring iz razloga što je fluktuacija nivoa ili izdašnosti podzemnih voda u karstu mnogo češća nego oscilacija kvaliteta podzemnih voda. Prema tipu monitoringa, nadzorni monitoring podzemnih voda podrazumeva ređe osmatranja podzemnih voda, dok operativni monitoring iziskuje veću frekvenciju osmatranja režima podzemnih voda. Frekvencija monitoringa kvaliteta podzemnih voda karstnih sistema, prema tabelama 9.10 i 9.11, zasniva se na identifikovanom pritisku na kvalitet podzemnih voda. U nadzornom monitoringu podzemnih voda, osmatranja režima bi trebalo vršiti na 3 meseca u početnom periodu od 2 godine, dok bi nakon tog perioda osmatranje trebalo vršiti dva puta godišnje. Operativni monitoring podzemnih voda iziskuje češće osmatranje, pa je tako neophodno osmatrati režim podzemnih voda na svaka 3 meseca.

Generalno gledano, monitoring podzemnih voda prema frekvenciji osmatranja može se podeliti na (Milanović S. & Vasić, 2015):

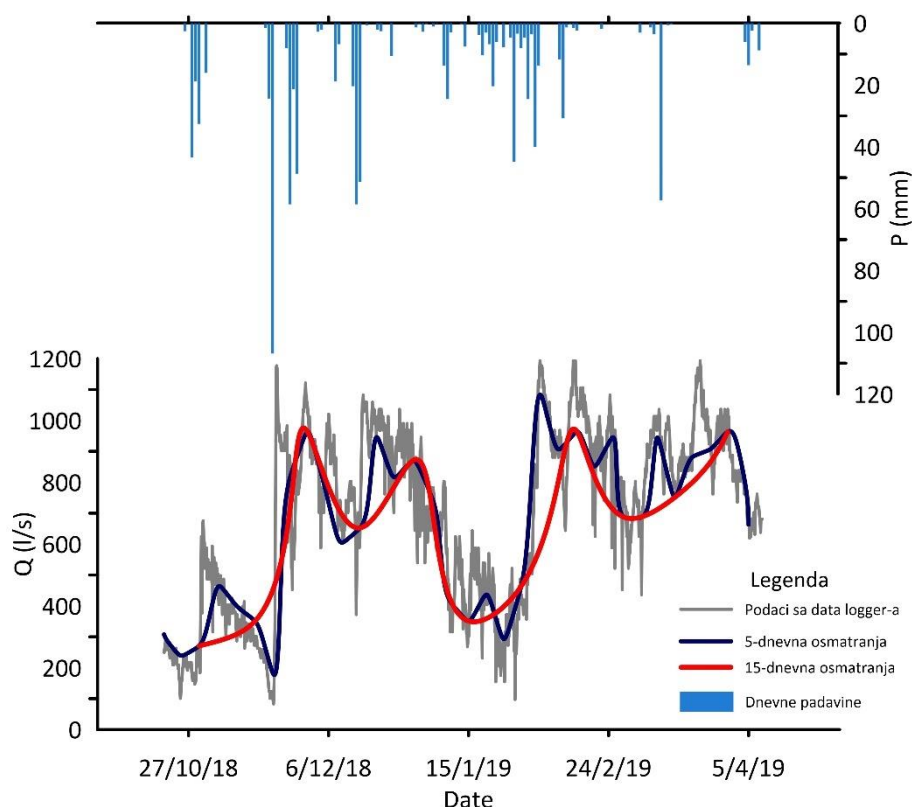
- **Kontinualni monitoring PV** – kada se osmatranja vrše instaliranjem mernih uređaja – dajvera, koji automatski prate određenu komponentu monitoringa podzemnih voda (nivo, temperaturu, elektroprovodljivost i dr.). U tom slučaju, frekvencija osmatranja podzemnih voda može biti svakog sata ili na 5, 15, 30 minuta i sl. ;

- **Dnevni monitoring PV** – kada se osmatranja vrše svakog dana u precizno utvrđenom vremenskom periodu (npr. svakoga dana u 7h ujutru) od strane zaduženog lica na monitoring punktu;
- **Nedeljni monitoring PV** – kada se osmatranja vrše određenog dana u nedelji;
- **Mesečni monitoring PV** – kada se osmatranja vrše tačno određenog dana u mesecu (npr. svakog 15. u mesecu) od strane zaduženog lica na monitoring punktu ili lično od strane istraživača;
- **Sezonski monitoring PV** – kada se osmatranja vrše na višemesečnom nivou (npr. u periodu malih ili velikih voda ili tokom svakog godišnjeg doba). Ovaj monitoring najčešće se vrši od strane istraživača.

Kada je reč o frekvenciji kvalitativnog monitoringa podzemnih voda karstnih sistema, mesečni i sezonski monitoring podzemnih voda najčešće je sasvim dovoljan da bi se ustanovile fluktuacije hemijskih parametara kvaliteta karstnih podzemnih voda. Sa druge strane, frekvencija monitoringa kvantiteta podzemnih voda na sezonskom ili mesečnom nivou najčešće nije dovoljna kada se vrši osmatranje izdašnosti karstnih vrela, budući da se oscilacije isticanja dešavaju na dnevnom, pa i satnom nivou. Na sl. 9.3 prikazane su različite frekvencije osmatranja isticanja podzemnih voda na karstnom vrelu Šavnička glava u Crnoj Gori. Sivom bojom prikazano je kontinuirano osmatranje izdašnosti vrela sa frekvencijom na tri sata u periodu oktobar 2018 – april 2019. godine, tamno plavom bojom su prikazana merenja na 5 dana, dok je crvenom linijom prikazano merenje na dve nedelje, tj. na 15 dana. Svetlo plavom bojom prikazane su dnevne vrednosti padavina sa stanice Šavnik. Ukoliko se uporede maksimalne i minimalne vrednosti izdašnosti, dobijene različitim frekvencijama osmatranja, može se zaključiti da su minimalne vrednosti isticanja dva puta veće ukoliko se vrelo osmatra na 5 dana, odnosno tri puta ukoliko su dvonedeljna osmatranja u pitanju (tabela 9.12). Ovo može biti posebno značajno ukoliko se određuje ekološki minimum, budući da će se redim osmatranjem dobiti vrlo nepouzdana podaci (Stevanović & Maran Stevanović, 2021). Sa druge strane, maksimalne vrednosti su manje sa povećanjem frekvencije osmatranja, što ukazuje na neregistrovanje maksimalnih pikova isticanja pri osmatranjima na 5 i 15 dana. To se jasno može videti i na sl. 9.3 gde su apsolutni minimumi i maksimumi jedino vidljivi tokom kontinuiranih merenja. Takođe, reakcija vrela Šavnička glava na intenzivnu kišnu epizodu je vrlo brza ukoliko se razmatraju kontinuirani podaci, dok sa redom frekvencijom osmatranja, stiže se utisak da je period zakašnjenja reakcije nekoliko dana, što očigledno nije slučaj. Stoga, instaliranje mernih uređaja koji mogu kontinuirano na satnom ili dnevnom nivou pratiti isticanje podzemnih voda karstnih vrela i vrednosti temperature vode, elektroprovodljivosti i mutnoće podzemnih karstnih voda je neophodno i krucijalno za pravilno upravljanje vodnim resursima u karstu, budući da bi postojanje tih uređaja omogućilo osmatranje svih promena kvantiteta i kvaliteta karstnih podzemnih voda praktično u realnom vremenu.

Tabela 9.12. Uporedni prikaz minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja vrela Šavnička glava u periodu oktobar 2018 – april 2019 prema različitoj frekvenciji osmatranja (Stevanović & Maran Stevanović, 2021)

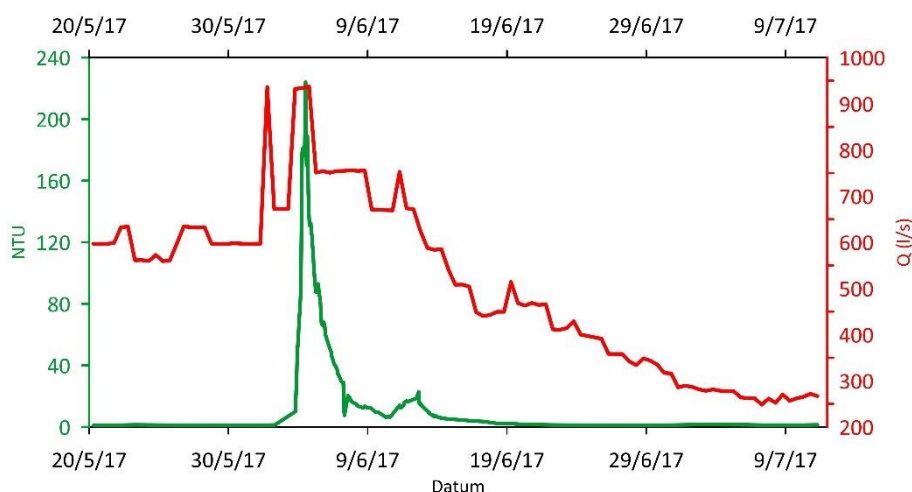
Frekvencija	Minimum (l/s)	Maksimum (l/s)
Kontinuirano merenje na 3 sata	90	1150
Merenje na svakih 5 dana	180	1080
Merenje na svakih 15 dana	270	960



Sl. 9.3. Uporedni prikaz različitih frekvencija osmatranja kvantiteta karstnih podzemnih voda vrela Šavnička Glava u Crnoj Gori (Stevanović & Maran Stevanović, 2021)

Promena frekvencije osmatranja podzemnih voda u karstu tokom uspostavljenog monitoringa, moguća je sa nailaskom poplavnih talasa, kada dolazi do brze reakcije karstnog sistema u vidu povećane izdašnosti i najčešće mutnoće podzemnih voda. U tim slučajevima, posebno je važno pratiti kvalitet vode u realnom vremenu i vršiti komparaciju sa promenama izdašnosti, naročito zbog parametra mutnoće čija je vrednost obično direktno proporcionalna izdašnosti vrele. Drugim rečima, sa ekstremnim povećanjima izdašnosti nailaskom intenzivne kišne epizode, obično dolazi do višestrukog povećanja mutnoće vode koja u određenim periodima postane čak i golim okom vidljiva. O ovom fenomenu treba posebno voditi računa kada je vrelo kaptirano za potrebe vodosnabdevanja. Jedan slučaj ekstremnog povećanja mutnoće zabeležen je na vrelu Seljašnica koje je kaptirano za potrebe vodosnabdevanja Prijepolja. Prema izveštajima nadležnih u JKP „Lim“ iz Prijepolja, usled jakih kiša izlučenih na slivnom području Seljašnice tokom 1. i 2. juna 2017. godine, u jutarnjim časovima 4. juna je došlo do povećanja izdašnosti podzemnih voda i naglog zamućenja vode na izvorištu. Već oko 6h ujutru, mutnoća je iznosila 100 NTU jedinica, a već u 12h iznosila je maksimalnih 224 NTU jedinica²⁰. Vrednosti mutnoće su praćene više puta dnevno. U pomenutom periodu, vodovod je obustavio isporuku vodu ka gradu, a nadležni zavod za javno zdravlje je vanredno uzorkovao vodu i dokazao da je ona mikrobiološki ispravna, odnosno da je do fizičko-hemijske neispravnosti došlo samo zbog povećanja mutnoće. Uporedni prikaz vrednosti mutnoće i izdašnosti vrele Seljašnice dat je na slici 9.4, sa koje se jasno vidi veza između povećanja izdašnosti i mutnoće vode. Na dijagramu su nanete vrednosti izdašnosti vrele Seljašnice merene svakih 12h u navedenom periodu, dok je mutnoća u istom periodu merena češće (više puta na dan) ali u nepravilnim vremenskim razmacima.

²⁰ Maksimalno dozvoljena koncentracija mutnoće u vodi za piće iznosi 1 NTU jedinica, prema važećem Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće ("Sl. list SRJ", br. 42/98 i 44/99 i "Sl. glasnik RS", br. 28/2019)

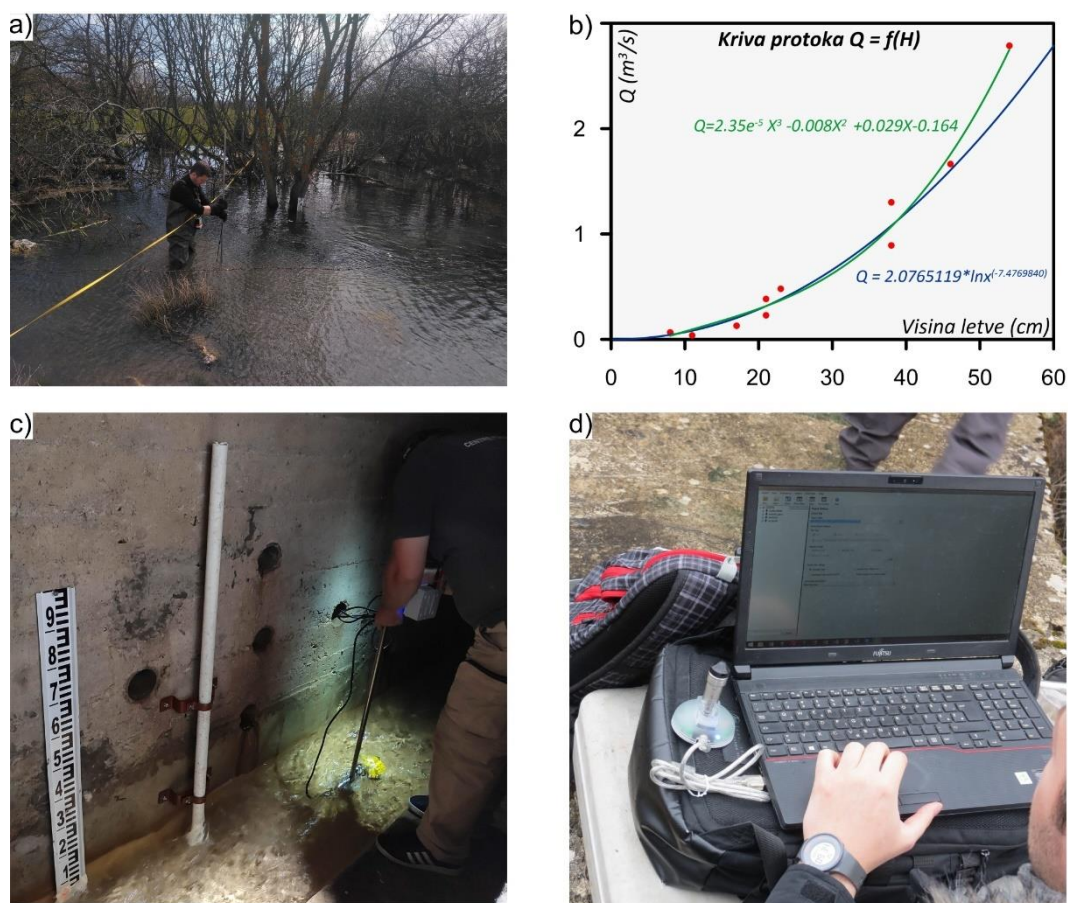


Sl. 9.4. Uporedni prikaz vrednosti mutnoće (zeleno) i izdašnosti (crveno) vrela Seljašnice u periodu 20. maj – 12. jul 2017. godine (prema podacima JKP „Lim“, Prijepolje)

9.3.3 Način merenja i uzorkovanja karstnih podzemnih voda

Monitoring podzemnih voda može se vršiti na objektima koji su u sistemu eksploatacije ili na objektima koji su izrađeni specijalno u svrhu osmatranja podzemnih voda. Radi racionalizacije troškova osmatranja, olakšanog uzorkovanja podzemnih voda za hemijske analize, ali i smanjenog rizika od uništavanja monitoring objekata, preporuka je da se objekti nalaze u okviru izvorišta podzemnih voda, ili pod ingerencijom vodovoda koji eksploatišu podzemne vode na konkretnom terenu. Međutim, u tom slučaju treba voditi računa da ovakve racionalizacije ne dovedu do odstupanja od nužnog nivoa reprezentativnosti rasporeda i gustine monitoring punktova (Stevanović et al. 2020b).

Specifičnost monitoringa kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika karstnih hidrogeoloških sistema je da se on može uspostaviti i na postojećim prirodnim hidrogeološkim pojavama (ponorima, izvorima, pećinama), tj. da ne iziskuje *a priori* izradu bušotina, čije bušenje u karstu zahteva značajna finansijska sredstva. Ponori su pogodni za praćenje količine voda koje ulaze u sistem, tako što se osmatračka stanica može postaviti na samom mestu poniranja podzemnih voda ili na rečnom toku uzvodno od ponora, u zavisnosti od njegovog kapaciteta gutanja. Karstni izvori su krucijalni za praćenje kvantiteta i kvaliteta podzemnih voda u karstu, imajući u vidu da je na karstnim izvorima omogućen najbliži kontakt sa karstnim podzemnim vodama. Zavisno od maksimalnih količina isticanja karstnih voda na vrelu, moguće je formiranje osmatračke mreže, dok je poželjno osmatrati isticanje vode što je moguće bliže mestu isticanja. Postoji nekoliko metoda merenja kapaciteta karstnih podzemnih voda: pomoću hidrometrijskog krila i formiranja krive protoka $Q = f(H)$; pomoću preliva koji se obično koriste za manja vrela, tj. manje rečne tokove; uz pomoć (polu)automatskih mernih stanica koje uključuju limnigrafe, vodomerne letve, dajver uređaje i prelive; i pomoću digitalnih merača na principu Doplerovog efekta (Milanović S. & Vasić, 2015) (Sl. 9.5).



Sl. 9.5. a) Prikaz merenja kvantiteta karstnih podzemnih voda pomoću hidrometrijskog krila; b) Formiranje krive protoka $Q=f(H)$ za proračun izdašnosti vrela; c) Instalacija data logger uređaja za kontinuirano merenje nivoa podzemnih voda u kaptazi karstnog vrela; d) Očitavanje podataka o nivoima podzemnih voda sa data logger-a

Kvalitet podzemnih voda predstavlja praktično neodvojiv deo režima podzemnih voda, s obzirom na njihov izuzetan značaj i korišćenje pre svega za piće i kao takav, ovaj resurs treba biti adekvatno osmatran. Kako ODV u svojim članovima 7 i 8, odnosno *CIS Vodiču br. 15 o monitoringu podzemnih voda* predlaže, glavni parametri koji bi se morali osmatrati na monitoring tačkama u okviru kvalitativnog monitoringa karstnih podzemnih voda su (Stevanović & Maran Stevanović, 2021):

- Rastvoreni kiseonik;
- pH vrednost;
- Elektroprovodljivost;
- Nitrati;
- Amonijum;
- Temperatura;
- Glavni katjoni i anjoni.

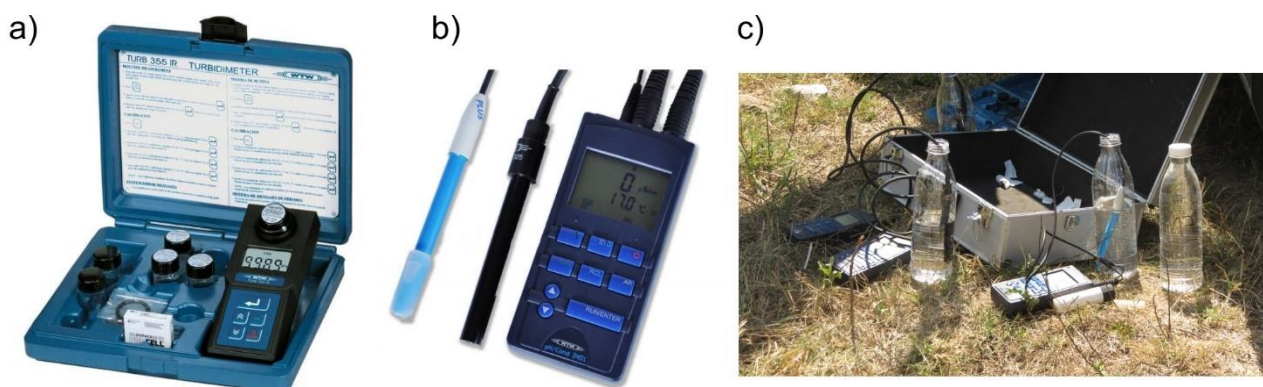
Pored navedenih parametara, *Direktiva o zaštiti podzemnih voda* (EC, 2006) od zagađenja predlaže i osmatranje arsena, olova, kadmijuma, žive, hlorida i sulfata. U fazi istraživačkog monitoringa, pored navedenih parametara predlaže se i kontrola trećeg elementa tzv. *azotne trijade* – nitrita, zatim cinka, bakra, hroma i nikla. U područjima obuhvaćenim poljoprivrednom aktivnošću osmatranja kvaliteta karstnih podzemnih voda treba da obuhvate i pesticide (pr. lindan, atrazin i dr.), zatim dihlorodifenil – trihloroetan (DDT), dihlorodifenil – dihloroetan (DDD) i DDS. Takođe, u karstnim podzemnim vodama treba analizirati sadržaje policikličnih

aromatičnih ugljovodonika (PAH) i polihlorovanih bifenila (PCB), koji je posebno važan u područjima u blizini ranijih ratnih dejstava, zatim hlorovanih ugljovodonika (trihloretilen i tetrahloretilen), ali i sadržaj bakterija, pre svih koliformnih i fekalnih koliformnih bakterija i *Escherichia coli*.

Način praćenja kvaliteta karstnih podzemnih voda mora se prilagoditi konkretnim uslovima na terenu, ali i dostupnosti opreme za terenska istraživanja. Najprecizniji rezultati kvaliteta voda dobijaju se *in situ* merenjima, kada je voda minimalno ili nije uopšte poremećena spoljašnjim uslovima. Međutim, s obzirom na nemogućnost merenja svih parametara kvaliteta na licu mesta, određene komponente kao što su pesticidi, bakterije i dr. moraju biti određene u akreditovanim laboratorijama. Sa druge strane, makrokomponente, rastvoreni kiseonik, pH vrednost, alkalitet, mutnoća i dr. mogu uspešno biti određeni *in situ* uz pomoć terenskih mernih uređaja (Sl. 9.6 i 9.7).

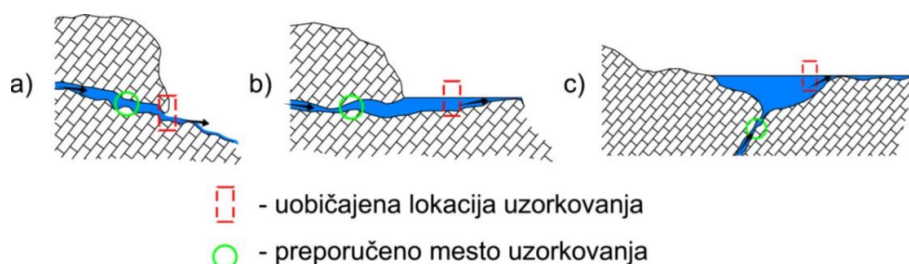


Sl. 9.6. Terenski uređaji za *in situ* merenja hemijskih parametara podzemnih voda (levo); *in situ* određivanje parametara kvaliteta karstnih podzemnih voda na terenu (desno)



Sl. 9.7. Terenska oprema za *in situ* merenja kvalitativnih parametara podzemnih voda: a) oprema za merenje mutnoće PV (izvor: wtw.com); b) oprema za merenje elektroprovodljivosti i pH podzemnih voda (izvor: clarksonlab.com); c) prikaz njihovog korišćenja pri analizi kvaliteta podzemnih voda

Kada je reč o lokaciji uzorkovanja podzemnih karstnih voda, Vasić et al. (2013, 2015) navode da neadekvatno određena lokacija uzorkovanja može dati pogrešnu sliku o bakteriološkoj ispravnosti podzemnih karstnih voda. Vasić et al. (2013, 2015) i Milanović S. et al. (2012) ističu čest uticaj spoljašnjih faktora na pojavu bakterioloških zagađenja na samom mestu isticanja, dok istovremeno podzemne vode na određenoj dubini u karstnim kanalima imaju veoma malo ili čak uopšte ne sadrže bakterije kao voda na površini terena. Stoga, veoma je važno odrediti lokaciju uzorkovanja podzemnih voda karstnih sistema tako da reprezentativno odslikava realne kvalitativne karakteristike karstnih podzemnih voda (Sl. 9.8).



Sl. 9.8. Shematski prikaz tipova isticanja karstnih vrela i potencijalnih lokacija uzorkovanja karstnih podzemnih voda: a) gravitaciono isticanje; b) zajezerena zona pri gravitacionom isticanju; c) zajezerena depresija pri sifonalnom isticanju (Vasić et al. 2013)

9.3.4 Aktuelna monitoring mreža karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana

Da bi se podzemne vode racionalno eksploatisale, neophodno je precizno utvrditi njihove kvalitativne i kvantitativne karakteristike. Nepostojanje sistemskog nacionalnog monitoringa podzemnih voda, koji bi prostorno i vremenski ravnomerno obuhvatio sve tipove izdani, uslovljava nizak stepen poznavanja kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda. U suprotnom, izbegle bi se paradoksalne situacije gde se planira strategija korišćenja podzemnih voda, bez preciznog znanja o raspoloživim količinama, što su česti slučajevi u našoj zemlji (Stevanović et al. 2020b).

Monitoring mreža podzemnih voda je veoma različite gustine u zemljama u Evropi i svetu. Najveći broj monitoring tačaka obično je u najrazvijenijim zemljama, dok je broj osmatračkih punktova u zemljama u razvoju najčešće sveden na minimum. Tako, npr. u SAD postoji oko 1.5 miliona osmatračkih stanica u svih 50 država, dok se u Austriji podzemne vode osmatraju na oko 3500 punktova i 91 karstnom vrelu (Stevanović & Maran Stevanović, 2021). Na prostoru Balkana situacija je takođe drugačija od države do države. Monitoring podzemnih voda u Sloveniji i Hrvatskoj, koje su članice EU je mnogo bolje raspoređen nego u ostalim balkanskim zemljama, budući da se na prostoru Slovenije osmatra 27 karstnih vrela, dok se u Hrvatskoj osmatra 48 vrela (Stevanović & Maran Stevanović, 2021).

Generalno gledano, monitoringu podzemnih voda ne pridaje se značaj kakav bi zahtevao resurs, esencijalan za vodosnabdevanje stanovništva Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine. Međutim, poslednjih godina čine se naponi da se uspostavi adekvatna monitoring mreža podzemnih voda, najviše zbog obaveza preuzetih iz procesa pregovaranja pomenutih država o pristupu Evropskoj uniji i poglavlja 27 – Životna sredina.

Monitoring kvantiteta i kvaliteta podzemnih voda se na teritoriji Srbije sprovodi od strane nekoliko pravnih subjekata, među kojima su Republički hidrometeorološki zavod Srbije (RHMZ), JP „Đerdap“, JP „Vojvodina vode“, regionalni zavodi i republički Institut za javno zdravlje i Agencija za zaštitu životne sredine, međutim do sada nije uspostavljena njihova funkcionalna i integrisana saradnja, iako se radi o javnim preduzećima ili zavodima koji su posluju u istoj, državnoj nadležnosti (Stevanović et al. 2020b). Monitoring površinskih i podzemnih voda u Republici Srbiji se određuje na osnovu godišnje Uredbe o monitoringu, koja je u 2021. godini predvidela 371 objekat za osmatranje kvantiteta podzemnih voda, odnosno 57 pijezometara za osmatranje kvaliteta podzemnih voda. Jedan od najvećih problema monitoring mreže podzemnih voda Srbije jeste disproporcionalnost u prostornoj distribuciji monitoring objekata na kojima se osmatraju podzemne vode. Tako, sva vodna tela podzemnih voda čiji je monitoring u nadležnosti RHMZ su zbijenog ili složenog tipa, tj. reč je o osmatranjima nivoa podzemnih voda u bunarima, dok se osmatra svega nekoliko karstnih vrela, i to diskontinualno, dakle ne svake godine. Drugim rečima, tokom 2014. godine osmatrano je 6 karstnih vrela (vrelo Mlave, Krupajsko vrelo, Veliko vrelo u istočnoj Srbiji i Petničko, Povolensko

i vrelo Gvozdac u zapadnoj Srbiji), međutim jedino su nastavljena merenja na vrelo Mlave, koje je i vrelo sa najdužim nizom osmatranja isticanja podzemnih voda, koje je započeto još 60-ih godina prošlog veka. Može se konstatovati da kvantitativni monitoring podzemnih voda, barem do skora, suštinski nije bio u funkciji očuvanja i održivog razvoja resursa podzemnih voda, već je pratio samo hidrološku komponentu. Kao glavni nedostatak ističe se odsustvo integralnog pristupa osmatranju pre svega kvantiteta podzemnih voda, odnosno neravnomerna rasprostranjenost monitoring objekata na teritoriji Srbije (Stevanović et al. 2020b).

Sličan situacija prisutna je i na prostoru Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine. Monitoring mreža podzemnih voda u Crnoj Gori u nadležnosti je Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju (ZHMS) Crne Gore, koja vrši osmatranje i kvantiteta i kvaliteta podzemnih voda. Osmatranje kvantiteta podzemnih voda u Crnoj Gori se odnosi pre svega na osmatranje nivoa podzemnih voda u pijezometrima u okviru Zetsko-bjelopavličke ravnice, dok osmatranja kvantiteta kaptiranih vrela osmatra svako izvorište zasebno, međutim ne postoji objedinjeni sistem koji integriše sve podatke o kvantitetu kaptiranih karstnih vrela, što bi bilo višestruko korisno. ZHMS vrši osmatranje i površinskih tokova, tako da se neki osmatračkih punktovi površinskih reka mogu smatrati istovremeno i za osmatranje karstnih vrela, budući da se monitoring vodostaja i proticaja vrši neposredno nizvodno od vrela, bez pritoka. Takva je situacija u Gornjoj Bijeloj gde se vrši osmatranje vodostaja i proticaja reke Bijele, koja se formira od vrela Oko Bijele, odnosno u Rijeci Crnojevića gde se osmatra istoimena reka, odnosno vrelo. Sa druge strane, osmatranje kvaliteta podzemnih voda u karstu vrši se na nekoliko karstnih pojava i objekata, kojih je u 2021. godini bilo 14. Ovaj broj karstnih pojava i objekata koji se osmatraju rezultat je povećanja broja osmatračkih punktova uključivanjem postojećih hidrogeoloških pojava i objekata i bušenjem novih pijezometara kao rezultat projekta „*Jačanje administrativnih kapaciteta za implementaciju Okvirne direktive o vodama u Crnoj Gori*“ iz 2019. godine. Pomenutih 14 karstnih lokacija uključuje Podgorska vrela, vrelo Reževića rijeke, izvorište Bolje Sestre, vrelo Ribnice, Mareza, Vidrovan, Glava Šavnika, Gojakovića vrela, vrelo Bistrice, Manastirsko vrelo, vrelo Ibra, Alipašina vrela, vrelo Breznice i Zmajevac.

Monitoring podzemnih voda u slivu Save u Bosni i Hercegovini je takođe na niskom nivou. Sprovođenje monitoringa na području sliva Save koji pripada Federaciji BiH je obaveza „*Agencije za vodno područje rijeke Save*“ iz Sarajeva, dok monitoring podzemnih voda za područje Savskog sliva u Republici Srpskoj obezbeđuje JU „*Vode Srpske*“ iz Bijeljine. Monitoring kvantiteta podzemnih voda u slivu Save Republike Srpske praktično odsustvuje, budući da je osmatranje kvantiteta prepušteno pravnim subjektima koji gazduju izvorištima i koji imaju obavezu da podatke o kvantitetu podzemnih voda dostavljaju nadležnim državnim organima. Međutim, takva praksa nije zaživela, tako da ne postoje objedinjeni podaci o kvantitetu podzemnih voda u ovom entitetu. Sa druge strane, kvalitet podzemnih voda u prethodnom periodu vršen je samo na prostoru Semberije u 21 pijezometru, delimično na prostoru Lijeve polja i Posavine, što znači isključivo u okviru intergranularnih izdani (PUVR sliva Save u RS, 2015). Kao zaključak, može se reći da je kvantitativni i kvalitativni monitoring podzemnih voda u slivu Save koji pripada Republici Srpskoj na niskom nivou i da je potrebno u narednim planskim dokumentima posebnu pažnju fokusirati na ovaj resurs, koji zapravo obezbeđuje 90% voda za vodosnabdevanje stanovništva Republike Srpske.

Na prostoru Savskog sliva u Federaciji Bosne i Hercegovine načinjen je izvestan pomak u odnosu na prethodni period. Naime, prema preporukama *Plana upravljanja vodnim resursima u slivu Save na prostoru Federacije BiH* iz 2015. godine, kreirani su elaborati o uspostavljanju monitoringa podzemnih voda u ovom entitetu, kako bi se ispunili ciljevi sa aspekta osmatranja ovog resursa. Izvršeno je bušenje novih pijezometara u neposrednom slivu Save i u slivu reke Bosne, te je ukupno uspostavljeno 12 novih osmatračkih punktova u okviru intergranularne

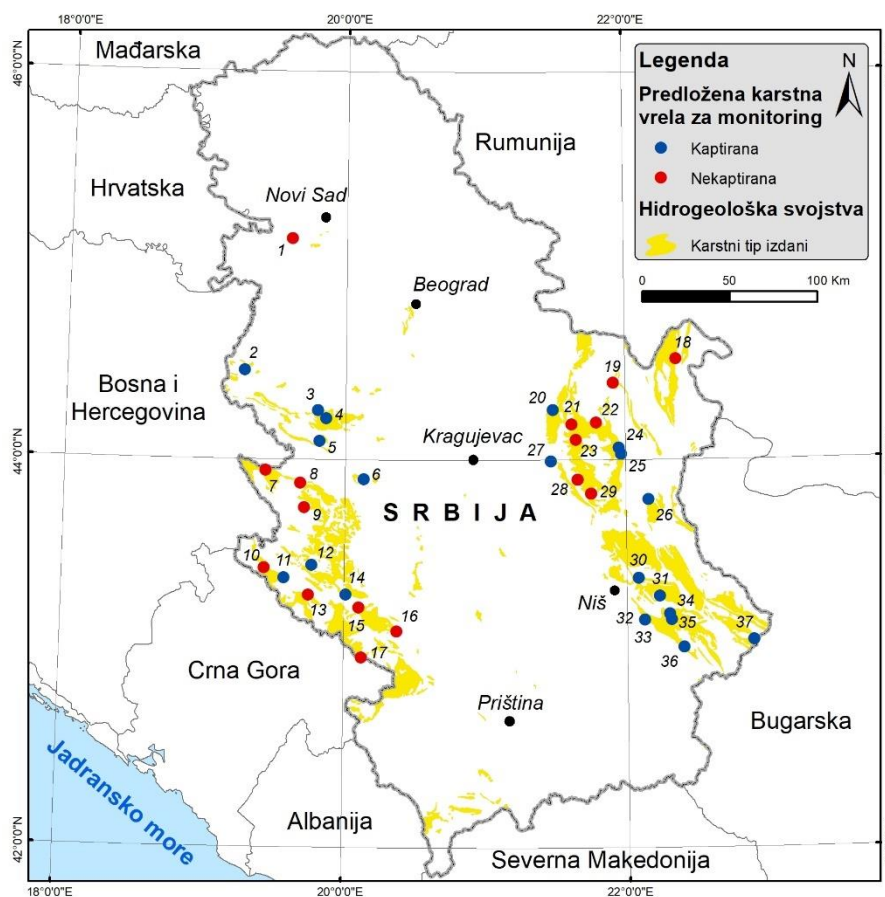
izdani, na kojima se meri nivo podzemnih voda i temperatura vode. Istovremeno, kreiran je elaborat o uspostavljanju kvantitativno-kvalitativnog monitoringa karstnih podzemnih voda u okviru sliva Save u Federaciji BiH, kojim je definisano 20 karstnih vrela koja treba da uđu u monitoring mrežu karstnih podzemnih voda ovog entiteta (Begović et al. 2019). Ipak, kao glavni trenutni nedostatak monitoring mreže podzemnih voda sliva Save u Federaciji BiH ističe se odsustvo kvalitativnog monitoringa na postojećim lokacijama, što je u planu da se implementira u narednom periodu (PUVR sliva Save u FBiH, 2021).

9.3.5 Predlog monitoring mreže karstnih podzemnih voda u Srbiji, Crnoj Gori i Savskom slivu Bosne i Hercegovine

Na osnovu iznetih činjenica o aktuelnoj monitoring mreži podzemnih voda Srbije, može se zaključiti da je ona neadekvatno pozicionirana sa aspekta osmatranja karstnih podzemnih voda. Stoga, neophodno je dati predlog pugušćenja osmatračke mreže kojom bi se vršio monitoring podzemnih voda iz karsta Unutrašnjih Dinarida i Karpato-balkanida Srbije. Tabela 9.13 sadrži predlog karstnih vrela za osmatranje kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika, gde se pri izboru vodilo računa o ravnomernom rasporedu vrela u svim karstnim terenima u Srbiji, odnosno o uključivanju i nekaptiranih vrela u osmatračku mrežu, od kojih se trenutno jedino vrelo Mlave osmatra. Takođe, određena kaptirana vrela su predložena za osmatranje, kako bi se uticalo na nadležne vodovode koje gazduju njima da dostavljaju podatke državnim organima. Predložena karstna vrela su evaluirana na osnovu ranijih predloga (Stevanović & Dokmanović, 2015; Stevanović et al. 2020b) i proširena novim karstnim vrelima. Grafički prikaz navedenih karstnih vrela dat je na slici 9.9.

Tabela 9.13. Predlog karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda Srbije

Br	Naziv	Kaptaža	Br	Naziv	Kaptaža	Br	Naziv	Kaptaža
1	Kuštilj	Ne	13	Vrelo Sopotnice	Ne	25	Zlotsko vrelo	Da
2	9 Jugovića	Da	14	Vučkovo vrelo	Da	26	Lenovačko vrelo	Da
3	Paklje	Da	15	Vrelo Vape	Ne	27	Nemanja I	Da
4	Gradačka vrela	Da	16	Vrelo Raške	Ne	28	Vrelo Grze	Ne
5	Taorska vrela	Da	17	Đerekarsko vrelo	Ne	29	Krivovirska vrela	Ne
6	Jelen Do	Da	18	Blederija	Ne	30	Rumenjak	Da
7	Perućac	Ne	19	Kaluđerica	Ne	31	Krupac-Modro oko	Da
8	Vrelo Jelisavčići	Ne	20	Šetonjsko vrelo	Da	32	Gornji Dušnik	Da
9	Džambića vrelo	Ne	21	Krupajsko vrelo	Ne	33	Mokra	Da
10	Bučje	Ne	22	Vrelo Mlave	Ne	34	Divljana	Da
11	Seljašnica	Da	23	Veliko vrelo	Ne	35	Ljuberađa	Da
12	Crno vrelo	Da	24	Beljevinska vrela	Da	36	Protopopinci	Da

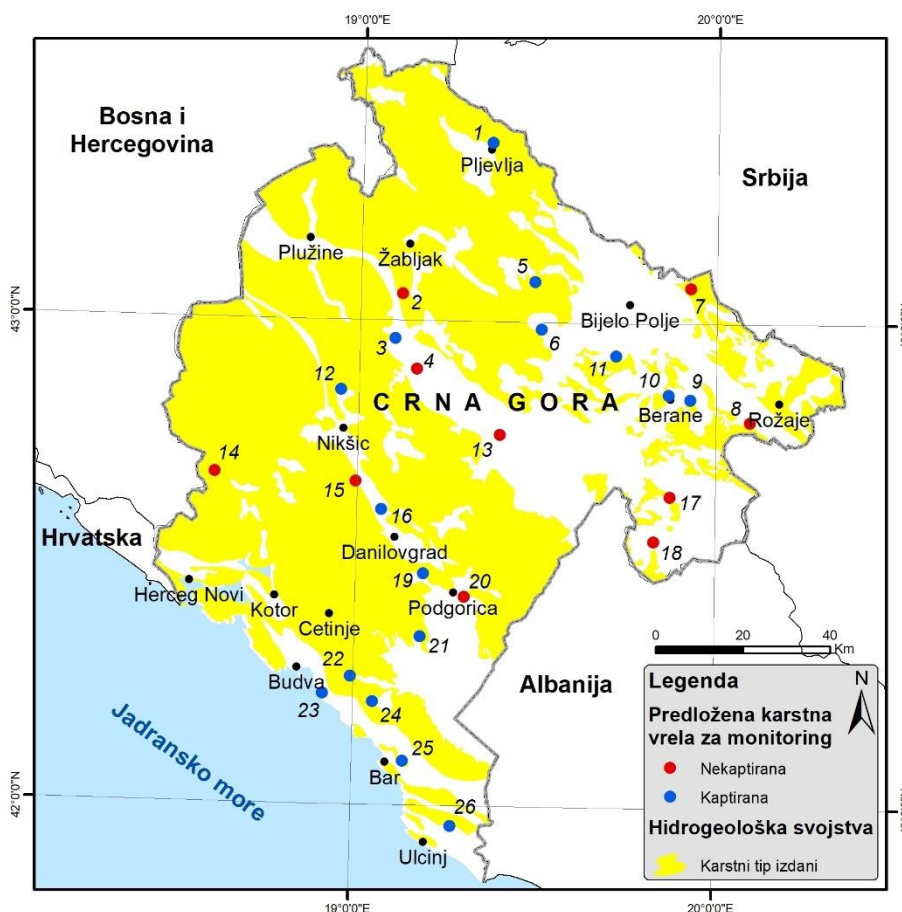


Sl. 9.8. Prostorni raspored predloženih karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda u Srbiji (brojevi korespondiraju sa tabelom 9.13)

Monitoring podzemnih voda u Crnoj Gori je poslednjih godina napredovao kao rezultat projekta „Jačanje administrativnih kapaciteta za implementaciju Okvirne direktive o vodama u Crnoj Gori“ iz 2019. god, uključivanjem nekoliko novih karstnih vrela u osmatračku mrežu i bušenjem novih pijezometara za osmatranje podzemnih voda u intergranularnoj izdani. Međutim, nisu sva vrela predviđena ovim projektom i Planovima upravljanja Jadranskim i Dunavskim slivom Crne Gore uključena u aktuelnu mrežu, te se predlaže uvođenje dodatnih lokacija za osmatranje podzemnih voda u karstu Crne Gore. Tabela 9.14 prikazuje predložena karstna vrela, dok je na sl. 9.10 prikazana njihova lokacija.

Tabela 9.14. Predlog karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda Crne Gore (prema ARBMP, 2019; DRBMP, 2019)

Br	Naziv	Kaptaža	Br	Naziv	Kaptaža	Br	Naziv	Kaptaža
1	Breznica	Da	10	Manastirsko vrelo	Da	19	Mareza	Da
2	Bukovica	Ne	11	Vrelo Bistrice	Da	20	Ribničko vrelo	Ne
3	Šavnička Glava	Da	12	Vidrovan	Da	21	Bolje Sestre	Da
4	Oko Bijele	Ne	13	Svetigora	Ne	22	Podgorska vrela	Da
5	Zmajevac	Da	14	Zaslavnica	Ne	23	Vrelo Reževića rijeke	Da
6	Gojakovića vrelo	Da	15	Obošničko Oko	Ne	24	Velje Oko	Da
7	Đalovića vrelo	Ne	16	Viška vrela	Da	25	Vrelo Kajnak	Da
8	Vrelo Ibra	Ne	17	Murinski springs	Ne	26	Vrelo Gač	Da
9	Dapsića vrelo	Da	18	Alipašino vrelo	Ne			

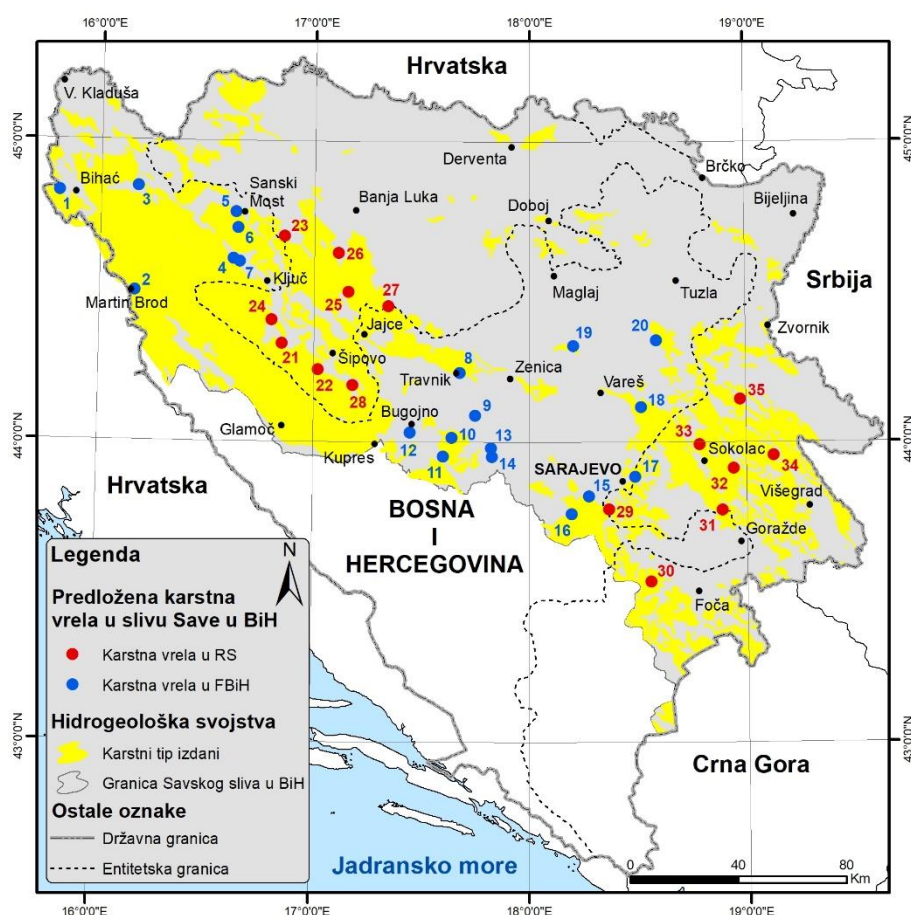


Sl. 9.10. Prostorni raspored predloženih karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda u Crnoj Gori (prema ARBMP, 2019; DRBMO, 2019); (brojevi korespondiraju sa tabelom 9.14)

Predlog monitoring mreže podzemnih voda u karstu u Savskom slivu Bosne i Hercegovine dat je u tabeli 9.15 i na sl. 9.11. Karstna vrela u Federaciji BiH predložena su na osnovu planskih dokumenata (Begović et al. 2019; PUVR sliva Save u FBiH, 2021) koja sadrže lokacije vrela na kojima se planira uspostavljanje monitoring mreže, budući da su nadležne ustanove preduzele konkretne korake za organizaciju monitoring mreže podzemnih voda u Savskom delu sliva koji pripada Federaciji BiH. To, međutim, nije slučaj u Savskom delu sliva koji pripada Republici Srpskoj. Stoga, budući da se kvantitet podzemnih voda u Republici Srpskoj osmatra na vrlo niskom nivou, a da se kvalitet praktično i ne osmatra, predložena je lista karstnih vrela (tabela 9.15; sl. 9.11) u Savskom delu sliva Republike Srpske koja bi trebalo da uđu monitoring mrežu karstnih podzemnih voda.

Tabela 9.15. Predlog karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda u slivu Save u Federaciji Bosne i Hercegovine (FBiH) (prema PUVR sliva Save u FBiH, 2021) i Republici Srpskoj (RS)

Broj	Naziv	Entitet	Broj	Naziv	Entitet	Broj	Naziv	Entitet
1	Klokot	FBiH	13	Tocila	FBiH	25	Subunar	RS
2	Crno vrelo	FBiH	14	Požarna	FBiH	26	Krupa	RS
3	Krušnica	FBiH	15	Vrelo Bosne	FBiH	27	Ugarska vrela	RS
4	Sanica	FBiH	16	Krupa	FBiH	28	Janj	RS
5	Zdena	FBiH	17	Moščanica	FBiH	29	Krupac	RS
6	Dabar	FBiH	18	Orlja	FBiH	30	Kanjon Bistrica	RS
7	Korčanica	FBiH	19	Suha	FBiH	31	Banja Stijena	RS
8	Plava voda	FBiH	20	Studešnica	FBiH	32	Bereg	RS
9	Kruščica	FBiH	21	Sana	RS	33	Bioštica	RS
10	Bistrica	FBiH	22	Pliva	RS	34	Žepa	RS
11	Krupa	FBiH	23	Kozica	RS	35	Studeni Jadar	RS
12	Okašnica	FBiH	24	Ribnik	RS			



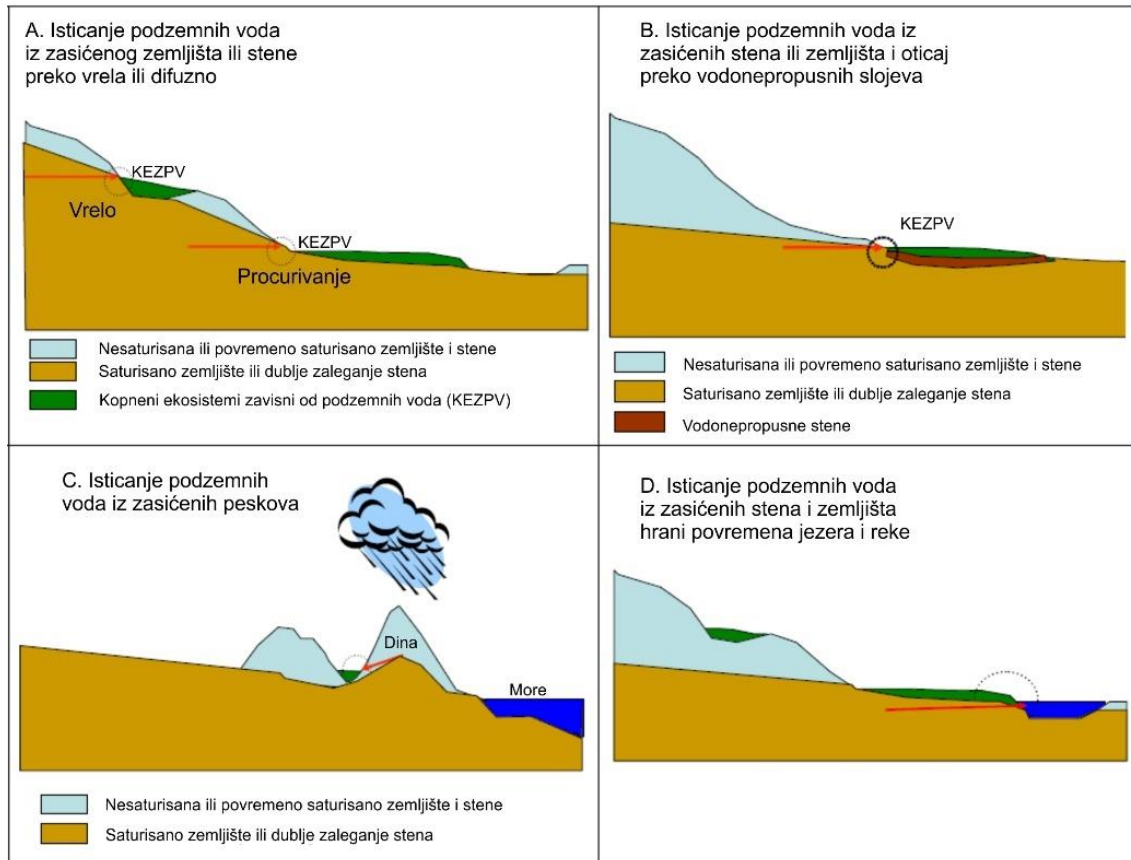
Sl. 9.11. Prostorni raspored predloženih karstnih vrela za monitoring karstnih podzemnih voda u Savskom delu sliva Federacije BiH (prema PUVR sliva Save u FBiH, 2021) i Republike Srpske; (brojevi korespondiraju sa tabelom 9.15)

9.4 Ekosistemi i zaštićena područja zavisna od karstnih podzemnih voda – definicija, mogućnosti, potrebe i ograničenja

U dvadesetom veku, kao periodu intenzivnog tehničkog progressa i porasta broja svetske populacije, dolazi do povećanja potreba za pijaćom vodom, tako da je akcenat bio na iskorišćavanju vodnih resursa, ne vodeći računa o ekološkim zahtevima i životnoj sredini. Međutim, poslednjih decenija 20. veka i pogotovo početkom 21. veka, fokus se sve više stavlja na zaštitu životne sredine i racionalno korišćenje raspoloživih vodnih resursa u skladu sa konceptom održivog razvoja za buduće generacije. Savremeni koncept upravljanja podzemnim vodnim resursima podrazumeva tretiranje podzemne vode zavisno od toga da li se ona koristi za određene potrebe ili ne. To znači da ako se podzemna voda koristi za potrebe vodosnabdevanja, industrije ili navodnjavanja, obavezno se moraju uzeti u obzir i faktori životne sredine koji su direktno ili indirektno zavisni od podzemnih voda.

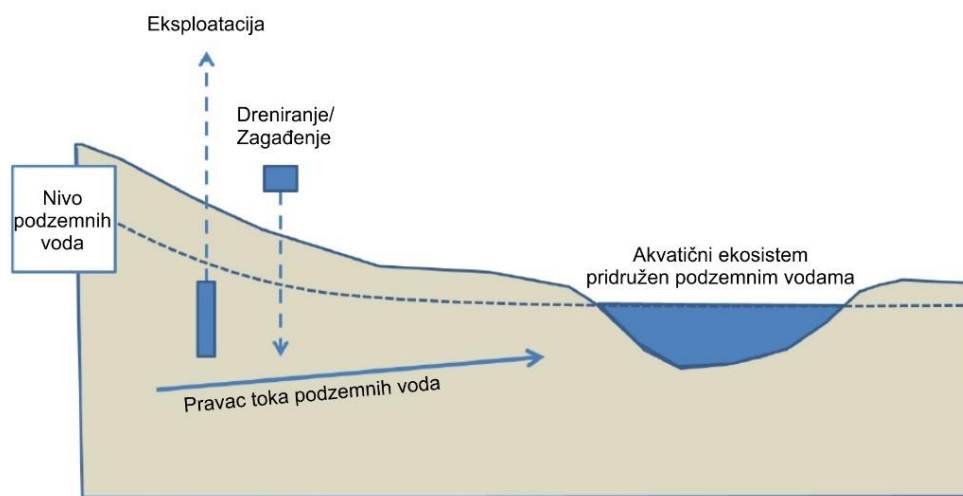
Pomenuto je sadržano i u ODV Evropske unije, gde se navodi da podzemne vode ne mogu imati dobar kvalitativni ili kvantitativni status, ukoliko koncentracija određenih elemenata ili nivo podzemnih voda imaju negativne posledice po ekosisteme koji su direktno ili indirektno zavisni od podzemnih voda. S tim u vezi, uveden je termin *kopneni ekosistemi zavisni od podzemnih voda* (engl. *Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*) koji podrazumevaju ekosisteme čije funkcionisanje direktno zavisi od podzemnih voda. Drugim rečima, podzemna voda iz vodnog tela podzemnih voda kome je pridružen zavisni ekosistem, obezbeđuje dovoljnu količinu vode (u smislu protoka ili nivoa) ili potreban kvalitet voda tokom cele godine ili određenog dela godine, da bi se ekosistem održao (Schutten et al. 2011). Pomenuti zavisni ekosistem podrazumeva zajedničko postojanje biljaka, životinja i drugih organizama čiji je opstanak direktno zavistan od dobrog statusa podzemnih voda. Schutten et al. (2011) navode 4 tipske situacije gde je podzemna voda neophodna za funkcionisanje zavisnih ekosistema (Sl. 9.12):

- *Izvorište podzemnih voda direktno navodnjava ekosisteme u vidu izvora ili procurivanja.* Kao primer može se uzeti izvor koji prihranjuje vodom kopneni ekosistem, gde se povišena koncentracija kalcijuma iz podzemne vode luči u vidu bigra u okviru površinskih ekosistema. Sa druge strane, jezera ili rečni sistemi koji se prihranjuju vodom iz izvora, ne mogu se svrstati u kopnene ekosisteme, već u akvatične;
- *Podzemne vode koje se skupljaju iznad nepropusnih sedimenata, kao što su gline, u površinskim depresijama.* Ovi kopneni ekosistemi mogu biti okarakterisani kao močvare, dok je njihova flora direktno pod uticajem hemijskih karakteristika voda koje ju prihranjuju. Ova područja se razlikuju od kopnenih ekosistema koji su suštinski zavisni od površinskih voda (kao što je slučaj sa većinom močvara) ili padavina;
- *Visoki nivoi podzemnih voda koji održavaju stanje sezonskog zasićenja vodom.* Podzemne vode u peščanim dinama ispuštaju se u takozvane „vlažne jame“. Hemijski sastav tih podzemnih voda je rezultat njene interakcije sa peščanim dinama, dok je osciliranje nivoa PV ključno za ekološko funkcionisanje ovih kopnenih ekosistema;
- *Sezonske fluktuacije nivoa podzemnih voda povremeno plave depresije.* Rezultat ovog procesa su jezera, koja se javljaju sezonski i imaju karakterističnu floru koja je direktno povezana za njihovim ekološkim ili socio-ekonomskim značajem.



Sl. 9.12. Konceptualni modeli 4 različite situacije postojanje kopnenih ekosistema zavisnih od podzemnih voda (Schutten et al. 2011)

Pored kopnenih ekosistema zavisnih od podzemnih voda, postoje i *akvatični ekosistemi*, takođe direktno zavisni od podzemnih voda (engl. *Groundwater Associated Aquatic Ecosystems*). Ova područja predstavljaju ekosisteme koji se nalazi u jednom ili više vodnih tela površinskih voda (reke, jezera, tranziciona ili obalska vodna tela), na čiji bi status (ekološki ili hemijski) ili ekološke ciljeve mogle uticati promene nivoa podzemnih voda ili koncentracije zagađivača koje se prenose podzemnim vodama (Sl. 9.13).



Sl. 9.13. Konceptualni model akvatičnog ekosistema pridruženog podzemnim vodama sa prikazanim vezama sa vodnim telom podzemnih voda i pritiscima na podzemne vode (Hinsby et al. 2015)

Najznačajniji akvatični ekosistemi zavisni od podzemnih voda su stalna ili povremena jezera, stalni ili povremeni rečni tokovi, posebno oni tokovi sa izraženim baznim oticajem na račun podzemnih voda. Pripadnost određenog akvatičnog ili kopnenog ekosistema konkretnim podzemnim vodama može se odrediti na nekoliko načina, pre svega zavisno od informacija kojima se raspolaže.

Polazna tačka pri definisanju zavisnosti ekosistema jeste uvid u informacione sisteme zemalja članica Evropske unije koje su bile u obavezi da lociraju sve akvatične i kopnene ekosisteme zavisne od podzemnih voda u skladu sa Direktivom o očuvanju prirodnih staništa i divlje faune i flore²¹, poznatijom kao *Habitats* Direktiva i platformom NATURA 2000²². Ukoliko podaci o konkretnom ekosistemu nisu dostupni na ovaj način, onda je potrebno formirati konceptualni model, odnosno principe modeliranja, uspostaviti monitoring, a kao krajnju metodu koristiti ekspertsku procenu lokalnih stručnjaka, najviše zbog određene subjektivnosti. Takođe, istovremeno se postavlja pitanje: kako definisati potrebe zavisnog akvatičnog ili kopnenog ekosistema? Odgovor na njega i dalje intrigira naučnu i stručnu javnost, budući da je jako teško održavati potreban kvalitet i kvantitet podzemnih voda za ove potrebe. Iz tih razloga predlaže se uvođenje tzv. graničnih vrednosti (engl. *threshold values*) za kvalitativne karakteristike podzemnih voda, koje će biti reperne veličine za prirodnu koncentraciju određenih hemijskih elemenata u podzemnim vodama. S obzirom na to da se ne mogu doneti uniformne granične vrednosti na nivou EU, svaka država članica (kao i države koje su u procesu pregovaranja o članstvu) je u obavezi da ih donese za svoje konkretne uslove na terenu, što je malo država do sada uradilo, dok je u našoj zemlji u planu da se u skorijoj budućnosti implementira ova preporuka Evropske komisije.

Sa aspekta kvantitativnih potreba akvatičnih i kopnenih ekosistema, neophodno je obezbediti onu zapreminu i nivo podzemnih voda koji je neophodan za nesmetano funkcionisanje ekosistema. To takođe nije lak zadatak i može se izvršiti neposrednim monitoringom kvantiteta podzemnih voda, odnosno modeliranjem i bilansiranjem podzemnih voda. Ovaj zadatak posebno je komplikovan u karstnim terenima, budući da kvantitet karstnih podzemnih voda može oscilirati i na dnevnom nivou. Dosadašnja praksa je sugerisala da se pri definisanju količina voda koje se mogu nesmetano eksploatisati, za potrebe ekološkog protoka koristi 10% od prosečne godišnje vrednosti isticanja karstnog vrela, što je preuzeto iz potreba pri projektovanju površinskih akumulacija i brana. Međutim, sve je aktuelnije da se za bezbedni ekološki protok mora ostaviti minimalna vrednost izdašnosti karstnog vrela, budući da ceo ekosistem opstaje pri tim minimalnim vrednostima, a da bi smanjenje protoka imalo negativni uticaj na njih. Pomenuto se može pokazati na primeru karstnih vrela kod kojih koeficijent hidrauličke neravnomernosti nije veliki, tj. kod kojih nema ogromnih razlika između minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja. Tako, ako npr. postoji vrelo sa $Q_{\min}:Q_{sr}:Q_{\max} = 10:50:100$ l/s, prema definiciji bi trebalo ostaviti samo 5 l/s kao bezbedni ekološki protok, budući da je toliko 10% srednjegodišnje izdašnosti. Međutim, smatra se da bi to imalo negativni uticaj na pridružene ekosisteme, te se stoga preporučuje da je bolje ostaviti celokupnu vrednosti prirodnih minimalnih količina voda od 10 l/s (u navedenom primeru), koja zasigurno održava ekološke zahteve. Ista vrednost od 10 l/s se dobija i ukoliko se bezbedni ekološki protok izrazi kao *ekološki optimum* u vidu 20% od vrednosti isticanja vrela koje se javlja u 50% vremena (Q_{50}), dakle 20% od 50 l/s.

²¹ Evropska komisija, 1992: Council Directive on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora; Official Journal of the European Communities (92/43/EEC)

²² Evropska komisija, 2011: Commission Implementing Decision of 11 July 2011 concerning a site information format for Natura 2000 sites; Official Journal of the European Communities (2011/484/EU)

Stevanović et al. (2022b) navode iskustva iz Hrvatske i Bosne i Hercegovine u vezi sa determinacijom ekološkog protoka, tj. kvantifikacijom ovog parametra. Tako, određivanje ekološkog protoka može se izvršiti primenom tri kriterijuma (Stevanović et al. 2022b):

1. Ekološki protok je na nivou minimalnih srednjemesečnih vrednosti na nivou 95%-ne verovatnoće pojave;
2. Ekološki protok određen u zavisnosti od proticaja toka i oblika rečnog korita:
 - a. Za reku sa ekstremno strmim rečnim obalama primenjuju se jednačine Matthey-a (Mišetić & Pavlin, 2004):

$$\text{Za reke sa } Q_{sr} < 5 \text{ m}^3/\text{s} \left\{ \begin{array}{l} Q_E = \frac{15 \cdot Q_{300}}{(\ln Q_{300})^2} \geq 50 \left(\frac{l}{s}\right) \\ Q_E = \frac{15 \cdot Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2} \left(\frac{l}{s}\right) \\ Q_E = 0.35 \cdot Q_{347} \left(\frac{l}{s}\right) \end{array} \right.$$

$$\text{Za reke sa } Q_{sr} > 5 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_E = 0.25 \cdot Q_{347} + 75 \left(\frac{l}{s}\right)$$

- b. Za reku sa srednje strmim ili razuđenim obalama primenjuje se kriterijum osrednjavanja apsolutnih godišnjih minimuma tokom razmatranog perioda.
3. Ekološki protok određen na osnovu jednačine (Bonacci, 2003; Stevanović, 2022b):

$$Q_E = 0.2 \cdot Q_{80}$$

Pravilnik o određivanju ekološkog protoka u Bosni i Hercegovini (Sl. novine FBiH, 70/06) predviđa definisanje ovog parametra na dva nivoa:

- Prvi nivo - Generalna ocena ekološkog protoka za sva vodna tela na osnovu hidroloških metoda koje uključuju srednji minimalni protok, srednji protok i srednji dekadni protok površinskog toka;
- Drugi nivo - Posebna procena ekološkog protoka za vodna tela u zaštićenim područjima.

Kao jedan od primera redukovanja količine eksploatacije podzemnih voda za potrebe vodosnabdevanja može se navesti slučaj iz Švajcarske. Naime, izdan koja snabdeva oko 40% stanovništva pijaćom vodom grada Berna u Švajcarskoj ima pridružen akvatični ekosistem – reku Eme. Budući da je reci Eme bio ugrožen opstanak, odnosno njeni ekološki uslovi usled eksploatacije podzemnih voda i klimatskih promena (najviše letnjih suša), 2003. godine je moralo da se redukuje korišćenje podzemnih voda, upravo da bi se obezbedio neophodan bezbedni ekološki protok i dobar ekološki status reke. Projekcija je da će biti neophodno nastaviti sa redukovanom eksploatacijom podzemnih voda i u narednom periodu, pre svega zbog dužih i sušnijih leta koja su predviđena postojećim klimatskim modelima (Hunkeler et al. 2015; Hinsby et al. 2015).

S obzirom na to da su ekosistemi zavisni od podzemnih voda podložni bilo kojoj prirodnoj ili veštačkoj promeni u funkcionisanju hidrogeoloških sistema, Ansems et al. (2014) predlažu nekoliko mera koje je neophodno preduzeti u cilju zaštite akvatičnih i kopnenih ekosistema zavisnih od podzemnih voda:

- Redukovanje količina vode koja pripada području sa velikim potrebama za pijaćom vodom;
- Lociranje potencijalnih tačaka na kojima se mogu eksploatirati podzemne vode i pošumljavanje u područjima gde to ne redukuju nivo podzemnih voda do potrebnog obima;
- Ocena uticaja lateralnog navlačenja voda do postojećih bunara u okolini postojećih ekosistema;
- Uspostavljanje zaštitnih zona oko ekosistema u cilju zaštite njegovog kvaliteta i kvantiteta;
- Regulisanje količine eksploatacije podzemnih voda restriktivnom eksploatacijom tokom kritičnih perioda.

9.5 Predlog programa mera za održivo korišćenje karstnih podzemnih voda

Prihvatanjem koncepta Okvirne direktive o vodama Evropske unije, zemlje u regionu su se obavezale na uspostavljanje ciljeva održivog razvoja vodnih resursa primenom programa mera za njihovo dostizanje. Iz tih razloga, sve one su svoje aktuelne zakone o vodama donele u skladu sa Direktivom, koja je integrisana u sve zakonske akte i strategije koje se tiču vodnih resursa. Direktivom su precizno utvrđene sve mere koje je neophodno preduzeti da bi se postigli ciljevi koje Evropska unija predlaže po pitanju očuvanja površinskih i podzemnih vodnih resursa. Ti ciljevi su sadržani u očuvanju dobrog statusa podzemnih voda, sprečavanju pogoršavanja njihovog statusa, očuvanju kopnenih i akvatičnih ekosistema, preduzimanju mera za smanjenje emisije zagađujućih materija koje potiču od svih tačkastih i difuznih zagađivača i dr.

Osnovne mere su sadržane u Aneksu VI Okvirne direktive o vodama EU (Deo A i B), koje se pre svega odnose na uspostavljanje optimalnih kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda, odnosno za postizanje dobrog statusa koji je ODV postavila kao cilj. Tako, sa aspekta kvantiteta neophodno je urediti proces izdavanja vodnih dozvola i koncesija kojima se pravnim ili fizičkim licima daje pravo na korišćenje resursa na precizno utvrđen broj godina. Ovim dokumentom se jasno ističe optimalna količina vode koja se sme eksploatirati, odnosno precizno se definiše lokacija eksploatacionog objekta, namena korišćenja, način i uslovi eksploatacije i dr. Da bi se sve navedeno jasno moglo precizirati, neophodno je uspostaviti adekvatnu kvantitativnu monitoring mrežu na osnovu koje će se dati relevantni podaci o količini resursa koji je moguće eksploatirati (Stevanović & Marinović, 2015).

Ukoliko se razmatraju karstne podzemne vode koje su lošeg kvantitativnog statusa, tj. kod kojih postoji (potencijalni) pritisak na kvantitet, treba napomenuti da mere za ostvarenje projektovanih ciljeva treba da uključe analizu i smanjenje gubitaka u sistemima vodosnabdevanja, ocenu mogućnosti aktiviranja novih izvorišta, kao i veštačkog prihranjivanja i inženjerskih mera regulacije karstnih izdani. Pored toga, neophodna su dopunska hidrogeološka istraživanja kod nedovoljno istraženih ležišta karstnih podzemnih voda, posebno opiti trasiranja podzemnih voda radi razgraničenja slivova. Takođe, trebalo bi uspostaviti obavezu izveštavanja nadležnih organa od strane svih nosioca vodoprivrednih dozvola i koncesija, u kojima bi se kontinuirano predstavljali podaci o kvantitetu podzemnih voda. Ukoliko obaveza već postoji (kao što je slučaj u Srbiji i Republici Srpskoj), treba delovati u smeru stimulacije pravnih subjekata koji gazduju izvorištem da podatke o kvantitetu dostavljaju nadležnim državnim organima, koji bi ih implementirali u vodno-informacioni sistem. Ovaj način prikupljanja podataka o kvantitetu podzemnih voda predstavlja najjeftiniji vid pogošćavanja monitoring mreža kvantiteta podzemnih voda, ne samo u karstu.

Program mera kojima bi se kvalitativne karakteristike podzemnih voda podigle na viši nivo uključivale bi kontrolu, kao i tretman ili sanaciju dve vrste zagađivača: tačkastih i difuznih. Mere koje treba preduzeti sa aspekta tačkastih zagađivača se ogledaju u tretmanu zagađujućih materija na samom izvoru zagađenja, odnosno primenom principa „zagađivač plaća”. Prvi pristup se odnosi na sva postrojenja koja ispuštaju otpadne vode. Ovakav vid potencijalnog zagađenja se može kontrolisati izdavanjem vodoprivredne dozvole kojom se precizno određuju uslovi pod kojima se otpadna voda može ispustiti, kao i inspekcijskim nadzorom nad primenom ograničenja i uslova sadržanih u dozvoli. Ti uslovi podrazumevaju maksimalno dozvoljene količine otpadnih voda koje se smeju upustiti, granične vrednosti koncentracija određenih supstanci koje se smeju naći u podzemnoj vodi, a koje sadrži otpadna voda, kao i obavezno praćenje i osmatranje kvalitativnih karakteristika podzemnih voda koje mora biti obaveza nosioca vodoprivredne dozvole i izveštavanje nadležnih agencija za zaštitu životne sredine. Ovakve dozvole se odnose na sve vrste otpadnih voda koje se mogu upustiti u podzemlje: komunalne, tehnološke vode, tehničke, oborinske vode (sa saobraćajnica, benzinskih pumpi i sl.). U skladu sa principom „zagađivač plaća”, zagađivač se obavezuje da plaća finansijsku nadoknadu za onu količinu ispuštenih otpadnih voda koja prelazi količinu propisanu vodoprivrednom dozvolom ili koncesijom (Stevanović & Marinović, 2015).

Sa druge strane, program mera za tretman difuznih zagađivača bi se u najvećoj meri odnosio na redukovanje sadržaja nitrata na poljoprivrednim obradivim površinama, tj. neophodno je preduzeti mere kojima bi se ograničio unos pesticida i aditiva koji služe za povećanje prinosa poljoprivrednih kultura. Pored poljoprivrednih površina, posebna pažnja treba biti usmerena na deponije i odlagališta otpadnog materijala, koja su veoma često na najugroženijim mestima i koji je tretiran na neadekvatne načine. Ovakva mesta mogla bi da se efikasno eliminišu ili bar kontrolišu izgradnjom posebnih deponija čvrstog otpada na kojima bi se na precizno propisane načine odlagao sav otpadni materijal. Pored toga, smanjivanje koncentracije deponija čvrstog otpada bi se mogla izvesti i primenom selekcije i predtretmana otpada, odnosno reciklažom onih materijala koji bi se mogli ponovo iskoristiti u proizvodnom procesu.

Sumarno, mere za ostvarenje zacrtanih ciljeva, posebno za podzemne vode koja su pod (potencijalnim) kvantitativnim i/ili kvalitativnim pritiscima, treba da uključe, ali da ne budu limitirana, na:

- Uspostavljanje guste mreže monitoringa podzemnih voda, sa visokom frekvencijom osmatranja kvaliteta i kvantiteta karstnih podzemnih voda;
- Primena mera regulacije karstnih podzemnih voda u cilju amortizacije režima i obezbeđenja minimalnih protoka za vodosnabdevanje i nizvodne zavisne ekosisteme;
- Regeneracija vodovodne infrastrukture u cilju sanacije i minimiziranja gubitaka;
- Efikasna upotreba vode, definisanje i uspostavljanje tehničkih mera za navodnjavanje, industriju, energiju i domaćinstva;
- Mere politike cena vode za sprovođenje povrata troškova vodnih usluga iz domaćinstava, industrije i poljoprivrede;
- Prevenciju dalje degradacije kvaliteta podzemnih voda preventivnom zaštitom sadašnjih i potencijalnih izvorišta;
- Eliminisanje i/ili redukciju zagađivanja koja se ostvaruje unosom opasnih supstanci i nitrata u podzemne vode;
- Remedijacija kontaminiranih područja (istorijsko zagađenje uključujući sediment, podzemne vode, zemljište);
- Povećanje učešća i izgradnju novih postrojenja za preradu komunalnih i industrijskih efluenata i sprečavanje direktnog upuštanja netretiranih otpadnih voda industrije u rečne tokove i kanale, i posledično u podzemne vode;

- Povećanje broja priključaka na kanalizacione mreže u naseljima;
- Implementaciju svih mera predviđenih za poboljšanje i očuvanje kvaliteta površinskih voda, a posebno onih koje se odnose na smanjenje organskog ili zagađenja nutrijentima;
- Smanjenje korišćenja pesticida/herbicida u poljoprivrednoj proizvodnji;
- Mere za smanjenje sedimenta od erozije tla i površinskog oticaja;
- Mere za sprečavanje ili kontrolu unosa zagađenja iz urbanih i šumskih područja, transporta i izgrađene infrastrukture;
- Prilagođavanje uticaju klimatskih promena;
- Uvođenje i korišćenje najboljih dostupnih tehnika i prakse u oblasti životne sredine;
- Sistematski monitoring kvaliteta podzemnih voda na izvorištima u funkciji, proširenje mreže osmatračkih objekata kvaliteta podzemnih voda i redovno praćenje i izveštavanje o dobijenim rezultatima institucija nadležnih za kontrolu kvaliteta u skladu sa obavezama i principima koji proističu iz ODV;
- Implementaciju svih direktiva i propisa EU u oblasti voda, podzemnih voda, zaštite životne sredine i smanjenja emisije zagađenja.
- Podizanje svesti lokalnog stanovništva o značaju podzemnih vodnih resursa za vodosnabdevanje.

10 OCENA PRIMENJIVOSTI I OGRANIČENJA KORIŠĆENIH METODA

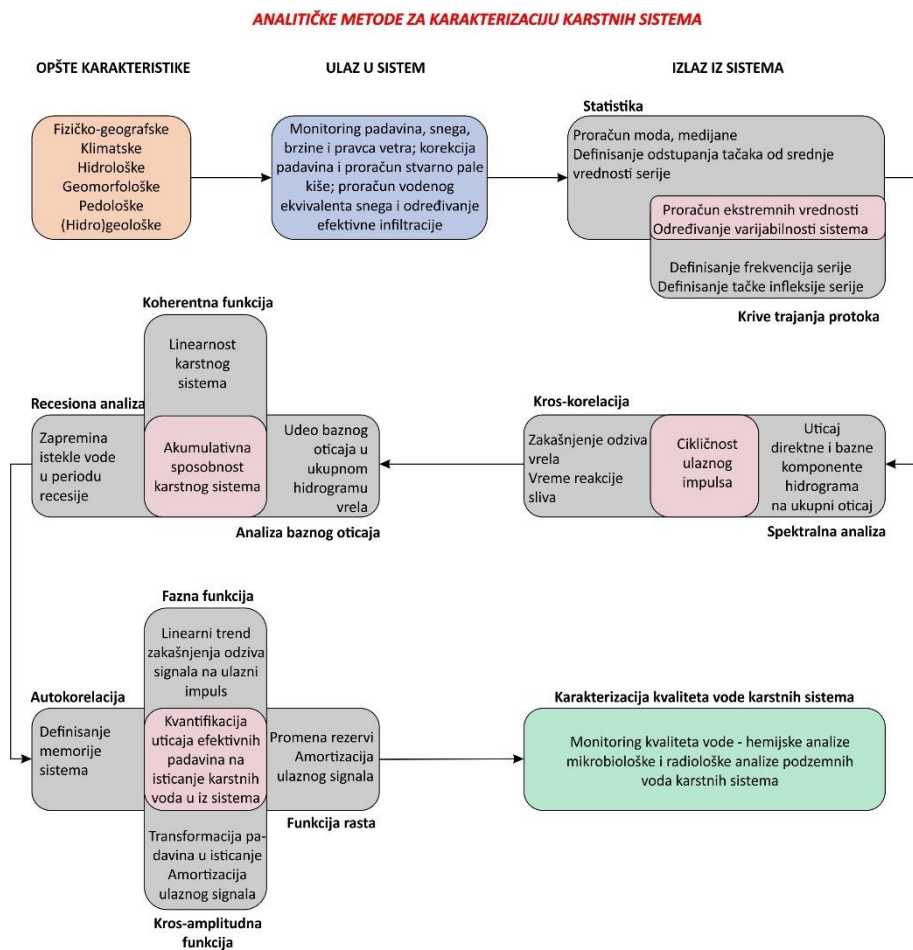
Metode istraživanja koje su korišćene pri analizi karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana bile su primenjene na lokalnom i regionalnom nivou, najviše iz razloga da se ustanovi da li odabrani karstni sistemi mogu biti reporni za regionalnu analizu karstnih podzemnih voda ovog područja, odnosno da li se na osnovu rezultata analiza može formirati generalna slika o statusu karstnih podzemnih voda dela centralnog Balkana. Pristup karakterizaciji podzemnih voda koji Okvirna direktiva o vodama predlaže ne daje smernice kako konkretno implemetirati takav postupak, pre svega jer (hidro)geološki uslovi nisu uniformni na prostoru Evropske unije, za koju je doneta ODV. Stoga, predloženi metodološki postupak može predstavljati vodič i koncept za karakterizaciju karstnih podzemnih voda i ocenu kvantitativnih i kvalitativnih pritisaka kada postoji dovoljni fond podataka režima. Ipak, primena ovakvih metoda je više orijentisana ka naučnom, nego vodoprivrednom aspektu, te je stoga teško očekivati da se sve korišćene metode primene u praksi pri definisanju karakteristika i statusa karstnih podzemnih voda. Međutim, neke od njih je relativno jednostavno primeniti, a mogu dati pouzdane podatke neophodne za dalje analize i predloge upravljanja vodnim resursima u konkretnim uslovima.

Pri karakterizaciji podzemnih voda odabranih karstnih sistema za potrebe doktorske disertacije korišćene su analitičke metode čiji domeni se donekle poklapaju (Sl. 10.1). Primena različitih metoda koje daju iste rezultate omogućila je njihovu komparaciju, ali i potvrdu polaznih hipoteza o konkretnom karstnom sistemu. Glavna prednost primenjenih metoda ogleda se u tome što se analizom dobijenih dijagrama može objasniti hidraulički mehanizam funkcionisanja odabranog karstnog sistema, odnosno moguće je „ući“ u unutrašnjost sistema i izvoditi zaključke u njegovom funkcionisanju u različitim hidrološkim stanjima, bilo da se radi o kvantitetu ili kvalitetu. Na taj način je moguće definisati ponašanje karstnog sistema u uslovima velikih voda, kada se definiše reakcija sistema na intenzivne kišne epizode u smislu da li se veći deo zapremine novoinfiltrirane vode akumulira u sistemu ili se brzo transportuje do vrela. Sa druge strane, može se pratiti i ponašanje sistema u periodima malih voda, tj. tokom recesije, kada prihranjivanje izostaje, a na vrele teorijski ističe samo bazni oticaj, tj. pražnjenje prethodno akumuliranih voda u dubljim delovima izdani. U tim vremenskim intervalima, jasno se mogu izvući zaključci o retencionim sposobnostima sistema, budući da u recesionom periodu najveći deo vode koji ističe je akumuliran tokom perioda velikih i srednjih voda. Ocena hidrauličkog ponašanja karstnog sistema u periodima velikih, srednjih i malih voda predstavlja direktan indikator kada treba primeniti mere regulacije karstnih izdani, kako bi se sva raspoloživa podzemna voda mogla kontinuirano koristiti tokom godine za različite potrebe. To znači da pravilna identifikacija pikova isticanja usmerava pravac istraživanja i pravilno idejno rešenje i projektovanje regulacionih mera u zoni isticanja i/ili zoni slivnog područja, kako bi se maksimalne količine voda deponovale za kasnije korišćenje u recesionim uslovima.

Sa druge strane, ocena kvalitativnih karakteristika u smislu definisanja onih hemijskih parametara koji prelaze maksimalno dozvoljene koncentracije direktno ukazuju na problem sa kojim se karstne podzemne vode suočavaju sa aspekta kvaliteta. Na taj način, moguće je direktno reagovati i neutralisati izvore zagađenja, ili ih pak minimizirati.

Sve pomenute metode, prikazane na dijagramu 10.1 mogu dati odgovore na brojne nepoznanice o funkcionisanju i eventualnim problemima karstnih hidrogeoloških sistema samo u slučaju postojanja relevantnih i pouzdanih ulaznih podataka. To znači da za pravilnu karakterizaciju kvantitativne komponente karstnih sistema neophodno je raspolagati dugim nizom osmatranja količina vode koje isteknu prirodno i koje se zahvataju (ako je vrelo kaptirano), ali tako da frekvencija osmatranja bude visoka. To je posebno važno u dinamičnom sistemu kakav je karst, budući da osmatranja na 10-odnevnom, pa čak i na dnevnom nivou mogu dati pogrešnu sliku o

minimalnim i maksimalnim vrednostima isticanja (Stevanović & Maran Stevanović, 2021). Stoga, uspostavljanje monitoringa kvantiteta karstnih podzemnih voda koji će dati podatke visoke rezolucije (najbolje na časovnom nivou) o izdašnosti vrela predstavljaju osnov i neophodnost za primenu gorepomenutih metodoloških postupaka. Na osnovu pouzdanih podataka o kvantitetu podzemnih voda, ocenu eksploatacionih rezervi je pouzdanije oceniti na osnovu medijalne vrednosti, tj. izdašnosti vrela koja se javlja u 50% osmatračkog perioda (tzv. vrednost Q_{50}), nego aritmetičkom sredinom ekstremnog maksimuma i minimuma. Za tako nešto je neophodno raspolagati dugom vremenskom serijom kvantitativnih podataka, za šta je opet neophodna monitoring mreža.



Sl. 10.1. Analitičke metode za karakterizaciju podzemnih voda karstnih hidrogeoloških sistema. Crvenom bojom su označeni preklapajući domeni primenjenih metoda

Identična stvar javlja se i kod ocene kvalitativnih pritisaka. Postojanjem monitoring mreže kvaliteta karstnih podzemnih voda, pritisci na kvalitet mogu biti ocenjeni komparacijom rezultata hemijskih analiza sa referentnim standardima prirodnog kvaliteta voda. S obzirom na obično postojan kvalitet karstnih podzemnih voda u vremenu, frekvencija osmatranja može biti reda nego što je slučaj kod kvaliteta, tako da postavljanjem automatskih mernih uređaja za praćenje kvaliteta mogu se relativno jednostavno dobiti kvalitetni podaci visoke rezolucije. U nedostatku pouzdanih podataka o hemijskim karakteristikama karstnih podzemnih voda, kreiranje karata ranjivosti, hazarda i rizika na zagađivače može dati preliminarnu ocenu pritisaka na kvalitet i fokusirati dalja istraživanja. U sklopu doktorske disertacije, primenjena su oba načina definisanja pritisaka – i na osnovu hemijskih analiza i na osnovu gorepomenutih karata. Rezultati su pokazali da karte ranjivosti, hazarda i rizika mogu dati relativno pouzdanu

ocenu pritisaka na kvalitet, koje su u ovom radu potvrđene i konkretnim podacima hemijskih analiza. Međutim, hemijske analize i direktno praćenje promena kvalitativnog režima podzemnih voda u karstu daleko su pouzdanije iz razloga što u sebe uključuju i vremensku komponentu. Stoga, još jednom je potrebno apostrofirati neophodnost uspostavljanja monitoring mreže kvantiteta i kvaliteta karstnih podzemnih voda kao osnov svih hidrogeoloških analiza.

Funkcija monitoringa podzemnih voda, pogotovo sa aspekta kvaliteta neophodna je za formiranje prirodnih kritičnih vrednosti (engl. *threshold values*) kako bi se još preciznije identifikovali pritisci na kvalitet, odnosno kako bi se ustanovili prirodni i antropogeni uzročnici pogoršanja kvaliteta podzemnih voda. S obzirom na to da još uvek nisu donete kritične vrednosti na prostoru Srbije, Crne Gore i Bosne i Hercegovine, trenutni fond podataka ne omogućava identifikaciju ovih vrednosti. Uspostavljanje ovih standarda takođe iziskuje formiranje osmatračke mreže kvaliteta podzemnih voda sa vrlo visokom frekvencijom osmatranja, dok se pri definisanju kritičnih vrednosti moraju uzeti u obzir i geogenetski faktori formiranja hemijskog sastava podzemnih voda (Stevanović et al. 2020b).

U cilju brzog reagovanja na bilo kakve promene kod ulaznih signala karstnih sistema, implementacija sistema ranog upozorenja (engl. *early warning system*) pomaže pri instantnom uočavanju reakcije karstnog sistema na promene hemijskih karakteristika podzemnih voda. Ovakav sistem je posebno važan imajući u vidu da karstni sistem ima sposobnost promptne reakcije na ulazni signal, odnosno jako kratkog perioda transfera ulaznog u izlazni signal. Sistem ranog upozorenja zasniva se na *in situ* merenjima kvalitativnih parametara, transferu podataka u realnom vremenu i dostupnosti podataka preko *online* formi, tj. *online* informacionih sistema. Stadler et al. (2010, 2012) navode da je ovim sistemom moguće pratiti događaje u sistemu izazvane kišnim epizodama pomoću satelitski umreženih stanica za merenja i uzorkovanja podzemnih voda. Takođe, pouzdani podaci se dobijaju kombinovanjem *in situ* merenja i analizom mikrobioloških fekalnih indikatora zagađenja u laboratorijskim uslovima (Stadler et al. 2008, 2010). Sistem ranog upozorenja najčešće se organizuje na lokalnom nivou, sa gušćom mrežom tačaka na kojima se osmatraju određeni parametri. Takođe, u okviru sistema ranog upozorenja, frekvencija uzorkovanja i merenja je češća nego što je slučaj kod klasičnih monitoring mreža podzemnih voda, tako da ovaj sistem najčešće uzorkuje podzemne vode na nivou sata ili čak minuta, ukoliko je potrebno.

Činjenica da monitoring podzemnih voda u karstu na prostoru dela centralnog Balkana nije na zadovoljavajućem nivou, može direktno uticati na stvaranje pogrešne slike o hidrogeološkim karakteristikama pojedinih karstnih sistema. To se najbolje može videti na primeru karstnih sistema vrela Mlave, Oka Bijele i Rijeke Crnojevića, kod kojih je kalibracija efektivne infiltracije, deficita zemljišne vlage i površine sliva sa dreniranjem podzemnih voda iz sistema ukazivao na dosta manju površinu sliva, nego što je realno slučaj. Razlog za takvo nešto je odsustvo podataka o dreniranju pomenutih karstnih sistema u vidu površinskog i podzemnog oticaja, što je očigledno na terenu. Stoga, kada bi se osmatralo celokupno dreniranje podzemnih voda, kalibracija pomenutih parametara sa isticanjem podzemnih voda dala bi dosta realnije podatke.

Nedostatak monitoring mreže podzemnih voda uslovio je primenu metode analogije izučenih sa neizučenim terenima, odnosno transfer rezultata sa karstnih terena gde postoje podaci na terene na kome se ne raspolaže podacima o hidrogeološkim karakteristikama terena. Primer kako se rezultati mogu preneti sa poznatog na (relativno) nepoznati karstni teren pokazan je u okviru karstnih sistema vrela Rijeke Crnojevića i vrulje Bolje Sestre. Rezultati primene regresione jednačine formirane za simulaciju isticanja vrela Rijeke Crnojevića na vrelo Bolje Sestre dalo je određene vrlo zanimljive rezultate, iako je koeficijent korelacije simuliranih i merenih podataka relativno slab. Simulacija je pokazala potencijalni uzrok opadanja kapaciteta

izvorišta Bolje Sestre, što je direktno ukazalo na neophodnost detaljnih hidrogeoloških istraživanja ovog karstnog terena i svakako uspostavljanje monitoring mreže. Na ovom primeru je pokazano da kros-regresioni modeli, koji na osnovu padavina predviđaju vrednosti isticanja podzemnih voda mogu biti preneti sa izučenih na neizučene terene u neposrednoj blizini, imajući u vidu očekivane slične klimatske i hidrogeološke karakteristike, kao što je primenjeno i na u slučaju transfera stohastičkog modela isticanja podzemnih voda vrela Mlave na vrela Pirotske kotline (Ristić Vakanjac, 2012).

Primenjivost navedenih metoda istraživanja ograničava se na lokalnu razmeru, tj. na pojedinačne karstne sisteme ili vodna tela karstnih podzemnih voda, dok se na regionalnom nivou metode moraju pojednostaviti. Osim ocene kvantiteta i kvaliteta karstnih podzemnih voda, primenjeni metodološki postupci mogu biti iskorišćeni i za druge analize u okviru karstnih hidrogeoloških sistema, kao npr. za predviđanje uticaja klimatskih promena na karstne podzemne vode. U tome pre svega imaju ulogu stohastički modeli kvantiteta, koji su na primerima vrela Bosne i Rijeke Crnojevića vrlo uspešno pokazali da se mogu koristiti za simulaciju isticanja podzemnih voda. Tako, ovi modeli mogu kao ulazne podatke koristiti redukovane kišne i snežne padavina prema odabranom klimatskom modelu, a samim tim i redukovanu efektivnu infiltraciju, te bi na osnovu takvih ulaznih parametara bile kreirane sintetičke vremenske serije isticanja podzemnih voda npr. do kraja 21. veka, na osnovu kojih bi se ocenjivao uticaj klimatskih promena na podzemne vode u budućnosti. Takav pristup može dati veoma korisne informacije o očekivanim minimalnim i maksimalnim vrednostima isticanja podzemnih voda u budućem periodu, što je posebno važno sa aspekta menadžmenta podzemnih vodnih resursa i njihovog korišćenja u budućnosti. U tu svrhu mogu biti iskorišćeni i logistički regresioni modeli, na osnovu kojih bi se mogla predvideti verovatnoća pojave ekstremnih minimuma ili maksimuma podzemnih voda u odnosu na redukovane ulazne parametre, sračunate prema odabranom klimatskom modelu.

11 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Upravljanje vodnim resursima na racionalan i održiv način predstavlja prioritet čovečanstva, budući da je 21. vek proglašen vekom vode, najviše iz razloga potencijalnih nestašica pijaće vode u određenim svetskim područjima. Budući da se skoro 50% svetske populacije snabdeva pijaćom vodom preko eksploatacije podzemnih voda, korektna evaluacija kvantiteta i kvaliteta podzemnih voda predstavlja osnov svake analize režima ovog resursa, kako bi se isti racionalno mogao koristiti za različite potrebe.

Precizno definisanje i razgraničavanje pojmova koji se koriste u hidrogeologiji karsta dalo je uvid u aktuelno stanje naučne i stručne nomenklature ove oblasti, ali i ukazalo na vrlo često nesvesno pogrešno tumačenje određenih pojmova. Relacioni dijagram prikazan u okviru poglavlja 2.2, koji pokazuje povezanost termina sa naučnog i vodoprivrednog aspekta, ukazao je na to da različit pristup istraživanjima, može dovesti i do različitog poimanja istog termina. Imajući u vidu svrhu i cilj istraživanja ove disertacije, na osnovu detaljne analize predloženo je korišćenje pojma *karstni hidrogeološki sistem*, najviše zbog toga što u sebi osim karstnih kanala (provodnika i kolektora) različitih dimenzija, matriksa stenske mase i epikarstne zone (ako postoji), uključuje i fizičke procese transformacije ulaza (padavina u vidu kiše i snega, pre svega) u izlaz (isticanje podzemnih voda) sistema. Time je omogućeno posmatranje odabranih karstnih sistema kao celine, sa mogućnošću analize transformacionih procesa koji se dešavaju unutar njega, što je i učinjeno u poglavljima koja se bave konceptualizacijom i karakterizacijom karstnih sistema.

Inicijalni korak u sklopu karakterizacije karstnih sistema je analiza osnovnih fizičko-geografskih, klimatskih, hidroloških i hidrografskih, geomorfoloških, pedoloških, geoloških i hidrogeoloških karakteristika odabranih sistema. Budući da su odabrana 4 karstna sistema u Srbiji, 2 u Crnoj Gori i 1 u Savskom slivu Bosne i Hercegovine, na više nivoa se mogu istaći njihove razlike. Pet sistema se nalaze u Dinaridima (Perućac, Seljašnica, Oko Bijeje, Rijeka Crnojevića i Vrelo Bosne), dok su karstni sistemi vrela Mlave i Mokre u okviru Karpatobalkanida Srbije. Svi navedeni sistemi pripadaju Dunavskom slivu, dok samo Rijeka Crnojevića pripada Jadranskom slivu. Godišnje sume padavina koje su izmerene na pripadajućim klimatološkim stanicama variraju od 643,3 mm (Niš) do 3132,2 mm (Cetinje), što direktno ukazuje na potencijalnost ulaznog parametra u sistem. Takođe, Niš se odlikuje znatno manjim snežnim pokrivačem, nego što je slučaj sa stanicom Žabljak. Prema geološkim i hidrogeološkim karakteristikama važno je napomenuti dominaciju karbonata u vidu krečnjaka pre svega, a zatim i dolomita konkretno u sistemu Rijeke Crnojevića i delimično vrelu Bosne. Vrela Perućac, Seljašnica, Mokra i Rijeka Crnojevića predstavljaju tipična gravitaciona (descendentna) vrela, dok su vrela Mlave i Bosne vrela uzlaznog (ascendentnog) karaktera. Vrelo Oko Bijeje je gravitacionog tipa, iako je prvobitna pretpostavka bila da je reč o uzlaznom vrelu, imajući u vidu levkasti, zajezereni izgled vrela, koji je ukazivao na postojanje sifonskog kanala.

Karakterizacija podzemnih voda karstnih sistema obuhvatila je definisanje njihovih kvantitativnih i kvalitativnih osobina u periodu osmatranja od 1.10.2015. do 30.9.2020. godine, osim u slučaju vrela Bosne koje je analizirano za period 1.10.2015 – 30.9.2018. godine, usled nedostupnosti podataka za 2019. i 2020. godinu. Hidrološke godine su razmatrane umesto kalendarskih, iz razloga što snežne padavine koje padnu tokom novembra i decembra, otope se i infiltriraju u sistem tek na proleće naredne godine, tako da u slučaju analize kalendarskih godina, prihranjivanje ne bi bilo evaluirano pravilno. Kao inicijalni korak izvršena je korekcija izmerenih padavina u stvarno prispele, odnosno pretvaranje snega u vodeni ekvivalent. To je posebno važno za visoko planinske regione Durmitora, Bjelašnice, Zlatibora, Crnog vrha i Babina (tj. Sjenice), koje se odlikuju znatnim snežnim pokrivačem. Na svim stanicama

korigovane padavine su značajno veće od izmerenih, što ukazuje zapravo na veće vrednosti ulaznog parametra u sistem, čime se postiže i preciznija delineacija slivne površine. Takođe, potvrđen je i značaj razmatranja snežnog pokrivača pri proračunu efektivne infiltracije i prihranjivanja karstnih podzemnih voda, pogotovo na lokacijama sa dosta snega.

Statistička analiza vremenskih serija isticanja podzemnih voda odabranih karstnih sistema pokazala je osnovne karakteristike vrela u smislu minimalnih, maksimalnih i medijalnih vrednosti, kao i osnovnih statističkih parametara, na osnovu kojih su sistemi svrstani u klase *Nisko razvijenih* (Perućac), *Umereno razvijenih* (Mlava i Bosna), *Visoko razvijenih* (Seljašnica, Mokra i Oko Bijejele) i *Veoma visoko razvijenih sistema* (Rijeka Crnojevića). Ova klasifikacija je pokazala da su karstni sistemi uzlaznih vrela (Mlava i Bosna) po pravilu umereno razvijeni, tj. da je režim isticanja ravnomerniji nego kod silaznih vrela, što je logično imajući u vidu duboku sifonalnu cirkulaciju ovih vrela koja amortizuje nailazak velikih poplavnih talasa. Sa druge strane, karstni sistemi gravitacionih vrela (Seljašnica, Mokra, Oko Bijejele, Rijeka Crnojevića) su visoko do veoma visoko razvijeni, čime je definisana njihova interna struktura koja omogućava bržu propagaciju infiltriranih voda do vrela. Karstni sistem vrela Perućac je klasifikovan kao nisko razvijen, verovatno iz razloga što tokom osmatračkog perioda nisu zabeležene veće oscilacije između minimalnih i maksimalnih vrednosti izdašnosti vrela ($Q_{\min}:Q_{\max}=0,96:5,17 \text{ m}^3/\text{s}$).

Takođe, ustanovljeno je da medijalne vrednosti vremenske serije isticanja preciznije pokazuju srednju izdašnosti, nego aritmetička sredina, što je potvrđeno i analizom krivih trajanja podzemnih voda, koje pokazuju da vrednosti koje se javljaju u 50% vremena osmatranja (Q_{50}) korespondiraju sa medijalnom vrednošću. Analiza krivih trajanja je takođe istakla neophodnost određivanja koeficijenta varijabilnosti vrela kao odnosa Q_{10} / Q_{90} , koji dosta pouzdanije pokazuje odnos minimalnih i maksimalnih vrednosti od određivanja relacije ekstremnih vrednosti.

Analiza kvantitativnog režima vrela Mlave potvrdila je prognoze matematičkih modela za projekciju klimatskih parametara i isticanja vrela Mlave do 2100. godine. Naime, simulacioni i predikcioni modeli klime za prostor Beljanice (Stevanović et al. 2012) predvideli su smanjenje prosečne godišnje sume padavine i povećanje prosečne temperature vazduha, što se već pri analizi perioda 2015-2020. godina, koji nije ušao u inicijalni period za koji je kreiran model, pokazalo kao tačno. Takođe, predviđeno je i generalno smanjenje srednje višegodišnje vrednosti isticanja vrela, kao i veća disproporcija apsolutnih minimuma i maksimuma, što se takođe pokazalo kao tačno već pri analizi perioda 2015-2020. godina. Ipak, do kraja 21. veka ne očekuje se presušivanje vrela Mlave, ali prognoze su da bi apsolutni minimumi u ekstremnom sušnim (recesionim) periodima mogli pasti na svega 22 do 32 l/s (Ristić Vakanjac et al. 2012). Vrlo interesantna činjenica, koja takođe potvrđuje ovu pretpostavku jeste da tokom perioda osmatranja 2015-2020. godine, prilikom proračuna efektivne infiltracije tokom jula i septembra meseca svake analizirane godine, vrednost prihranjivanja sistema je bila 0 mm. Drugim rečima, prihranjivanje tokom jula i septembra u razmatranom periodu je u potpunosti odsustvovalo, dok je prosečna julska izdašnost vrela Mlave bila 942 l/s, a septembarska 481 l/s, što znači da i pri diskontinualnom dvomesečnom sušnom periodu, vrelo Mlave ne presušuje, već ima dovoljno veliki rezervoar podzemne vode koja ističe na vrelo.

Recesiona analiza izvršena je za svaku hidrološku godinu od oktobra 2015. do septembra 2020. godine i pokazala je postojanje 3 mikrorežima pražnjenja za karstne sisteme vrela Perućac, Seljašnica, Mokra, Oko Bijejele i Rijeke Crnojevića, dok su 2 mikrorežima pražnjenja karakteristična za karstne sisteme vrela Mlave i Bosne. Kao zaključak, može se reći da se karstni sistemi sa gravitacionim mehanizmom pražnjenja odlikuju postojanjem 3 mikrorežima pražnjenja u recesionom periodu, gde se prvi režim najčešće ne pokorava Majeovoj

eksponencijalnoj jednačini, već zapravo predstavlja cirkulaciju u turbulentnom režimu tečenja, odnosno tzv. β režim. Drugi mikrorežim se obično javlja u (kvazi)laminarnom režimu tečenja, dok treći mikrorežimi najduže traju i po pravilu se javljaju u laminarnom režimu tečenja, predstavljajući realni bazni oticaj koji je prethodno akumuliran u sistemu. Sa druge strane, karstni sistemi sa uzlaznim mehanizmom isticanja najčešće su aproksimirani sa dva mikrorežim pražnjenja, tako da se tokom oba mikrorežima isticanje podzemnih voda vrši u (kvazi)laminarnom režimu tečenja. Zaključak je da red veličina prvih mikrorežima pražnjenja najčešće iznosi 10^{-1} , dok se drugi i treći mikrorežimi odlikuju redom veličine 10^{-2} do 10^{-3} .

Analiza baznog oticaja pokazala je visok značaj bazne komponente hidrograma u okviru karstnih sistema vrela Perućac (90%), Seljašnice (80,7%), Mokre (84,6%), Mlave (82,3%) i Bosne (84,5%), dok je indeks baznog oticaja niži u okviru karstnih sistema vrela Oko Bijeje (58,02%) i Rijeke Crnojevića (61,9%). Naime, visok procenat baznog oticaja u formiranju hidrograma vrela Perućac, Seljašnice i Mokre kao gravitacionih vrela ukazuje na dobru internu strukturu sistema, u kojima se mogu akumulirati značajne rezerve karstnih podzemnih voda. Isti slučaj javlja se i u karstnim sistemima sa dubokom sifonalnom cirkulacijom (Mlava i Bosna), koji imaju takođe veoma visok retencioni kapacitet i mogu akumulirati značajne rezerve podzemnih voda, što je i očekivano. Sa druge strane, karstni sistemi vrela Oko Bijeje i Rijeke Crnojevića odlikuju se značajno manjim udelom baznog oticaja u ukupnom hidrogramu vrela (pogotovo sistem vrela Oko Bijeje), što ukazuje na nisku akumulativnost ovih sistema i manju mogućnost za akumulaciju podzemnih voda, što se može videti i na osnovu komparacije apsolutnih minimalnih i maksimalnih vrednosti isticanja, koje su veoma različite. Zaključak o akumulativnosti odabranih karstnih sistema dokazan je i na osnovu analize vremenskih serija efektivne infiltracije i isticanja podzemnih voda.

Autokorelaciona analiza vremenskih serija isticanja i efektivne infiltracije je pokazala dobru memoriju svih sistema, kada je reč o isticanju podzemnih voda. Naime, jasno se pokazala veza direktnog i ukupnog oticaja kod gravitacionih vrela (Perućac, Seljašnica, Mokra, Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića), budući da autokorelacione funkcije ovih serija imaju sinhroni karakter. Na osnovu toga se može zaključiti da je direktna komponenta hidrograma dominantna pri formiranju isticanja podzemnih voda ovih vrela, dok je bazna komponenta podređena. Sa druge strane, autokorelaciona funkcija vremenskih serija isticanja uzlaznih vrela (Mlava i Bosna) jasno pokazuje da je bazna komponenta isticanja dominantna i da ona formira isticanje vrela, budući da su oba autokorelograma sinhrona. Ovi rezultati se čine logičnim, budući da se kod ovih uzlaznih vrela radi o dubokoj sifonalnoj cirkulaciji koja omogućava akumulaciju značajnih rezervi podzemnih voda i amortizaciju intenzivnog prihranjivanja. Autokorelacija efektivne infiltracije kao ulaza u sistem pokazala je malu memoriju vremenske serije i njen slučajni karakter, osim u slučaju sistema Oko Bijeje, gde je memorija efektivne infiltracije izuzetno dobra, najviše iz razloga što se efektivna infiltracija ovog sistema najviše vrši u vidu otopljenog snežnog pokrivača. Nešto niži koeficijenti autokorelacije efektivne infiltracije javljaju se i na primeru vrela Bosne, u kome takođe snežne padavine imaju veoma bitnu funkciju.

Kros-korelacija je ukazala na kratko vreme reakcije svih sistema na ulazni impuls koji najčešće iznosi do 1 ili 2 dana, osim na primeru vrela Oko Bijeje i Rijeka Crnojevića, kod kojih se reakcija vrela na intenzivnu kišnu epizodu javlja nakon svega nekoliko časova. Koeficijenti kroskorelacije kod svih sistema gube statističku značajnost celokupnog sistema reda veličine 3 do 10 dana, osim u slučaju vlažne hidrološke godine sistema Oko Bijeje gde ceo sliv reaguje 23 dana, odnosno vrela Perućac gde tokom vlažne godine sliv reaguje 14 dana.

Veoma slične vrednosti dobijene su funkcijama u okviru kros-spektralne funkcije, čime je potvrđena korektnost stohastičke analize. Spektralne funkcije gustine direktne komponente hidrograma korespondiraju sa spektrom ukupnog oticaja i efektivne infiltracije kod

gravitacionih vrela, dok spektralne funkcije gustine baznog oticaja u potpunosti korespondiraju sa spektrom ukupnog oticaja uzlaznih vrela, što još jednom dokazuje dominantnu komponentu. Kros-amplitudne, koherentne i fazne funkcije potvrdile su periode uticaja direktne komponente na isticanje vrela kod svih sistema, dok je funkcija rasta potvrdila atenuacioni kapacitet svakog sistema, tj. mogućnost formiranja značajnijih rezervi podzemnih voda. Naime, kod karstnih sistema vrela Perućac, Seljašnica, Mokre, Mlave i Bosne, funkcija rasta je pokazala potpunu atenuaciju ulaznog signala i njegovu transformaciju u rezerve podzemnih voda, dok je ova funkcija na primeru vrela Oko Bijele i Rijeka Crnojevića pokazala potpuno odsustvo (Oko Bijele), odnosno vrlo slabu (Rijeka Crnojevića) atenuaciju efektivne infiltracije, što ukazuje da sistem Oka Bijele verovatno ima vrlo slabu mogućnost akumulacije rezervi podzemnih voda, dok sistem Rijeke Crnojevića ima nešto veći retencioni kapacitet. Ovde bi trebalo istaći vrlo zanimljiv rezultat kvantitativne analize karstnog sistema vrela Oko Bijele koji ukazuje na to da se radi o gravitacionom vrelu, sa verovatno najmanjim rezervoarom od svih analiziranih sistema. Naime, iako mesto isticanja ovog vrela u vidu manjeg jezera izgledom podseća na vrelo Mlave (dakle, na uzlazno vrelo sa sifonskom cirkulacijom), radi se o tipičnom gravitacionom vrelu sa veoma brzom propagacijom efektivno infiltriranih voda. Pojava ujezeravanja vode na površini terena i manjeg sifona kojim voda ističe na površinu verovatno je posledica kontakta karsta i krednog durmitorskog fliša, koji predstavlja barijeru cirkulaciji podzemnih voda, tako da vrelo Oko Bijele zapravo ističe kao prelivni ili barijerni tip izvora.

Karakterizacija kvaliteta voda je na osnovu izvršenih hemijskih analiza podzemnih voda pokazala da su podzemne vode odabranih karstnih sistema izuzetnog prirodnog kvaliteta podzemnih voda, a prema hemijskim karakteristikama reč je o vodama hidrokarbonatno-kalcijumske grupe sa prelazom voda vrela Rijeke Crnojevića i Bosne ka magnezijumskoj grupi. Na osnovu hemijskih analiza ustanovljena je prisustvo bakterija u podzemnim vodama Perućca, Seljašnice, Mokre, Rijeke Crnojevića i Bosne, dok se na vrelu Mlave bakterije javljaju pri visokim vodama. Prisustvo povišenih koncentracija bakterija uzrokovano je najverovatnije nepostojanjem kanalizacione infrastrukture na slivnom području svakog vrela, tj. na Tari (vrelo Perućac), karstnom platou Babine (Seljašnica), Cetinje (Rijeka Crnojevića) i Igman i Bjelašnica (vrelo Bosne). Podzemne vode vrela Rijeke Crnojevića opterećene su i povišenim koncentracijama amonijaka i fenola, pre svega usled antropogenog zagađenja prouzrokovanog nepostojanjem postrojenja za tretman voda na Cetinju. Takođe, na svim primerima je primećeno povećanje mutnoće sa nailaskom intenzivne kišne epizode, osim u slučaju vrela Bosne, kod koje ne dolazi do zamućenja usled amortizacije impulsa dubokom cirkulacijom.

Ocena kvantitativnih pritisaka na podzemne vode obuhvatila je izradu bilansa podzemnih voda, na osnovu komparacije ulaznih i izlaznih vrednosti, uz proračun gubitaka. Bilansiranjem korigovanih padavina u vidu kiše i otopljenog snega sa isticanjem podzemnih voda, ustanovljena je vrednost efektivne infiltracije, koja varira od 56% za sisteme Seljašnice i Mokre, pa do čak 90% za sistem Rijeke Crnojevića, što bi ipak trebalo uzeti sa rezervom, budući da je efektivna infiltracija ovog sistema verovatno manja za 10-ak procenata. Kvantitativni pritisci ocenjeni su za vrela sa kojih se eksploatiše voda (Seljašnica, Mokra i vrelo Bosne), koja su ocenjena da su potencijalno (Seljašnica), pod pritiskom (Mokra), tj. nisu pod pritiskom (vrelo Bosne). Iako su u prva dva primera dobijeni potencijalni pritisci na kvantitet, treba istaći činjenicu da stanovništvo Prijepolja i Niša koji se snabdevaju sa ovih vrela ne osećaju restrikcije u snabdevanju, što znači da sistemi imaju dovoljno veliki rezervoar. Svakako, implementacija mera regulacije, kojima bi se „sačuvali“ ekstremni maksimumi izdašnosti vrela umnogome bi poboljšali snabdevanje vodom i neutralisali pritisak na kvanitet. Za nekaptirana vrela izvršena je optimizacija eksploatacione količine vode, koja bi se mogla koristiti tako da karstni sistemi ne budu pod kvantitativnim pritiskom. Ove vrednosti na prosečnom godišnjem nivou iznose

285 l/s za vrelo Perućac, 284 l/s za vrelo Mlave, 160 l/s za vrelo Oko Bijele i 380 l/s za vrelo Rijeke Crnojevića.

Ocena kvalitativnih pritisaka na podzemne vode obuhvatila je izradu karata ranjivosti podzemnih voda prema SODA metodi, kao i karata hazarda i rizika podzemnih voda prema difuznim zagađivačima. Pomenute karte pokazale su da su svi karstni sistemi pod potencijalnim kvalitativnim pritiskom, najviše iz razloga što su prirodno ranjivi na zagađenje, iako se u najvećem broju slučajeva radi o niskom hazardu. Stoga, kategorija rizika koja je dominantna u svakom sistemu je *Nizak rizik*, koji je ipak svrstan u kategoriju *Potencijalno pod pritiskom*, najviše zbog pomenute visoke prirodne ranjivosti podzemnih voda. Rezultati ocene ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda su sinhroni sa rezultatima hemijskih analiza, koji pokazuju da su vode generalno odličnog prirodnog kvaliteta, ali da postoji antropogeni pritisak na njih, najviše kao posledica nepostojanje kanalizacione infrastrukture, poljoprivrede ili stočarstva.

Sve ove rezultate potvrdili su i kreirani simulacioni i prediktivni modeli kreirani za vremenske serije isticanja vrela Bosne, sa aspekta kvantiteta podzemnih voda, odnosno Mokre sa aspekta kvaliteta podzemnih voda. Svrha modela, kao neophodnog alata pri upravljanju podzemnim vodama, ogleda se u prognozi režima isticanja podzemnih voda i promene hemijskih parametara (mutnoće u slučaju Mokre) na osnovu unapred zadatih vrednosti kiše i snega, koje se uključene u efektivnu infiltraciju (ulazna veličina modela), što je posebno važno pri sezonskoj prognozi isticanja i mutnoće podzemnih voda, na osnovu koje je moguće predvideti dnevne vrednost ovih parametara u periodu topljenja snega ili u recesionom periodu. Formiranjem stohastičkih modela u funkciji upozorenja na pogoršanje kvaliteta i veliki skok kvantiteta podzemnih voda preventivno bi se moglo delovati na hipotetičko zatvaranje izvorišta i prekid distribucije kaptiranih količina vode, odnosno na upozorenje na moguće poplave u nizvodnim područjima, kojima bi se na vreme upozorilo stanovništvo i izbegle eventualne štetne posledice. Takođe, primenjeni simulacioni model isticanja vrela Rijeke Crnojevića i transfer parametara regresione jednačine na vrulju Bolje Sestre pokazao je da se rezultati sa izučenih terena mogu aplicirati na relativno neizučene u cilju formiranja sintetičkih nizova isticanja podzemnih voda.

Primenom višestruke logističke regresije, sračunata je verovatnoća pojave isticanja podzemnih voda odabranih karstnih vrela ispod višegodišnjeg proseka, kako bi se ukazala mogućnost pojave kvantitativnog pritiska, tj. kako bi se pokazali koji prediktori direktno ukazuju na pogoršanje kvantitativnog statusa karstnih podzemnih voda. Istovremeno, definisana verovatnoća pojave kvantitativnog pritiska iskorišćena je kao očekivani rezultat za neizučena karstna vrela u bližem okruženju svake analizirane pojave. Generalno gledano, u svim primerima glavni prediktori koji utiču na isticanje podzemnih voda su kišne padavine, efektivna infiltracija i evapotranspiracija, što jesu i glavni parametri bilansne jednačine. Jedino na primeru vrela Bosne, pored navedenih parametara figuriše i sneg, budući da je on veoma intenzivan na Bjelašnici. Tako, višestruki LR model je pokazao šansu od 62,14% za vrelo Perućac, 84,34% za vrelo Seljašnice, 68,33% za vrelo Mokra, 98,85% za vrelo Mlave, 86,57% za vrelo Oko Bijele, 98,12% za vrelo Rijeke Crnojevića i 81,43% za vrelo Bosne da će imati izdašnosti ispod višegodišnjeg proseka.

Karstni sistemi koji su odabrani za analizu u okviru ove doktorske disertacije mogu predstavljati reperne sisteme za karstna područja u svom okruženju. Tako, rezultati analize za vrelo Perućac mogu biti analogno primenjeni na karstna vrela na prostoru Tare i Zlatibora, dok rezultati Seljašnice se mogu primeniti na prostor jugozapadne Srbije. Vrelo Mokre karakteristično je za jugoistočni deo Srbije, pre svega vrela na istočnim i zapadnim obodima Suve planine, dok se rezultati analiza vrela Mlave mogu primeniti na vrela Kučajsko-beljaničkog karstnog masiva. Na prostoru Crne Gore, vrelo Oko Bijele može poslužiti kao primer za vrela u

Crnomorskom slivu, posebno na prostoru Durmitora i Sinjajevine, dok se rezultati analize vrela Rijeke Crnojevića mogu analogno transferisati na vrela čiji slivovi pripadaju Jadranskom slivu. Na kraju, vrelo Bosne predstavlja reporni karstni sistemi za projekciju režima karstnih vrela Savskog sliva u Federaciji BiH i Republike Srpske, posebno u centralnom i istočnom delu.

Imajući u vidu veoma malu iskorišćenost potencijala karstnih podzemnih voda, može se zaključiti da se buduće potrebe u vodi za prostor Srbije, Crne Gore i Savskog sliva Bosne i Hercegovine nesmetano mogu podmiriti eksploatacijom karstnih podzemnih voda. Trenutno se koristi svega od 1.5% do 3,3% potencijalnih rezervi karstnih podzemnih voda, što ukazuje na izuzetan potencijal ovog resursa na prostoru dela centralnog Balkana. Ipak, da bi se ovaj resurs adekvatno iskoristio, trebalo bi ga pre svega dobro upoznati, odnosno vršiti kontinuirani monitoring kvantiteta i kvaliteta karstnih podzemnih voda, izvršiti realnu procenu trenutne i buduće potrebe za vodom. Takođe, kao prvi korak ka racionalnoj eksploataciji već kaptiranih vrela, trebalo bi izvršiti sanaciju postojeće infrastrukturne mreže, kako bi se smanjili gubici, koji prosečno iznose preko 70% na prostoru dela centralnog Balkana. Nakon toga, regulacione mere na mestu isticanja podzemnih voda, odnosno u širem slivnom području su neophodne kako bi se amortizovala nejednaka vremenska distribucija isticanja podzemnih voda i obezbedila voda u periodu kada je najmanje ima, a kada je najpotrebnija.

12 LITERATURA

1. Adriatic River Basin Management Plan (ARBMP) (2019): *Plan upravljanja Jadranskim slivom u Crnoj Gori*; Jačanje kapaciteta u cilju implementacije Okvirne direktive o vodama u Crnoj Gori, EuropeAid/138151/DH/SER/ME; Suez SAFEGE & Eptisa
2. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., Hackett, G. (1987): *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting*. US EPA, 622 p.
3. Alley, W. M. (2007): *Another water budget myth: the significance of recoverable ground water in storage*. Ground Water, 45(3), p. 251
4. Amit, H., Lyakhovsky, V., Katz, A., Starinsky, A., Burg, A. (2002): *Interpretation of spring recession curves*. Ground Water 40(5):543–551
5. Ansems, N., Khaka, E., Villholth, K. (2014): *Ecosystem based Adaptation in Groundwater Management*; UNEP, IGRAC, IWMI, UNESCO
6. Antonijević, I., Veselinović, M., Đorđević, M., Kalenić, M., Krstić, B., Karajičić Lj. (1970): *Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za list Žagubica L 34-140*, Fond Saveznog geološkog zavoda, Beograd
7. Antonijević, R., Pavić, A., Karović, J. (1969): *Tumač za listove Kotor i Budva OGK SFRJ*, Savezni geološki zavod, Beograd
8. Atkinson, TC (1977): *Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills*. Somerset (Great Britain), J. Hydrol., 35. Elsevier Sci. pp 93-103
9. Avdagić, I. (1996.): *Vode Sarajevske regije*, Institut za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu
10. Bakalowicz, M. (2005): *Karst groundwater: a challenge for new resources*. Hydrogeology Journal. Vol.13 No. 1. Springer-Verlag. pp 148-160
11. Bass, B., Hunag, G., Yin, Y, Cohen, S. J. (1994): *Grey Theory Approach To Quantifying The Risks Associated With General Circulation Models*; In: Hipel K.W. et al. (Eds.) Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Vol. 3, 33-46, Kluwer Academic Publishers
12. Begović, P., Ivanković, B., Alić, E., Prolić, A., Delić, P. (2019): *Elaborat monitoringa podzemnih voda na vodnom području rijeke Save u FBiH*; Ibis-inženjering d.o.o., Banja Luka, Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, Agencija za vodno područje rijeke Save
13. Bešić, Z. (1948). *Geotektonska struktura sjeverne Crne Gore*. Glasnik Prirodnjačkog muzeja Srpske zemlje, Ser. A-1, Beograd
14. Bewick, V., Cheek, L., Ball, J. (2005). Statistics review 14: Logistic regression. Crit Care 9(1): 112 – 118.
15. BHAS, (2013): *Popis stanovništva, domaćinstava i stanova u Bosni i Hercegovini, 2013 – Rezultati popisa*; Agencija za statistiku Bosne i Hercegovine, Sarajevo
16. Bonacci, O., (1987): *Karst Hydrology; with special reference to the Dinaric Karst*. Springer-Verlag, Berlin; 184p
17. Bonacci, O. (1993): *Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*. J. Hydrol. Elsevier Sci. 38 pp. 51-62.
18. Bonacci, O. (1994): *Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus*. Sveučilišna knjižnica u Splitu. Split. 383 p.
19. Bonacci, O. (2003): *Ecohydrology of water resources and open streams*; (in Croatian). Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu i IGH, Split, p. 487
20. Bonacci, O. (2011): *Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*. Hydrol Sci (Journal des Sciences Hydrologiques) 38(1–2):51–62

21. Bonacci, O. (2015): *Surface Waters and Groundwater in Karst*, In: Z. Stevanović (Ed), *Karst Aquifers – Characterization and Engineering*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 149 – 169
22. Bonacci, O. & Andrić, I. (2015): *Hydrological analysis of Žrnovnica karst spring near Split*. *Croatian Waters* 23 (94):, pp. 311 – 320
23. Bošković, M., Živaljević, R. (1986): *Hidrološki osvrt na poplavu Cetinja od 18-20.II.1986*, *Vodoprivreda*, 102-103, Beograd
24. Boussinesq, J. (1903): *Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration á lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond*. *C R Acad Sci* 137:5–11
25. Boussinesq, J. (1904): *Recherches the'oriques sur l'e'coulement des nappes d'eau infiltre'es dans le sol et sur le de'bit des sources*. *J Math Pure Appl* 10:5–78
26. Box, G. & Jenkins, G. (1970): *Time series analysis, forecasting, and control*. Holden-Day, San Francisco
27. Box, G., Jenkins G., Reinsel G.C. (2008): *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, INC., Publication. USA.
28. Božić, B. (1977): *Analiza i primena stohastičkih procesa u hidrologiji*; In: JDH, Treći seminar iz hidrologije (Trebinje), računski primeri, Beograd, IX, pp. 1 -65
29. Bras, R.L. & Rodriguez-Iturbe, I. (1985): *Random functions and hydrology*. Addison-Wesley, MA
30. Bredehoeft, J. D. (2002): *The water budget myth revisited: why hydrogeologists model*. *Ground Water* 40 (4): 340–345
31. Brinkmann, R. & Garenn, S.J. (2011): *Karst and Sustainability*; In: van Beynen, P. (Ed.). *Karst Management*; Springer Dordrecht Heidelberg London New York, pp. 361 – 378
32. Bromley, J., Edmunds, W.M., Fellman, E., Brouwer, J., Gaze, S.R., Sudlow, J., Taupin, J.D., (1997): *Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method*. *Journal of hydrology*. 188-189;139-154.
33. Bulut, O. F., Duru, B., Çakmak, Ö., Günhan, Ö., Dilek, F. B., & Yetis, U. (2020): *Determination of groundwater threshold values: A methodological approach*. *Journal of Cleaner Production*, 120001. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120001
34. Burdon, D., & Safadi, C. (1963): *Ras-El-Ain: The great karst spring of Mesopotamia. An hydrogeological study*. *J. Hydrol.* 1, 58–95
35. Burić, M. (1976): *Regionalna hidrogeološka istraživanja Pive, Tare i Čehotine*, Geološki zavod Crne Gore, Titograd
36. Carson, R. (1962): *Silent spring*. Houghton Mifflin, Boston
37. Castany G. (1968): *Traite pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris
38. Chen, Z., Goldscheider, N., Auler, A., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanovic, Z., Veni, G., Dumont, A., Aureli, A., Clos, P., Krombholz, M. (2017): *World Karst Aquifer Map (WHYMAP WOKAM)*. BGR, IAH, KIT, UNESCO, doi: 10.25928/b2.21_sfkq-r406
39. Cinkus, G. Mazzilli, N., Jourde, H. (2020): *Report of typology of the karst systems, Deliverable 4.1; Karst Aquifer Resources availability and quality in the Mediterranean Area (KARMA)*, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), University of Malaga (UMA), Sapienza University of Rome (URO), Ecole nationale d'Ingenieurs de Tunis (ENIT), American University of Beirut (AUB).
40. Cox, D. R. (1958). *The regression analysis of binary sequences (with discussion)*. *J Roy Stat Soc B*. 20: 215 – 242.
41. Cvijić, J. (1893): *Das Karstphaenomen*. Versuch einer morphologischen monographie, *Geograph. Abhandlungen Band, V, Heft 3*, Wien, p. 114

42. Cvijić, J. (1895): *Pećine i podzemna hidrografija u istočnoj Srbiji*, glas SKA XLVI, Beograd
43. Cvijić, J. (1896): *Izvori, tresave i vodopadi u istočnoj Srbiji*, Glas SKA, LI 18, Beograd
44. Cvijić, J. (1912): *Suva planina i karst Valožja*, Glasnik Geografskog društva, sv. 1, Beograd. Pp. 92-99 (Sabrana dela J. Cvijića, Knj. 13, SANU, ZUNS, Beograd, 1996)
45. Cvijić, J. (1918): *Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst*. Recueil Trav Inst Geogr Alpine, Grenoble 6(4):40
46. Cvijić, J. (1924): *Geomorfologija I*, Državna štamparija Beograd, str. 1-588, Beograd (Sabrana dela J. Cvijića, Geomorfologija I, knj. 6), SANU i ZUNS, Beograd, str. 595
47. Čenčur Curk, B. (Ed) (2014): *CC – WARE Mitigating Vulnerability of Water Resources under Climate Change*, WP3 – Vulnerability of Water Resources in SEE, annual report
48. Čičić, S., Skopljak, F. (2004): *Prilog poznavanju geoloških i hidrogeoloških odnosa u području Vrela Bosne; Voda i mi*, Vol. 37, p. 4–10, Sarajevo
49. Ćuk, M. (2017): *Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije*; doktorska disertacija, DHG, RGF, UB, pp. 197
50. Danube River Basin Management Plan (DRBMP) (2019): *Plan upravljanja Dunavskim slivom u Crnoj Gori*; Jačanje kapaciteta u cilju implementacije Okvirne direktive o vodama u Crnoj Gori, EuropeAid/138151/DH/SER/ME; Suez SAFEGE & Eptisa
51. Davis, S.N., & DeWiest, R.J.M. (1991): *Hydrogeology*. Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 463 p.
52. De Stefano, L., Fornés, J.M., López-Geta J.A., Villarroya, F. (2015) *Groundwater use in Spain: an overview in light of the EU Water Framework Directive*, International Journal of Water Resources Development, 31:4, 640-656, DOI: 10.1080/07900627.2014.938260
53. Deng, J. (1985): *Grey Systems*. Zhengzhou Hydrology, 1, 1-10; 2, 2-9
54. Denić-Jukić, V. & Jukić, D. (2003): *Composite transfer function for karst aquifers*; Journal of Hydrology 274, 80-94
55. Devlin, J.F. & Sophocleous, M. (2005): *The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability*. Hydrogeology Journal 13: 549–554
56. Dimkić, M., Stevanović, Z., Đurić, D. (2011): *Progress and Improvement of the Status of Groundwater in Serbia*, Proceedings of IWA Specialist Groundwater Conference, Belgrade, pp. 81-101
57. Döerflinger, N. & Zwahlen, F. (1997): *EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment*. In: Günay, G., Johnson, I. (Eds) Karst water and environmental impacts. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 117–123
58. Döerflinger, N. & Zwahlen, F. (1997): *EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment*. In: Günay, G., Johnson, I. (Eds) Karst water and environmental impacts. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 117–123
59. Dragišić, V. (1988): *Hidrogeološke karakteristike i uslovi ovodnjenosti ležišta bakra istočne Srbije*, doktorska disertacija, RGF, UB, Beograd
60. Dragišić, V. (1989): *Hidrogeološke karakteristike šire okoline Bora*, Mladi istraživači Srbije i Društvo istraživača „Edvard Kardelj“ Bor
61. Dragišić, V. (1992): *Hidrogeologija ležišta bakra istočne Srbije (monografija)*, Institut za hidrogeologiju RGF-a, Beograd, pp. 121.
62. Dragišić, V. (1997): *Opšta hidrogeologija*, univerzitetski udžbenik, Univerzitet u Beogradu, RGF, Institut za hidrogeologiju, pp.434
63. Dragišić, V. & Živanović, V. (2014): *Opšta hidrogeologija (drugo izdanje)* (RGF, Beograd)
64. Drogue, C. (1992): *Hydrodynamics of Karstic Aquifers: Experimental sites in the Mediterranean karst, Southern France*. International Contributions to Hydrogeology, Vol. 13. Verlag Heinz Heise, Hannover. Germany. pp. 133-150
65. Ducić, V., Anđelković, G. (2007): *Klimatologija-praktikum*, Geografski fakultet, Beograd

66. Dunne, T., Leopold, L. B. (1978): *Water in environmental planning*. W. H. Freeman and Co. McGraw-Hill, New York. 680 p.
67. Đalović, P., Protić, D. (1979): *Osnovna hidrogeološka istraživanja režima podzemnih voda u SR Srbiji – Konačni izveštaj III faze*, Geozavod, Beograd
68. European Commission (2006): *Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the Protection of Groundwater against Pollution and Deterioration*; Official Journal of the EU: Brussels, Belgium, 2006.
69. EEA (2018): *European waters - Assessment of status and pressures*, Report No 7/2018, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018, ISBN 978-92-9213-947-6, ISSN 1977-8449, doi:10.2800/303664
70. European Environment Agency, 2013. *CORINE Land Cover (CLC) 2018*, Version 17. CRC/TR32 Database (TR32DB). Accessed from <https://www.tr32db.uni-koeln.de/data.php?dataID=1152> on 2022-07-10
71. Filipović, B., Krunić, O., Lazić, M. (2005): *Regionalna hidrogeologija Srbije*, RGF, UB, p. 40
72. Fiorillo, F. (2011): *Tank-reservoir emptying as a simulation of recession limb of karst spring hydrographs*. *Hydrogeol J* 19:1009–1019
73. Fiorillo, F. (2014): *The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers*; *Water Resources Management* (2014) 28:1781–1805, DOI 10.1007/s11269-014-0597-z
74. Flora, S. P. (2004): *Hydrogeological Characterization and Discharge Variability of Springs in the Middle Verde River Watershed, Central Arizona*. PhD thesis, NAU
75. Ford, D. (2005): *Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology*. In: Stevanović, Z. & Mijatović, B. (Eds.): *Cvijić and karst*, Board on karst and spel. Serb. Acad. of Sci. and Arts, Belgrade, 305–321
76. Ford, D. & Williams, P. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, England
77. Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M. & Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development
78. Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979): *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
79. Geoprojekt, (2022): *Izveštaj o uspostavljanju treće zone sanitarne zaštite (ZSZ) izvorišta Bolje Sestre*, izveštaj projekta *Monitoring, control and protection of the regional water supply source “Bolje Sestre”*, (fondovska dokumentacija), Integrated Water Management System in crossborder area CrossWater project IPA, Podgorica, pp. 295
80. Gleick, P. H., 1996: *Water resources*. In: *Encyclopedia of Climate and Weather*, S. H. Schneider (Ed.), Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
81. Goldscheider, N. & Drew, D. (Eds.). (2007): *Methods in Karst Hydrogeology*. London: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
82. Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., Hötzl, H. (2000): *The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers*. *Z Angew Geol* 463:157–166
83. Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., Veni, G. (2020): *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. *Hydrogeol J* 28, 1661–1677 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
84. Grubić, A. (1994): *Geological features of Carpatho-Balkanides Mountain System*. In: Stevanović, Z. & Filipović, B. (Eds.): *Ground waters in carbonate rocks of the Carpathian-Balkan Mountain range*, CBGA, pp. 9-34. Belgrade
85. Gunn, J. (1985): *A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers*. *Karst water resources*. IAHS Publ. No. 161. Eds. Gunay, Jonson. Turkey. pp. 587-596.
86. Gvozdeckiy, N.A. (1981) *Karst*. Izdatelstvo Misl, Moscow, p 214

87. Hadžić, E. & Imamović, A. (2020): *Water Resources in Bosnia and Herzegovina*. In: Negm, A., Romanescu, G. & Zelenakova, M. (Eds.), *Water Resources Management in Balkan Countries*. Springer Water book series, Springer Nature Switzerland AG 2020
88. Halilbegović, B. (2022): *Dugoročno rješenje problema vodosnadbjevanja grada Sarajeva iz akumulacije Crna Rijeka*; In: Zbornik radova XVI srpskog simpozijuma o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, Srbija, pp. 115-120, ISBN 978-86-7352-380-4
90. Hartmann, A., N. Goldscheider, T. Wagener, J. Lange, M. Weiler. (2014): *Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches*, Rev. Geophys., 52, doi:10.1002/2013RG000443
91. Herak, M. (1972): *Karst of Yugoslavia*. In: Herak, M. & Stringfield, V.T. (Eds.), *Karst: Important Karst Regions of the Northern Hemisphere*. Amsterdam, Elsevier. 25–83.
92. Herak, M., Magdalenic, A., Bahun, S. (1981) *Karst hydrogeology*. In: Halasi Kun GJ (ed) *Pollution and water resources*. Columbia University seminar series, vol XIV, part 1. Hydrogeology and other selected reports. Pergamon Press, New York, pp 163–178
93. Hernandez, L. R., Bravo, J. A. H., Mejuto, M. F., (2004): *Report on Vulnerability Map to Groundwater Pollution ALICANTE*, Departamento de Ciclo Hidrico, Alicante, Spain
94. Hinsby, K., Schutten, J., Craig, M., Petita, M., Prchalova, H. (2015): *Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems*; Tech. Report No. 15 - 2015 - 093, Brussels
95. Hrvačević, S. (1999): *Hidrogeološke karakteristike sliva Pive i Tare sa aspekta korišćenja i zaštite vodnog potencijala*; magistarski rad, UB RGF, Beograd
96. Hrvačević, S. (2004): *Resursi površinskih voda Crne Gore*. "EPCG" AD Nikšić, pp. 327
97. Hunkeler, D. et al., 2015. *GW-TREND: Groundwater shortage due to climate change?*
98. Hydro Office (2020): *Software for hydrology, meteorology, geoscience & data science*. [Online] Available from: <https://hydrooffice.org>
99. ICPDR (2014): *Danube River Basin Management Plan*, Vienna Austria, www.icpdr.org
100. ISRBC (2013): *Sava River Basin Management Plan*, Zagreb, Croatia, savacommission.org
101. Jeannin, P.Y., Eichenberger, U., Sinreich, M., Vouillamoz, J., Malard, A. et al. (2013): *KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland*. Environmental Earth Sciences, 69(3): 999-1013 p.
102. Jemcov, I. (2008): *Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerima iz Srbije*, doktorska disertacije, RGF, UoB, p. 377
103. Jemcov, I. (2014): *Estimating potential for exploration of karst aquifer: case example on two Serbian karst aquifer*. Envi Earth Sci. doi:10.1007/s12665-013-2300-8
104. Jemcov, I., Živanović, V., Čolić, S., Milanović, S. & Trivić, B. (2007): *Vulnerability assessment and application of remote sensing - Groundwater resource analysis of National park "Tara"*; In: Ribeiro, L., Chambel, A. & Condesso De Melo, M.T. (eds.): *Proceedings of the XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists*. Sept. 17–21, 2007. International Association of Hydrogeologists, Lisbon.
105. Jemcov, I., Petrić, M. (2009): *Time Series Analysis, modelling and assessment of optimal exploitation of the Nemanja karst springs, Serbia*. Acta Carsologica, 39, 2, 187-200. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.90>
106. Jemcov, I., Milanović, S., Milanović, P. (2010): *Decision support procedure for constructing karst underground reservoirs - a case study on Perućac karst spring (Western Serbia)*; In: B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Duran, J.W. Lamoreaux (Eds.). *Advances in Research in Karst Media*. Series: Environmental Earth Sciences. Springer pp. 415-421 ISBN 978-3-642-12485-3 DOI 10.1007/978-3-642-12485-0

107. Jemcov, I., Milanović, S., Milanović, P.T., Dašić, T. (2011): *Analysis of the utility and management of karst underground reservoirs: case study of the Perućac karst spring*. Carbonates Evaporites 26, 61–68 (2011). doi.org/10.1007/s13146-011-0048-3
108. Jemcov, I. & Živanović, V. (2020): *Zaštita podzemnih voda*; predavanja, nepublikovani material, UB, RGF, DHG
109. Jolović, B. (2012): *Hydrogeology; National report Bosnia and Herzegovina, Protection and Sustainable Use of the Dinaric Karst Transboundary Aquifer System (DIKTAS)*. GEF, UNDP, UNESCO, pp. 3 – 65
110. Jovanović, R., Mojićević, M., Tokić, S., Rokić, Lj. (1978.): *Osnovna geološka karta 1 : 100.000, list Sarajevo K34-1 i pripadajući Tumač*, Savezni geološki zavod, Beograd.
111. Jukić, D. & Denić-Jukić, V. (2006): *Nonlinear kernel functions for karst aquifers*, J. Hydrol., 328, 360–374
112. Kalezić, M., Mirković, M., Škuletić, D. (1966): *Tumač za list Šavnik, OGK SFRJ*, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore, Titograd
113. Kanade, V. (2022): *What Is Logistic Regression? Equation, Assumptions, Types, and Best Practices*; <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-logistic-regression/>
114. Karamata, S. (2006): *The geological development of the Balkan Peninsula related to the approach, collision and compression of Gondwanan and Eurasian units*. In: Robertson, A. H. F. & Mountrakis, D. (Eds). *Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region*. Geological Society, London, Special Publications, 260, 155-178, 10.1144/GSL.SP.2006.260.01.07
115. Kiraly L., Perrochet P., Rossier Y. (1995): *Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach*, Bull. du Centre d'Hydrogéol., vol. 14, pp. 199-220
116. Király, L. (2002): *Karstification and Groundwater Flow. Evolution of karst: from prekarst to cessation*. Založba ZRC. Postojna-Ljubljana pp. 155-190
117. Klemeš, V. (1978): *Physically based stochastic hydrologic analysis*. Adv Hydrosci 11:285–352
118. Klimchouk, A. (2000): *The formation of epikarst and its role in vadoze speleogenesis*. In. Klimchouk A., Ford C.D., Palmer A.N, Dreybrodt W., (eds). *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society Inc. Huntsville. pp. 91-99
119. Klimchouk, A., & Ford, D. (2000): *Types of Karst and Evolution of Hydrogeologic Settings*. In: Klimchouk A., Ford C.D., Palmer A.N, Dreybrodt W., (Eds). *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society Inc. Huntsville. pp. 45-54
120. Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds) (2000) *Speleogenesis; evolution of karst aquifers*. NSSA, Huntsville
121. Komatina, M. (1983): *Hydrogeological features of Dinaric karst*; In: Mijatović, B. (Ed.) *Hydrogeology of the Dinaric karst*; Spec. Ed. Geozavod, Belgrade, pp. 45-58
122. Komatina, M. (1984): *Hidrogeološka istraživanja-Metode istraživanja*; Geozavod, Beograd, pp. 375
123. Komatina, M. (1992): *Hydrogeological relationship in the central Dinaridic karst*; In: Paloc, H. & Back, W. (Eds.) *Hydrogeology of Selected Karst Regions*; International Association of Hydrogeology, Vol. 13, ISSN 0936-3912; ISBN 3-922705-94-4; Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, Hannover, Germany
124. Komatina, M., Nikolić, J., Dukić, T. (1977): *Potencijalne mogućnosti korišćenja podzemnih voda karsta*, Zbornik radova, Knjiga I, Savetovanje o uslovima i mogućnostima vodosnabdevanja SR Srbije bez SAP-a na bazi korišćenja podzemnih

- voda. RGF, RSIZ za geološka istraživanja, Geozavod, Institut „Jaroslav Černi“, Geosonda, Geoinstitut, Beograd, str. 51-57
125. Kostić, M. (1953): *Glavne fizičko-geografske i ekonomsko-geografske odlike Koritnice*, Zbornik radova Geografskog instituta, XXXII, SAN, knj. 6, „Naučna Knjiga“, Beograd, pp. 89–105
126. Kostić, A. (2018): *Logistička regresija*; skripta Matematičkog fakulteta, <http://www.matf.bg.ac.rs/p/files/69-logisticka.html>
127. Kovács, A. & Sauter, M. (2007): *Modelling karst hydrodynamics*. In: Goldscheider N, Drew D (eds.) *Methods in karst hydrogeology*. International Contribution to Hydrogeology, IAH, vol 26. Taylor and Francis/Balkema, London, pp 201–222
128. Kovács, A., Perrochet, P., Király, L., Jeannin, P. (2005): *A quantitative method for characterisation of karst aquifers based on the spring hydrograph analysis*. J Hydrol 303:152–164
129. Kovács, A., Perrochet, P. (2008): *A quantitative approach to spring hydrograph decomposition*. J Hydrol 352:16–29
130. Kovács, A. (2021): *Hydrology and groundwater regime - actual and forecasted of studied Šavnik / Durmitor area*, In: Stevanović, Z. & Blagojević, M. (Eds.) *Hydrogeology and Climate Changes Impact on Aquifer Systems of Drina River Basin with special emphasis on Durmitor Mountain area*, Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management of Montenegro, ISBN: 978-86-85799-22-8, COBISS.CG-ID: 17177348, pp. 204-256
131. Kovačić, G., Ravbar, N. (2015): *Validation of vulnerability assessment using time series analysis: the case of the Korentan spring, SW Slovenia*. In: Andreo, B. N. (Ed.) *Hydrogeological and environmental investigations in Karst systems*; Environmental Earth Sciences, ISSN 1866-6280, vol. 1; Heidelberg [etc.]: Springer, 2015, 415-424
132. Kovačić, Z. (1995): *Analiza vremenskih serija*; univerzitetski udžbenik, Ekonomski fakultet u Beogradu, p. 347
133. Kovačina, S., Lončarević, M. (2003): *Dugoročni plan vodosnabdjevanja kantona Sarajevo -vrijeme za odluke*; Voda i mi, Sarajevo, 35, p. 4–9.
134. Krešić, N. (1981): *Hidrogeološke karakteristike u slivu vrela Perućac*. Diplomski rad. Fond. str. dok. RGF. Beograd
135. Krešić, N. (1982): *Prilog poznavanju hidrogeoloških karakteristika karsta Zapadne Srbije*, Zbornik X jubilarnog kongresa geologa Jugoslavije, knj. 3, Budva
136. Krešić, N. (1984): *Hidrogeologija karstnih terena u slivu Drine uzvodno od Bajine Bašte na teritoriji SR Srbije*, magistarska teza, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd
137. Krešić, N. (1987): *Određivanje karstnih hidrogeoloških sistema u ofiolitskom pojasu Unutrašnjih Dinarida SR Srbije*, doktorska disertacija, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd
138. Krešić, N. (1988): *Karst i pećine Jugoslavije*, Naučna knjiga, Beograd, str. 1-149.
139. Krešić, N. (1990): *Karstni hidrogeološki sistem vrela Bučje i mogućnosti njegovog korišćenja*, Naš Krš, XVI, 28-29, Sarajevo, 91-98.
140. Krešić, N. (1991): *Kvantitativna hidrogeologija karsta sa elementima zaštite*. Naučna knjiga. Beograd, p. 179
141. Krešić N. (1997): *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. Lewis Publishers. CRC. 461 p.
142. Krešić, N. (2009): *Groundwater resources: Sustainability, Management, and Restoration*. McGraw-Hill, USA, pp. 852
143. Krešić, N. (2010): *Sustainability and management of springs*; In: Krešić, N. & Stevanović, Z. (Eds), *Groundwater Hydrology of Springs-Engineering, Theory, Management and Sustainability*. BH, Burlington USA & Oxford UK, p. 1 – 29

144. Kresic, N., (2013): *Water in Karst – Management, Vulnerability and Restoration*, McGraw Hill, United States of America, pp. 708
145. Krešić, N. & Panday, S. (2017): *Numerical groundwater modelling in karst*; In: Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G. & Ravbar, N. (Eds) *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications*. Geological Society, London, Special Publications, 466, <https://doi.org/10.1144/SP466.12>; pp.
146. Krešić, N. & Panday, S. (2021): *Modeling of groundwater flow and transport in coastal karst aquifers*. *Hydrogeol J* 29, 249–258 (2021). doi.org/10.1007/s10040-020-02262-3
147. LaMoreaux, J.W. & Stevanović, Z. (2015): *Historical overview on karst research*. In: *Karst Aquifers-Characterization and Engineering*. Ed. Stevanović, Z. Series: Professional Practice in Earth Science, Springer International Publishing, Cham, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 3-18.
148. LaMoreaux, P.E. & LaMoreaux, J. (2007): *Karst: the foundation for concepts in hydrogeology*. *Environ Geol* 51:685–688
149. LaMoreaux, P.E. (1991) *History of karst hydrogeological studies*. In: Proceedings of the international conference on environmental changes in karst areas. IGU – UIS, Quadreni del Dipartimento di geografia, No. 13. Università di Padova, Padua, 15–27 Sept 1991, pp 215–229 LaMoreaux PE,
150. Langmuir, D. (1984): *Physical and chemical characteristics of carbonate water*. In: LaMoreaux, P.E., Wilson, B.M., Memon, B.A. (Eds) *Guide to the hydrology of carbonate rocks*. IHP studies and reports in hydrology, vol 41. UNESCO. Paris, pp. 264–265
151. Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., Banton, O. (1998): *Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France)*. *J. Hydrol.* 205. 217-231
152. Lasdon, L.S., Fox, R.L., Ratner, M.W. (1974): *Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method*. *RAIRO - Operations Research - Recherche Opérationnelle*, Tome 8 (1974) no. V3, pp. 73-103.
153. LEAP, (2013): *Lokalni ekološki akcioni plan Općine Ilidža*, SYNERGY REK, Sarajevo
154. Leopold, A. (1949): *Sand county almanac*. Oxford University Press, New York
155. Lévy, (1948): *Processus stochastiques et mouvement Brownien*. Gauthier-Villars
156. Lindsley R.K., Jr., Kohler M.A., Paulhus J.L.H., (1982): *Hydrology for engineers* (3rd). New York. McGraw-Hill. 508 p.
157. López-Geta, J. A., Fornes, J. M., Ramos, G., Villarroya, F. (2009): *Las aguas subterneas. Un recurso natural del subsuelo [Groundwater. A natural underground resource]*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España y Fundación Marcelino Botín
158. Mahmud, W.E. & Watanabe, K., (2014): *Modified Grey Model and Its Application to Groundwater Flow Analysis With Limited Hydrogeological Data: A Case Study of the Nubian Sandstone, Kharga Oasis, Egypt*; *Environ Monit Assess.* 2014; 186(2): 1063-1081. doi: 10.1007/s10661-013-3439-1
159. Maillet, E. (1905): *Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale [in French - Underground and river hydrology]*. Hermann, Paris, 218
160. Malard, A. (2018): *Hydrogeological characterization of karst aquifers in Switzerland using a pragmatic approach*; PhD thesis, Faculty of Sciences, Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), University of Neuchâtel
161. Malard, A. & Jeannin, P.Y. (2013): *Characterisation of karst aquifers in Switzerland: the KARSYS approach*. *European Geologist*, 35: 59-63 p.

162. Malard, A., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Weber, E. (2015): *An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura*. Hydrogeology Journal, 23(7): 1341-1357 p.
163. Malard, A., Sinreich, M., Jeannin, P.Y. (2016): *A novel approach for estimating karst groundwater recharge in mountainous regions and its application in Switzerland*. Hydrological Processes, 30(13): 2153–2166 p.
164. Malik, P. (2015): *Evaluating Discharge Regimes of Karst Aquifer*. In: Stevanović Z. (ed.) Karst Aquifers – Characterization and Engineering. Professional Practice in Earth Sciences, Springer, pp. 205-249, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_7
165. Mangin, A. (1970): *Contribution à l'étude d'aquifère karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrues et de tarissement*. Ann. Spéléologie, 25. pp. 581- 609
166. Mangin, A. (1975): *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse Univ. Dijon. Annales de spéléologie, 29/3: 283-332, 29/4: 495- 601, 30/1. pp. 21-124
167. Mangin, A. (1982). *Determination du comportement hydrodynamique des aquifères karstiques a partir de l'étude des informations fournies par leurs exutoires*. In: Colloque national en hommage a Castany. La Source, Orle´ans, pp. 397–403.
168. Mangin, A. (1984): *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale*. J. Hydrol., 67 pp. 25-43
169. Mangin, A. (1994): *Karst hydrogeology*. In: Gilbert, J., D.L. Danielopol & J.A. Stanford (eds). Groundwater Ecology. Academic Press. pp. 43-67
170. Maran Stevanović, A. (2018): *Geodiversity and geoheritage from theory to practice*. Natural History Museum in Belgrade, Spec. issue, 46, p. 124
171. Maran Stevanović, A. (2022): *Đerdap UNESCO globalni geopark – u slici i reči*; Zbornik apstrakata 18. Kongresa geologa Srbije "Geologija rešava probleme", Divčibare, 01-04 jun 2022; Srpsko Geološko Društvo, pp. 151-152, ISBN-978-86-86053-23-7
172. Maréchal JC. & Rouillard J. (2020): *Groundwater in France: Resources, Use and Management Issues*. In: Rinaudo JD., Holley C., Barnett S., Montginoul M. (eds) Sustainable Groundwater Management. Global Issues in Water Policy, vol 24. Springer
173. Margat, J. (1968): *Vulnerabilite des nappes d'eau souterrane a la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination)*. Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD, BRGM, Orleans.
174. Margat, J., Van der Gun, J. (2013): *Groundwater around the World*. London, CRC
175. Margeta, J. & Fistanic, I. (2004): *Water quality modelling of Jadro Spring*. Water Sci. Technol. 50 (11), 59–66
176. Marinović, V. & Petrović, B. (2018a): *Hydraulic mechanism of discharge of Seljašnica karst spring (SW Serbia)*; Geologica Balcanica, XXI International Congress of the CBGA,; University of Salzburg; Bulgarian Academy of Science; p.341; Salzburg, Austria, ISBN: 978-954-90223-7-7
177. Marinović, V. & Petrović, B. (2018b): *Preliminary characterization of Seljašnica karst aquifer (SW Serbia) based on recession curve analysis*; Proceedings of the international symposium KARST 2018 "Expect the Unexpected", Trebinje, B&H, 6-9 June 2018; UoB, FMG, DHG, CKH; HE PP Dabar; Trebinje, B&H; p. 327-333, ISBN:978-86-7352-325-5
178. Marinović, V. & Stevanović, Z. (2019): *Karst groundwater quantity assessment and sustainability: the approach appropriate for river basin management plans*; Environmental Earth Sciences (2019) 78:362; Springer-Verlag GmbH Germany; doi.org/10.1007/s12665-019-8364-3

179. Marinović, V., Petrović, B. & Stevanović, Z. (2019): *A stochastic model for simulation of karst spring discharge: Case study – Seljašnica karst spring (SW Serbia)*; Review of the Bulgarian Geological Society, vol. 80, part 3, 2019; National Conference with international participation “GEOSCIENCES 2019”, Bulgarian Geological Society, p. 170-173, ISSN 0007-3938; Sofia, Bulgaria
180. Marinović, V., Petrović, B. (2019): *Turbidity dynamics in karst hydrogeological systems. Example of three karst springs from Serbia*; In: Proceedings of the 46th Annual Congress of IAHR, Málaga (Spain), Sept. 22-27, 2019, pp. 619, ISBN: 978-84-938046-3-3
181. Marinović, V., Petrović, B. (2021): *Stochastic Prediction of Temporal Variations of Karst Groundwater Regime in Function of Sustainable Management: Case Study Mokra Karst Spring (SE Serbia)*; Book of Abstracts of Virtual Multidisciplinary Conference: From Top to Bottom; UB, FMG, DHG, CKH, Belgrade; pp. 34-35, ISBN: 978-86-7352-369-9
182. Marković, S. (2017): *Razgraničenje slivnih područja, bilans i potencijalnost karstnog masiva Tare*, master rad, UB RGF DHG, Beograd
183. Meinzer, O. E. (1920): *Quantitative methods of estimating groundwater supplies*, pp.329-338, Bull. Geological Society of America. 31
184. Marsaud, B. (1996): *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts a partir des resultats experimentaux* -These Univ. de Paris XI Orsay, 305 pp
185. Mijatović, B. (1968): *Metodika ispitivanja hidrodinamičkog režima kraških izdani pomoću analize krive pražnjenja i fluktuacije nivoa u recesionim uslovima*. Vesnik “Geozavoda”, ser. B., knj. VIII, Beograd. pp. 43-80
186. Mijatović, B. (1983) (Ed): *Hydrogeology of Dinaric Karst – Field Trip to the Dinaric Karst*; Geozavod – Institut za hidrogeološka i geotehnička istraživanja; Komitet za hidrogeologiju i inženjersku geologiju SITRGMJ, Beograd, Jugoslavija, pp. 1 – 204
187. Mijatović, B. (1986): *Funkcionisanje hidrogeološkog sistema u Cetinjskom polju*, Vodoprivreda, p. 102-103, Beograd
188. Mijatović, B. (1990): *Kras – hidrogeologija kraških vodonosnika*. Geozavod – Inst. za Geonauke. Beograd. 304 p.
189. Mikszewski, A. & Krešić, N. (2015): *Mathematical Modeling of Karst Aquifers*; In: Stevanović, Z. (Ed.) *Karst Aquifers – Characterization and Engineering*; Springer International Publishing, Switzerland, p. 283 – 298
190. Milanović, S. (1998): *Hidrogeološki uslovi formiranja karstne podzemne akumulacije Perućac*, Diplomski rad, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd
191. Milanović, S. (2007): *Hydrogeological characteristics of some deep siphonal springs in Serbia and Montenegro karst*. Environmental Geology. Vol. 51 No 5, Springer Berlin / Heidelberg, ISSN - 0943-0105, pp. 7 55-7 s9
192. Milanović S. (2010) *Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija)*, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
193. Milanović S., Vasić, Lj. (2014) *Studija hidrogeoloških i specijalnih istraživanja za potrebe održivog korišćenja podzemnih voda u selima opštine Žagubica, sa autonomnim vodovodnim sistemima*, Fondovski materijal, RGF, Beograd
194. Milanović, S. & Vasić, Lj. (2015): *Monitoring of Karst Groundwater*. In: Z. Stevanović (Ed), *Karst Aquifer – Characterization and Engineering*. Springer International Publishing, Switzerland, p. 335 – 361
195. Milanović, S., Ristić Vakanjac, V., Vasić, Lj., Kličković, M., Čokorilo Ilić, M. (2016): *Exploration of the Mlava river source by Cvijić and since*; Proceedings of the International Conference „150th Ann. of Jovan Cvijić’s birth“ Book 10 / Volume I, SANU, pp. 181-188

196. Milanović, S., Stevanović, Z., Đurić, D., Petrović, T., Milovanović, M. (2010): *Regionalni pristup izradi karte ugroženosti podzemnih voda Srbije – nova metoda* IZDAN, Zbornik radova HV Kongresa geologa Srbije, s. 585-590, Beograd
197. Milanović, S., Vasić, Lj. (2015): *Izveštaj izvedenih radova na realizaciji programa upravljanja ZP od nacionalnog interesa kojima upravlja JKP Belosavac Žagubica*. Sintezni Elaborat izvedenih radova na realizaciji programa upravljanja ZP kojima upravlja JKP Belosavac Žagubica.
198. Milanović, S., Vasić, Lj. (2016): *Sintezni Elaborat izvedenih radova na realizaciji programa upravljanja ZP kojima upravlja JKP Belosavac Žagubica*. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
199. Milanović, S., Vasić, Lj., Dašić, T. (2014): *Određivanje garantovanog proticaja na karstnim vrelima sa velikim sezonskim oscilacijama*, SGD, XVI Kongres geologa Srbije, ISBN 978-86-86053-14-6, COBISS.SR-ID 207194381, pp. 363-368
200. Milanović, S., Vasić, Lj., Kličković, M. (2012): *Formiranje 3D modela karstnih kanala u zoni isticanja vrela kao podloga za zahvatanje podzemnih voda u karstu*, Vodoprivreda, no. 258 – 280, pp. 169-174, Beograd
201. Milanović, P. (1979): *Hidrogeologija karsta i metode istraživanja*, HE “Trebišnjica” i Institut za korišćenje i zaštitu voda na kršu, Trebinje
202. Milanović, P. (1991): *Vrelo Perućac: Izveštaj o istražnim radovima prve faze, predlog koncepcije veštačke regulacije proticaja*. Program istražnih radova. Fond str. dok. Energoprojekt. Beograd.
203. Milanović, P. (2005): *Water potential in south-eastern Dinarides*. In: Stevanović, Z. & Milanović, P. (Eds.): *Water Resources and Environmental Problems in Karst CVIJIĆ 2005*, Spec. ed. FMG. Belgrade, 249–257.
204. Milanović, P. (2000): *Geological Engineering in Karst – Dams, Reservoirs, Grouting, Groundwater Protection, Water tapping, Tunneling*. Zebra publ. Ltd. Belgrade, pp. 347
205. Milanović, P., Milanović, S., (2000): *Exploitation potential and conditions for underground storage at Perućac spring, Serbia*, Present state and future trends of Karst studies, Marmaris, Turkey
206. Miletto, M., Van der Gun, J., Connor, R. 2022: *State of groundwater resources*; In: United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*. UNESCO, Paris, pp. 11-22
207. Milić, Č. (1962): *Glavne odlike krasa Suve planine*, Zbornik radova SANU, Geografski institut, knj. 18, Naučno delo, Beograd, pp. 93–154
208. Milovanović, B., Schuster, P., Radovanović, M., Ristić Vakanjac, V., Schneider, C. (2017): *Spatial and temporal variability of precipitation in Serbia for the period 1961–2010*. *Theor Appl Climatol* 130, 687–700 (2017). doi.org/10.1007/s00704-017-2118-5
209. Milovanović, D. (2015): *Carbonate and non-carbonate karst; mineralogy, depositional environments, rocks classifications*; In: Stevanović, Z. (Ed.) *Characterization and Engineering of Karst Aquifers – CEKA Tutorial*, CKH, FMG, UNESCO, pp. 17 – 34
210. Ministarstvo poljoprivrede i ruralnog razvoja (MPRR) (2017): *Strategija upravljanja vodama Crne Gore*, Podgorica, Crna Gora
211. Ministarstvo poljoprivrede i zaštite životne sredine (MPZŽS), 2015: *Strategija upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije*, Institut „Jaroslav Černi“, Beograd
212. Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede (MPŠV), 2001: *Vodoprivredna osnova Republike Srbije*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, BG
213. Mintz, Y., Walker G.K. (1993): *Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature*, *J. Applied. Meteor.*, 32, pp. 1305-1334

214. Mirković M, Pajović M, Buzaljko R, Kalezić M, Živaljević M. (1980): *Tumač za osnovnu geološku kartu, list Pljevlja, 1 : 100.000*, Savezni Geološki Zavod, Beograd
215. Mišetić, S., Pavlin, Ž. (2004): Approach to define ecological flow in the Republic of Croatia; In: Proceedings of the seminar „High and Low Waters“ (in Croatian), Soc. of Civil Eng., Zagreb and Croat. Hydrol. Soc., Zagreb, pp. 205-221
216. Mohammadi, Z. & Mali, S. (2016): *Characterization of karst system using modelling of rainfall-discharge relationship: Pireghar and Dimeh springs, Zagros region, Iran*; In: Stevanović, Z., Krešić, N. & Kukurić, n. (Eds.) *Karst without boundaries; Selected paper on hydrogeology*, IAH, CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 215 – 224
217. Mojsilović, S., Baklajić, D., Đoković, I., Avramović, V. (1978): *Tumač za list OGK Titovo Užice*, Savezni geološki zavod, Beograd
218. MONSTAT, (2011): *Popis stanovništva, domaćinstava i stanova u Crnoj Gori 2011. godine*, Podgorica
219. Mrdak, D., Bajković, I., Novaković, D., Đurašković, P., Rakočević, J., Šundić, M. (2012): *Procjena ekološki prihvatljivog protoka za Rijeku Crnojevića: Faza I: Izvještaj o testiranju metodologija za potrebe izrade pravilnika o ekološki prihvatljivom protoku*, WWF Mediterranean Programme Office and NGO Green Home, Podgorica, Montenegro
220. Mudry, J. (1990): *Les courbes flux chimique-débit et le fonctionnement des aquifères karstiques*. *Revue des Sciences de l'Eau* 4 (1). pp. 19-37
221. Nathan R.J., McMahon T.A., (1990): *Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis*. *Water Resources Research*, v. 26, no 7. pp. 1465- 1473
222. Nathan, R.J., McMahon, T.A. (1990): *Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses*. *Water Resources Research*, 26, 7, 1465-1473. doi.org/10.1029/WR026i007p01465
223. Nolan, B., Fienen, M., Lorenz, D. (2015): *A statistical learning framework for groundwater nitrate models of the Central Valley, California, USA*. *Journal of Hydrology* 531 (3): 902 – 911.
224. Olujić J., Karović J. (1986): *Tumač za list OGK Višegrad*, Savezni geološki zavod, Beograd
225. Padilla A. & Pulido-Bosh A., (1995): *Study hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis*. *J Hydrol.* 168. Elsevier Sci. pp.73-89
226. Panday, S., Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, M. & Hughes, J.D. (2013): *MODFLOW-USG Version 1: an Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite-difference Formulation*. US Geological Survey, Techniques and Methods, 6-A45.
227. Pavlović, R., Čupković, T., Marković, M. 2003: *Geomorfologija*, univerzitetski udžbenik, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, pp.461
228. Perrin, J. (2003): *A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers*. PhD thesis. Centre D'Hydrogeologie University of Neuchâtel, Faculte des sciences Institut de Géologie; p. 187
229. Petit, K. & Michon, J. (2015): *L'état des eaux de surface et des eaux souterraines*, Ed. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), 12 p. http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/evaluation_2010-2013_201506.pdf
230. Petrič, M. (2001): *The role of accurate recharge estimation in the hydrodynamic analysis of karst aquifers*. *Acta Carsologica*, 30, 69-84.
231. Petrič, M. (2002): *Characteristics of Recharge-Discharge Relations in Karst Aquifer*. Inštitut za reziskovanje krasa ZRC SAZU, Založba ZRC. Postojna-Ljubljana. p.154

232. Petrović, B. (2020): *Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine*; Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
233. Petrović, B. & Marinović, V. (2019): *Groundwater turbidity dynamics in karst hydrogeological system. Case study: Suva Planina Mt., SE Serbia*; In: Proceedings of the 4th Conference of the IAH CEG and Guide of GEOTRIP of the IAH Karst Commission; IAH National Chapter of Serbia; The Serbian Geological Society (SGS), Karst Commission, p. 75 – 77; ISBN: 978-86-86053-22-0
234. Petrović, B., Marinović, V., Stevanović, Z., Milanović, S., Vasić, Lj. (2022): *Režim izdanskih voda karstnog platoa Babine (JZ Srbija, Prijepolje)*, Zbornik radova Odbora za kras i speleologiju, SANU, knj. XI, Beograd, Srbija, pp. 29- 51;
235. Petrović, J. (1958): *Kraška vrela Suve planine i njihov značaj*, Zbornik radova Geografskog instituta PMF, sv. 5, Beograd, pp. 45-60
236. Petrović, J. (1974): *Krš istočne Srbije*, Posebna izdanja Srpskog geografskog društva, sv. 40, Srpsko geografsko društvo, p. 96
237. Petrović, J. (1976): *Jame i pećine SR Srbije*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, p. 512
238. Petrović, J. (1982): *Cetinjske pećine*, PMF-Institut za geologiju, Novi Sad
239. *Plan upravljanja vodnim resursima (PUVR) sliva Save u Bosni i Hercegovini (2015)*, Eptisa, Sarajevo, Bosna i Hercegovina
240. *Plan upravljanja vodnim resursima (PUVR) sliva Save u Bosni i Hercegovini (2021)*, Agencija za vodno područje rijeke Save, Sarajevo, Bosna i Hercegovina
241. Poehls, D. J. & Smith, G. J. (2009): *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*, 1st Edition, Elsevier, ISBN: 9780125586900
242. Pravilnik o načinu određivanja ekološki prihvatljivog protoka., Službene novine Federacije BiH, broj 70/06)
243. Prohaska, S. & Ristić, V. (1996): *Hidrologija kroz teoriju i praksu*, univerzitetski udžbenik, RGF UoB, p.525
244. Prohaska, S. (1974): *Sverhdolgosrochnny prognozy stoka rek Jugoslavii geofizicheskim i dinamiko-statcheskim metodami*. Kandidatska disertacija, LGMI, Leningrad
245. Prohaska, S. (1981): *Stohastički model za dugoročno prognoziranje rečnog oticaja*. Posebno izdanje godišnjaka „Vode Vojvodine“, Novi Sad. P- 106
246. Prohaska, S. (2003): *Hidrologija. Deo I*. Rudarsko-geološki fakultet; Institut za vodoprivredu "J. Černi"; Republički hidrometeorološki zavod. Beograd. 427 p.
247. Prohaska, S., Isailović, D., Majkić, B., Arsić, M. (2007): *Metodologija za izradu vodoprivrednog bilansa Srbije*; VODOPRIVREDA 0350-0519, 39 (2007) 229-230 p. 253-274; UDK: 551.48/628:33
248. Radovanović, S. (1897): *Podzemne vode (izdani, izvori, bunari, terme i mineralne vode)*. Srpska književna zadruga (Srpska književna zadruga), br.42, str. 1-152, Beograd
249. Radulović, M. (1996): *Hidrogeologija karsta Crne Gore*, Doktorska disertacija, DHG, RGF, UB, pp. 201
250. Radulović, M. (2000): *Hidrogeologija karsta Crne Gore*, monografija, Geološki zavod Crne Gore, Spec. izd. geol. gl. vol. XVIII, Podgorica, pp. 271
251. Radulović, M., Radulović, V. (1982): *Metodologija izrade i značaj hidrogeološke karte Crne Gore 1:100.000 za prostorni plan Republike*. Jugoslovenski simpozijum za prostorno i urbanističko planiranje u seizmičkim uslovima, Herceg Novi
252. Radulović, M., Vujisić, P. (1986): *Prilog metodologiji istraživanja akumulacija podzemnih voda i provodnih zona u karstnim terenima*, Geološki gl., knj. XIII, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore, Titograd

253. Radulović, M., Ivanović, Z., Radulović, M.M., Blagojević, M., Jovanović, M. (2016): *Mjesto i uloga podzemnih voda u strategiji upravljanja vodnim resursima Crne Gore*; Zbornik radova XV srpskog hidrogeološkog simpozijuma sa međunarodnim učešćem, Kopaonik 2016, RGF, UoB
254. Radulović, M. M. (2012): *Višeparameterska analiza prihranjivanja karstne izdani na primerima iz sliva Skadarskog jezera*, dokt. disert., UB, RGF, DHG, p. 261
255. Radulovic, M., Stevanovic, Z., Radulovic, M. (2012): *A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies*. Environ Earth Sci 65, 2221–2230. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1378-0>
256. Radulović, M. M., Radulović, M., Stevanović, Z., Sekulić, G., Radulović, V., Burić, M., Novaković, D., Vako, E., Blagojević, M., Dević, N., Radojević, D. (2015): *Hydrogeology of the Skadar Lake basin (Southeast Dinarides) with an assessment of considerable subterranean inflow*. Environmental Earth Sciences, Volume 74, Issue 1, pp 71-82, doi: 10.1007/s12665-015-4090-7; Publisher: Springer 2015; ISSN 1866-6280
257. Radulović, V. (1974): *Ponori-jame kao pokazatelji napredovanja karstifikacije duž profila od Kotora do Crnojevića rijeke*. Krasoslovni zbornik VI/7. Slovenska akademija znanosti in umetnosti. Ljubljana
258. Reed S.M. (2003): *Soil-Water Budget. Part I. Methodology and results*. FAO/UNESCO Water Balance of Africa Project. <http://www.ce.utexas.edu>
259. Republički zavod za statistiku Srbije (RZSS), (2012): *Popis stanovništva, domaćinstava i stanova 2011. u Republici Srbiji 2011 – Starost i pol, podaci po naseljima*
260. Rimmer, A. & Hartmann, A. (2012): *Simplified conceptual structures and analytical solutions for groundwater discharge using reservoir equations*, in Water Resources Management and Modeling, edited by D. P. C. Nayak, pp. 217–238, InTech, Kakinada, India.
261. Ristić, V. (2007): *Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela*, doktorska disertacija, RGF, UB, Beograd
262. Ristić Vakanjac, V., Stevanović, Z., Milanović, S. (2012): *Water Resources Assessment and Availability in the test areas of IPA 1- Current stage and forecast*; In: Stevanović, Z., Ristić-Vakanjac, V. and Milanović, S. (eds.) *Climate changes and water supply*, Spec. ed., FMG, UB, Belgrade, pp. 133-176
263. Ristić Vakanjac, V. (2015): *Forecasting Long-Term Spring Discharge*; In: Stevanović Z. (ed.) *Karst Aquifers-Characterization and Engineering*. Prof. Practice in Earth Sciences, Springer, pp. 435-455, Cham. 10.1007/978-3-319-12850-4_15
264. Ristić Vakanjac, V., Stevanović, Z., Maran Stevanović, A., Vakanjac, B., Čokorilo Ilić, M. (2015): *An example of karst catchment delineation for prioritizing the protection of an intact natural area*, En. Earth Sci 74, 7643–7653, doi.org/10.1007/s12665-015-4390-y
265. Ristić-Vakanjac, V., Marinović, V., Nikić, Z., Polomčić, D., Čokorilo-Ilić, M., Bajić, D. (2016): *Verification of Catchment Size Using the Water Balance Equation*; Proceedings of 3rd Congress of Geologist of Republic of Macedonia, Struga, Macedonia pp. 191-198
266. Ristić Vakanjac, V., Čokorilo Ilić, M., Papić, P., Polomčić, D. Golubović, R. (2018): *AR, CR and ARCR modeling for simulations and analyses of karst groundwater quality parameters*. Geološki anali Balkanskoga poluostrva, 79(1), pp. 71-78. doi: 10.2298/GABP1879071R.
267. Roje-Bonacci, T. & Bonacci, O. (2013): *The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia)*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13:, 2041-2052

268. Rorabaugh, M.I., (1964): *Estimating changes in bank storage and ground water contribution to streamflow*. International Association of Scientific Hydrology. pub. 63, pp. 432-441.
269. Rutledge A.T. (2007): *Program user guide for PART*. www.USGS.gov. 8 p.
270. Salas, J.D. (1993): *Analysis and modeling of hydrologic time series*. In: Maidment DR (ed) *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, pp 19.1–19.72
271. Salas, J.D., Delleur, J.R., Yevjevich, V.M., Lane, W.L. (1985): *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado
272. Schutten, J., Verweij, W., Hall, A., Scheidleder, A. (2011): *Technical report on groundwater dependent terrestrial ecosystems*; Tech. Report No. 6- 2011 – 056, Brussels
273. Searcy, R.K. (1959): *Flow-duration curves. Manual of Hydrology: Part 2. Low-flow techniques*. Geological Survey Water-Supply, US Government Printing Office, pp. 33.
274. Sekulić, G. & Radulović, M.M. (2019): *The Hydrology and Hydrogeology of Montenegro*; In: Pešić, V., Paunović, M., & Kostianoy, A. (Eds.), *The Rivers of Montenegro*, Hdb Env Chem, DOI 10.1007/698_2019_413
275. Shoemaker, W. B., E. L. Kuniandy, S. Birk, S. Bauer, E. D. Swain (2008): *Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005*, US Department of the Interior, US Geological Survey, Reston, Va.
276. Shumway, R.H. & Stoffer D.S. (2017): *Time Series Analysis and Its Applications With R Examples*; Springer
277. Simmons, C., Aureli, A., Kukurić, N. (2022): *Groundwater management*; In: United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*. UNESCO, Paris, pp. 163-170
278. Sivakumar, B. (2017): *Chaos in Hydrology – Bridging Determinism and Stochasticity*; ©Springer Science+Business Media Dordrecht 2017, ISBN 978-90-481-2551-7; DOI 10.1007/978-90-481-2552-4
279. Skopljak. F. (2000): *Hidrogeološka istraživanja Igmansko-Bjelašničkog karstnog masiva i njihov značaj za vodosnabdjevanje grada Sarajeva*, magistarski rad, RGGF - Tuzla
280. Skopljak, F. (2006): *Odnosi podzemnih voda područja Ilidže kod Sarajeva*, doktorska disertacija, Pos.izdanje Geol.glasnika knj.XXIX., Federalni zavod za geologiju.
281. Skopljak, F., Žigić, I. (2003): *Proračun hidrogeoloških parametara i rezervi podzemnih voda Igmansko-Bjelašničkog karstnog masiva analizom krive pražnjenja Vrela Bosne*, Geološki gl. br.35 , p. 309-319., Građ. fak. Sarajevo - Institut za geologiju, Sarajevo.
282. Skopljak, F., Hrvatović, H., Žigić, I., Pašić - Škripić, D. (2011): *Novi prilog hidrogeološkoj rejonizaciji Bosne i Hercegovine*, Zbornik radova IV Savjetovanja geologa Bosne i Hercegovine sa međunarodnim učešćem, Sarajevo.
283. Skopljak, F., Zolj, S. (2020): *Katastarski list vrela Bosne*; Federalni zavod za geologiju, Sarajevo
284. Slišković, I. (1983): *OHGK list Sarajevo- Izvjestaj za IV kvartal III faze istraživanja (godišnji)*, Geoinzenjering-Ilidža, Sarajevo
285. Sloto R.A., Crouse M.Y. (1996): *HYSEP: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis*. US Geological Survey. Water-resource investigations report 96-4040. Lemoyne, Pennsylvania. 46 p.
286. Smakhtin, V.U. (2001): *Low flow hydrology: A review*. Journal of Hydrology, 240, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
287. Springer, A. E., Stevens, L. E., Anderson, D. E., Parnell, R. A., Kreamer, D. K., Levin, L., Flora, S. P. (2004): *Chapter 4: A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria*. page 31

288. Stadler, H., Skritek, P., Sommer, R., Mach, R., Zerobin, W., Farnleitner, A.H. (2008): *Microbiological monitoring and automated event sampling at karst springs using LEO-satellites*. *Wat Sci Tech* 58(4): 899–909
289. Stadler, H., Klock, E., Skritek, P., Mach, R., Zerobin, W., Farnleitner, A.H. (2010): *The spectral absorption coefficient at 254nm as a near real time early warning proxy for detecting faecal pollution events at alpine karst water resources*. *Wat Sci Tech* 62(8): 1898–1906
290. Stadler, H., Leis, A., Plieschnegger, M., Skritek, P., Farnleitner A.H. (2012): *Event based monitoring and early warning system for groundwater resources in alpine karst aquifers*; In: Maloszewski, P., Witczak, S., Malina, G. (Eds.) *Groundwater Quality Sustainability*; IAH Selected papers on hydrogeology, Book no. 17; CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, PP. 89 – 100
291. Stepanović, B. (1962): *Principi opšte hidrogeologije* (Izd. preduzeće Rad Beograd)
292. Stevanović Z. (1981) *Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje*, Magistarski rad, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
293. Stevanović, Z. (1982): *Hidrogeološke karakteristike i bilans izdanskih voda sliva vrele Mlave*. *Naš krš*, 6: 12, 13, str. 67–78. Sarajevo
294. Stevanović, Z. (1987): *Hidrogeološke karakteristike ležišta karstnih izdanskih voda istočne Srbije sa aspekta mogućnosti vodosnabdevanja*; Dokt. Dis., UoB, RGF, DHG
295. Stevanović, Z. (1990): *Uvod u Naučno-istraživački rad u oblasti hidrogeologije (sa osnovama opšte naučne metodologije)*, univerzitetski udžbenik, UB, RGF, Beograd
296. Stevanović, Z. (1991): *Hidrogeologija karsta Karpato-balkanida istočne Srbije i mogućnosti korišćenja za vodosnabdevanje*, monografija, Rudarsko – geološki fakultet, Institut za hidrogeologiju, Beograd, pp.245
297. Stevanović, Z. (1994): *Karst groundwaters of Carpatho – Balkanides in Eastern Serbia*. In: Stevanović, Z. & Filipović, B. (Eds.): *Ground waters in carbonate rocks of the Carpathian-Balkan Mountain range*, CBGA, pp. 203 – 237. Belgrade
298. Stevanović, Z. (1995): *Karstne izdanske vode Srbije – korišćenje i potencijalnost za regionalno vodosnabdevanje*, In: Stevanović Z. (Ed), *Vodni mineralni resursi litosfere Srbije*, Rudarsko – geološki fakultet, Institut za hidrogeologiju Beograd, pp. 77-116
299. Stevanović, Z. (1997): *Prva Cvijićeveva proučavanja karsta istočne Srbije - Osnova savremene karstne hidrogeologije*, Monografija "100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji", ed. Z.Stevanović, pp. 99-111, Pos.izd. RGF-IHG, Beograd
300. Stevanović, Z. (2010): *Regulacija karstne izdani u okviru regionalnog vodoprivrednog sistema „Bogovina“*, Pos. Izd. DHG, RGF, Beograd
301. Stevanović, Z. (2010a): *Case Study: Intake of the Bolje Sestre karst spring for the regional water supply of the Montenegro coastal area*. In: Krešić, N. & Stevanović, Z. (Eds), *Groundwater Hydrology of Springs – Engineering, Theory, Management and Sustainability*. BH, Burlington USA & Oxford UK, p. 457 – 478
302. Stevanović, Z. (2010b): *Utilization and Regulation of Springs*. In: Krešić, N. & Stevanović, Z. (Eds), *Groundwater Hydrology of Springs – Engineering, Theory, Management and Sustainability*. BH, Burlington USA & Oxford UK, p. 339 – 387
303. Stevanović, Z. (2010c): *Case Study: Major springs of southeastern Europe and their utilization*. In: Krešić, N. & Stevanović, Z. (Eds), *Groundwater Hydrology of Springs – Engineering, Theory, Management and Sustainability*. BH, Burlington USA & Oxford UK, p. 389 – 410
304. Stevanović, Z. (2011): *Menadžment podzemnih vodnih resursa*, univerzitetski udžbenik, Univerzitet u Beogradu, RGF, Departman za hidrogeologiju, Beograd, pp. 340

305. Stevanović, Z. (2015a): *Characterization of karst aquifer*. In: Karst Aquifers-Characterization and Engineering. Ed. Stevanović, Z. Series: Prof. Practice in Earth Science, Springer Intern. Publishing, Cham, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 47-126.
306. Stevanović, Z. (2015b): *Karst environment and phenomena*. In: Karst Aquifers-Characterization and Engineering. Ed. Stevanović, Z. Series: Prof. Practice in Earth Science, Springer Intern. Publishing, Cham, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 19-46.
307. Stevanović, Z. (2015c): *Budget and General Assessment of Karst Groundwater Resources*, In: Karst Aquifers-Characterization and Engineering. Ed. Stevanović, Z. Series: Prof. Practice in Earth Science, Springer Intern. Publishing, Cham, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, pP. 171 – 205
308. Stevanović, Z. (2015d): *Engineering regulation of karst springflow to improve water sources in critical dry periods*; In: Karst Aquifers-Characterization and Engineering. Ed. Stevanović, Z. Series: Prof. Practice in Earth Science, Springer Intern. Publishing, Cham, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, pp. 490 – 530
309. Stevanović, Z. (2019): *Karst waters in potable water supply: a global scale overview*. Env. Earth Science. Springer, 78: 662; doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9
310. Stevanović, Z. (2022): Korišćenje karstnih izdani u Srbiji i okolnim zemljama; In Marković, B. & Stevanović, Z. (Eds.), Knjiga apstrakata Multidisciplinarnе konferencije “Karst 2022 Značaj, stanje i perspektive korišćenja i zaštite resursa u karstu”, plenarno predavanje, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd, pp. 3-7
311. Stevanović, Z., Filipović, B., Stevanović, I. (1986): Mogućnosti zahvatanja karstnih izdanskih voda iz gornjeg sliva Mlave za vodosnabdevanje Beograda ili drugih potrošača. Zbornik radova XI Kongresa geologa Jugoslavije, knj. V, str. 93-108. Tara
312. Stevanović, Z. & Filipović, B. (1994): Hydrogeology of carbonate rocks of Carpatho – Balkanides. In: Stevanović, Z. & Filipović, B. (Eds.): Ground waters in carbonate rocks of the Carpathian-Balkan Mountain range, CBGA, pp. 35 – 113. Belgrade
313. Stevanović Z. & Radulović, M. (1997): *Regulacija karstne izdani kao osnov za racionalno korišćenje vodnog potencijala - primeri iz Srbije i Crne Gore*. Zbor. rad. Konferencije „Podzemne vode kao izvorišta“, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, 445-465. Beograd
314. Stevanović, Z. & Mijatović, B. (2005): *Cvijic and karst / Cvijic et karst*, Monograph: Spec. ed of Board of Karst and Speleology SANU, Belgrade, 405 p.
315. Stevanović, Z., Jemcov, I, Milanović, S. (2007): *Management of karst aquifers in Serbia for water supply*; Environmental Geology; Springer, ISBN/ISSN: 0943-0105; DOI: 10. 1 007/s0 025 4 -006-0393-z;
316. Stevanović, Z., Papić, P. (2008): *The origin of groundwater*. In: Dimkić, M., Brauch, HJ, Kavanaugh, M. (Eds) Groundwater management in large river basins. IWA Publishing, London, pp. 218–246
317. Stevanović, Z.; Hajdin, B.; Ristić Vakanjac, V.; Dokmanović, P.; Milanović, S.; Petrović, B. (2010): *Bilans podzemnih voda u Srbiji (Ocena rezervi podzemnih voda Srbije i mogućnosti regulacije izdani)*, God. izv. za grupu Strateških projekata Min. ŽSRPP i Direkcije za vode Srbije real. od RGF, IJČ i GIS, Fond str. dok. RGF, Beograd
318. Stevanović, Z., Eftimi, R. (2010): *Karstic sources of water supply for large consumers in Southeastern Europe – sustainability, disputes and advantages*. Geologia Croatica, 63 (2), 179-185.
319. Stevanović, Z., Ristić-Vakanjac, V. and Milanović, S. (eds.) (2012): *Climate changes and water supply (SE Europe Cooperation Programme)*, Spec. ed., Faculty of Mining & Geology, 556 pp. University of Belgrade, Belgrade

320. Stevanović, Z., Marinović, V., Merdan S., Skopljak, F., Jolović, B. (2015): *Koncept izrade hidrogeoloških podloga za planove upravljanja rečnim slivovima*, Zbornik radova I Kongresa geologa Bosne i Hercegovine sa međunarodnim učešćem, Udr. geologa BiH, pp. 150-151 (Full. pap. CD-Rom), Tuzla
321. Stevanović, Z. & Marinović, V. (2015): *River Basin Management Plan for Sava River in Federation of B & H*, Volume 4 Groundwater. Technical documentation of the IPA Project "Strengthening Capacity in Water Sector of Bosnia & Herzegovina". – Sarajevo, Bosnia & Herzegovina. Eptisa & Hydroplan.
322. Stevanović Z., Dokmanović P. (2015): *Projekat proširenja mreže stanica podzemnih voda u Srbiji*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Departman za hidrogeologiju, fondovska dokumentacija.
323. Stevanović Z., Kukurić, N., Pekaš, Ž., Jolović B., Pambuku A., Radojević D., (2016): *Dinaric Karst Aquifer – One of the world's largest transboundary systems and an ideal location for applying innovative and integrated water management*, In: Stevanović Z., Kresic N., Kukuric N. (eds.) *Karst Without Boundaries*, CRC Press/Balkema, EH Leiden; Taylor & Francis Group, London, pp. 3-25
324. Stevanović, Z., Petrović, B., Milanović, S. (2018): *Elaborat o zonama sanitarne zaštite izvorišta „Seljašnica“ (Opština Prijepolje)*, UB-RGF-DHG, Beograd, str. 113
325. Stevanović, Z., Petrović, B., Milanović, S. (2020a): *Prvi elaborat o rezervama izvorišta podzemnih voda „Seljašnica“*, Opš. Prijepolje, UB-RGF-DHG, Beograd, str. 134
326. Stevanović, Z.; Petrović, B.; Marinović, V. (2020b): *Završni izveštaj trogodišnjeg projekta Operativni monitoring podzemnih voda Republike Srbije*; DHG, RGF, UB, Beograd
327. Stevanović, Z. & Marinović, V. (2020): *A methodology for assessing the pressures on transboundary groundwater quantity and quality – experiences from the Dinaric karst*. *Geologia Croatica* (2020) Vol. 73 No. 2, 107 – 118; <https://doi.org/10.4154/gc.2020.08>
328. Stevanović Z., Blagojević M. (eds.) (2021): *Hydrogeology and climate changes impact on aquifer systems of Drina River Basin with special emphasis on Durmitor Mountain area*, Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management of Montenegro, ISBN: 978-86-85799-22-8, COBISS.CG-ID: 17177348, 306 p.
329. Stevanović Z., Petrović B., Marinović V., Radojević D., Samolov V. (2021): *Geology and Hydrogeology of Studied Šavnik / Durmitor Area*, In: Stevanović, Z. & Blagojević, M. (Eds.) *Hydrogeology and Climate Changes Impact on Aquifer Systems of Drina River Basin with special emphasis on Durmitor Mountain area*, Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management of Montenegro, ISBN: 978-86-85799-22-8, COBISS.CG-ID: 17177348, pp. 78-161
330. Stevanović, Z. & Maran Stevanović, A. (2021): *Monitoring as the Key Factor for Sustainable Use and Protection of Groundwater in Karst Environments—An Overview*. *Sustainability*. 2021; 13(10):5468. <https://doi.org/10.3390/su13105468>
331. Stevanović, Z., Stevanović, A.M., Pekaš, Ž., Eftimi, R., Marinović, V. (2022): *Environmental flows and demands for sustainable water use in protected karst areas of the Western Balkans*. *Carb. & Evap.* 37, 3 (2022). doi.org/10.1007/s13146-021-00754-1
332. Stevanović, Z., Pekaš, Ž., Maran Stevanović, A., Eftimi, R., Radulović, M. (2022): *Springs as Essential Water Sources for Dependent Ecosystems in Karst*. In: Pešić, V., Milošević, D., Miliša, M. (eds) *Small Water Bodies of the Western Balkans*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86478-1_1
333. Stevens EL, Schenk RE, Springer EA (2021) *Springs ecosystems classification*. *Ecol Appl* 31(1):e2218, <https://doi.org/10.1002/eap.2218>
334. Stojković, M. (2015): *Dugoročne promene u stohastičkoj strukturi hidroloških vremenskih serija*; doktorska disertacija, Građevinski fakultet, UoB

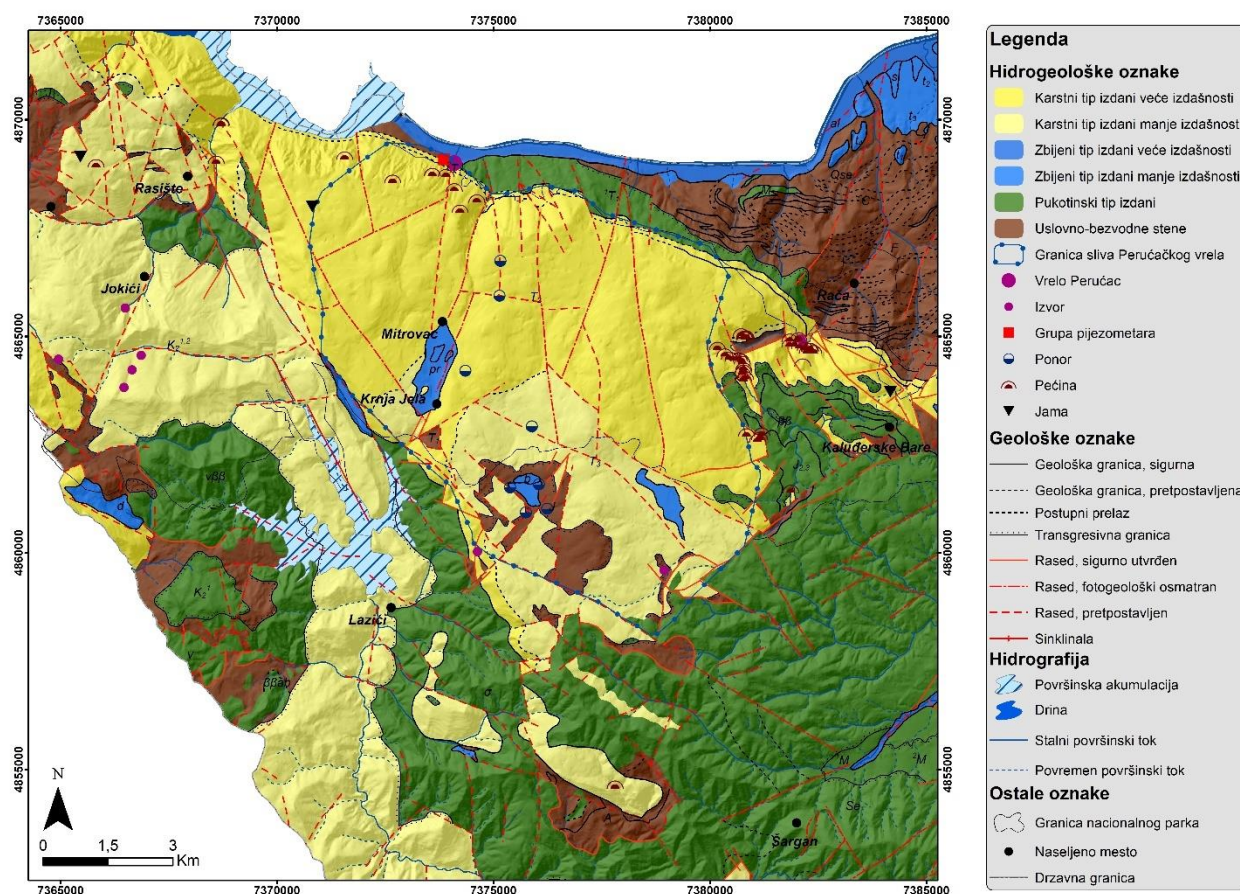
335. Sweeting, M.M. (1972); *Karst landforms*. Macmillan Press, London
336. Šarin, A. (1983): *Hydrogeologic regional classification of the karst of Yugoslavia*. In: Hydrogeology of the Dinaric Karst. Mijatovic B (Ed.). Spec. ed. Geozavod, pp. 35–44
337. Tesoriero, A.J., Inkpen, E.L., Voss, F.D. (1998). *Assessing ground-water vulnerability using logistic regression*. Proceedings for the Source Water Assessment and Protection 98 Conference, Dallas, pp. 157 – 165
338. Thordarson, F. Ø. (2011): *Grey Box Modelling of Hydrological Systems: With Focus on Uncertainties*. Technical University of Denmark. IMM-PHD-2011, p. 263
339. Trček, B. (2003): *Epikarst zone and karst aquifer behaviour – A case study of the Hubelj catchment, Slovenia*, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, p. 100
340. Tritz, S., Guinot, V., Jourde, H. (2011): *Modelling the behaviour of a karst system catchment using non linear hysteretic conceptual model*; J. of Hydr. 397(3-4): 250-262
341. Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduno, H., Nanni, M., (2002–2005): *Groundwater monitoring requirements for managing aquifer response and quality threats. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools, Briefing Note Series Note 9*, GW MATE GW Management Advisory Team), The World Bank, Washington, DC, 10 p.
342. Tularam, G. A. & Ilahee, M. (2008): *Exponential Smoothing Method of Base Flow Separation and Its Impact on Continuous Loss Estimates*. American Journal of Environmental Sciences, 4(2), 136-144. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.136.144>
343. Turk, J., Malard, A., Jeannin, P., Gabrovšek, F., Petrič, M. et al. (2014): *Hydrogeological interpretation of the alpine karst massif by application of a Karsys approach (Kanin case study, Julian Alps)*. Hydrological Processes, Published online in Wiley Online Library: DOI: 10.1002/hyp.10313 p.
344. Turk, J., Malard, A., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Petrič, M. et al. (2013): *Interpretation of hydrogeological functioning of a high karst plateau using the KARSYS approach: the case of Trovsko-Banjška planota (Slovenia)*. Acta Carsologica, 42(1): 61-74
345. U.S. Army Corps of Engineers (1998): *Engineering and Design Runoff from Snowmelt*. CECW-EH Engineer Manual 1110-2-1406. Department of the Army. Washington, DC 20314-1000. 142 p.
346. United Nations, The United Nations World Water Development Report 2022: *Groundwater: Making the invisible visible*. UNESCO, Paris.
347. Vasić, Lj. (2017): *Geneza i uslovi cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva*, RGF, UB, doktorska disertacija, p. 393
348. Vasić, Lj., Milanović, S., Petrović, B., Stevanović, Z. (2013): *Uticaj cirkulacije podzemnih voda u karstu na pojavu bakteriološkog zagađenja*; Vodoprivreda 0350-0519, 45 (2013) 264-266 pp. 219-229
349. Vasić, Lj., Stevanović, Z., Milanović, S., Petrović, B. (2015): *Attenuation of bacteriological contaminants in karstic siphons and relative barrier purifiers: case examples from Carpathian Karst in Serbia*. In: Andreo, B., F. Carrasco, J. Durán, P. Jiménez, J. LaMoreaux (Eds.). Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems. Environmental Earth Sciences, 1. Berlin, Heidelberg, Springer, 449–456
350. Vasić, Lj., Milanović, S., Stevanović, Z., Palcsu, L. (2020): *Definition of groundwater genesis and circulation conditions of the complex hydrogeological karst system Mlava–Belosavac–Belosavac-2 (eastern Serbia)*. Carbonates Evaporites 35, 16 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00550-3>
351. Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P. (2006): *Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method*. Hydrogeol J 14(6):912–925. 10.1007/s10040-006-0023-6

352. Vogel, R.M., Fennessey, N.M. (1994): *Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals*. Journal of Water Resources Planning and Management, 120, 4, 485-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))
353. Vrba J & Zoporozec A, 1994: *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, International Contributions to Hydrogeology, IAH, Vol. 16, p. 131, Hannover
354. Vujisić T. et al. (1971): *OGK SFR Jugoslavije, list Bela Palanka K 34-33 tumač i karta, R=1:100.000*, Savezni geološki zavod (SGZ), Beograd, p. 69
355. Vukotić, V. (1986): *Mere zaštite od poplave u prostornim i regulacionim planovima Cetinja*, Savjetovanje o poplavama i odvodnjavanju Cetinjskog polja, SO Cetinje
356. Wahl, K.L., & Wahl, T.L., (1995) *Determining the flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas*. Proceedings of Texas Water, '95, a component conference of the first Int. Con. on water res. Eng. American Society of Civil Eng. San Antonio, Texas pp. 77–86.
357. Wang, H., Peng, J., Wang, B., Lu, X., Zheng, J.Z., Wang, K., Tu, X.M., Feng, C. (2017): *Inconsistency Between Univariate and Multiple Logistic Regressions*. Shanghai Arch Psychiatry. 2017 Apr 25;29(2):124-128. doi: 10.11919/j.issn.1002-0829.217031.
358. *Water Framework Directive WFD 2000/60, Official Journal of EU, L 327/1, Brussels*
359. White, B. W. (2010): *Springwater geochemistry*; In: Kresic, N. & Stevanovic, Z. (Eds) *Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management and sustainability*, BH, Elsevier pp. 231 – 268
360. Williams P.W. (2004): *The epikarst: evolution of understanding*, in: Jones, W.K., Culver, D.C. & Herman, J.S. (Eds.) – *Epikarst*. Charles Town, WV: Karst Waters Institute, Special Publication 9: 11-22
361. Williams, P.W. (1983): *The role of subcutaneous zone in karst hydrology*. J. Hydrol., 61, Elsevier Sci. pp.45-67.
362. Xu C-Y., Singh V.P. (2004): *Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate*. Kluwer Academic Pub. Water Resources Management No 18. pp. 591–612
363. Yang, D., Goodison, E.B., Ishida, S. (1998): *Adjustment of daily precipitation data at 10 climate stations in Alaska: Application of World Meteorological Organization intercomparison results*. Water Resources Research, Vol. 34, No. 2, pp. 241–256
364. Yevjevich, V.M. (1972): *Stochastic processes in hydrology*. Water Resour Publ, Fort Collins, Colorado
365. Yu, P.S., Chen, C.J., Chen, S.J., Lin S.C., (2001): *Application of Grey Model Toward Runoff Forecasting*; Journal of the American Water Resources Association, Vol. 37, Issue 1, p. 151 – 166, doi: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05482.x
366. Zavod za geološka i geozifička istraživanja (1971-1973): *Kompleksna hidrogeološka istraživanja Cetinjskog polja (Način korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje Cetinja – Idejni projekat)*, Beograd
367. Zavod za vodoprivredu Bijeljina (ZZVB) (2012): *Strategija integralnog upravljanja vodama Republike Srpske do 2024. godine*
368. Zavod za vodoprivredu Sarajevo (ZZVS) & Zavod za vodoprivredu Mostar (ZZVM) (2012): *Strategija upravljanja vodama Federacije Bosne i Hercegovine 2010. – 2022.*
369. Zelenakova, M., Negm, A.M., Minea, I. (2020): *Introduction to "Water Resources Management in Balkan Countries"*. In: Negm, A., Romanescu, G., Zelenakova, M. (eds) *Water Resources Management in Balkan Countries*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22468-4_1
370. Žigić, I., Pašić-Škripić, D., Srkalović, D., Ališehović, H., Alić, E. (2009): *Tijela podzemnih voda podsliva rijeke Bosne sa neposrednim slivom rijeke Save na teritoriji Federacije Bosne i Hercegovine, Knjiga III*; Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, pp. 240

371. Živaljević, R. (1992): *Hidrološka analiza kretanja kraških voda na primjeru sliva Rijeke Crnojevića*, doktorska disertacija, Univerzitet Veljko Vlahović, Građevinski fakultet, Titograd
372. Živanović, V. (2011): *Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije*, Magistraska teza, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
373. Živanović, V., Jemcov, I., Dragišić, V. (2022): *Vulnerability methods in hard rock formation as a basis for groundwater risk assessment – from resource to source*; *Geologia Croatica* (2022) Vol. 75 No. 3, 381 – 392; <https://doi.org/10.4154/gc.2022.23>
374. Žunić, L. (2015): *Uloga i značaj termomineralnih voda za razvoj Sarajevske regije*; *Voda i mi*, Vol. 90, God. XVIII; pp. 13-19; Agencija za vodno područje rijeke Save, Sarajevo, BiH

13 PRILOZI

PRILOG 1. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Perućac (Prema OGK listovi Titovo Užice K34-4 i Višegrad K34-3)



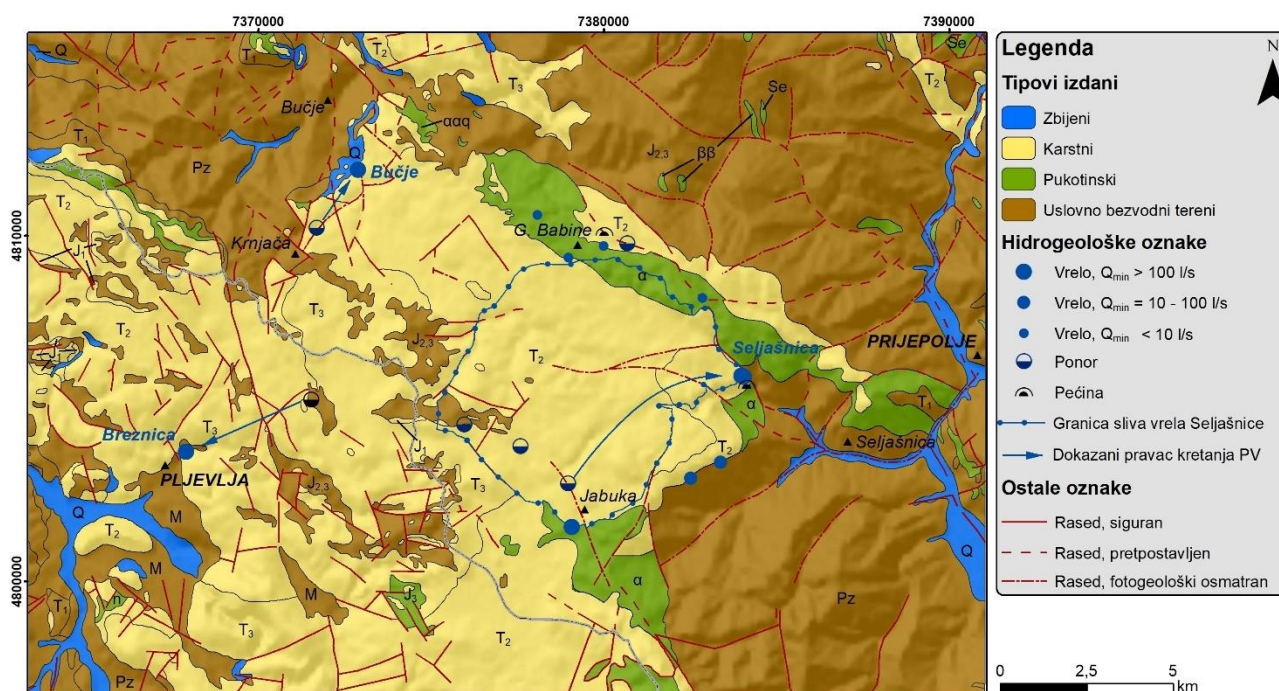
PRILOG 2. Karakterizacijska tabela karstnog sistema vrela Perućac

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)
Dunav	Drina	Dinaridi	Perućac	75
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem vrela Perućac prostire se na području masiva Tare, od od Ljutog polja na jugu do Beserovine i Perućca na severu i od Konjske reke na zapadu do Šljivovice na istoku. Nadmorske visine osciliraju od 244 do 1544 mnm.			
Klimatske karakteristike (MS Zlatibor)	Prosečna suma padavina (mm)		1027	
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		8,9	
	Prosečna visina snega (cm)		27,4	
Rečna mreža	Na karstnim terenima izostaje. Isključivo se javlja na vodonepropusnim terenima			
Značajniji geomorfološki objekti	Skaršćene rečne doline Branevski Do, Barski Do, Gorušica i Krnja Jela; uvale Ljuto polje i Dobro polje, ponori Bulibanovačkog potoka, u Mitrovcu i Krnjoj Jeli; Soviljačka, Vidova, Jabučka, Todosina i Kozja pećina; jame u Mekotama, Velikoj Livadi, Mitrovcu i Čučkovini			
Pedologija i vegetacija	Smeđe rudo zemljište na krečnjaku; Šume četinarskog i mešovitog tipa i pašnjaci sa niskim i visokim rastinjem.			
Geološke karakteristike	Paleozojski i verfenski škriljci, krečnjaci gornjeg i srednjeg trijasa, rožnaci i peščari, serpentinisani peridotiti, amfiboliti i deluvijalno-aluvijalni slojevi			

Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Perućac	Y 7374109	X 4869059	Z 254
		Mehanizam isticanja	Descendentno vrelo		
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od kiše i snega ($I_{ef} = 63.1\%$)		
		Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od juga ka severu. Potvrđena veza Vasića ponora sa vrelom Perućac ($v=3,2$ cm/s)		
		Dreniranje (m^3/s)	Min	0,96	Max
	Q_{sr}		1,88	Q_{sr} (medijana)	1,64
	Frekvencije isticanja (m^3/s)	Q_{10}	Q_{50}	Q_{90}	
		2,6	1,64	1,36	
	Recesija	α_1	α_2	α_3	V ($\times 10^6$ m ³)
		0,067	0,018	0,0023	11,13
	Bazni oticaj	$Q_{b, min}$ (m^3/s)	$Q_{b, sr}$ (m^3/s)	$Q_{b, max}$ (m^3/s)	Q_b %
		0,95	1,59	1,98	89,3
	Autokorelacija		Q_{bazni} (dani)	$Q_{direktni}$ (dani)	Q_{ukupni} (dani)
		$r_k < 0.2$ $r_k < IP$ (95%)	77 150	32 43	37 63
	Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 2 dana u sušnoj i 3 dan u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 8 dana u sušnoj, 14 dana u vlažnoj godini			
	Ciklusi prihranjivanja	365, 140, 101, 83 i 19 dana			
	Ciklusi isticanja (dani)	Q_{bazni}	1826, 913, 456, 365 i 260		
$Q_{direktni}$		913, 365, 228, 121 i 101			
Q_{ukupni}		913, 365, 228, 121 i 101			
Kros-spektar	Dobra amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 8 dana; Srednja koherentna vrednost 0.44, uz pad $f = 0.11$ dan ⁻¹ (9 dana)				

Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane dosta tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom neispravnosću usled pojave mezofilnih i koliformnih fekalnih bakterija $CO_{12,62}^2 M_{0,24} \frac{HCO_{94}^3}{Ca_{87} Mg_{12} Na + K_1} pH_{7,47} TV_{13,02} T_{9,8} Q_{1640}$
Bilans podzemnih voda		$Q_{dyn(Q50)}$ 1,64 m ³ /s Q_{EO} 0,33 m ³ /s Q_{AP} 0,29 m ³ /s
Pritisici	Kvantitet	Nije pod pritiskom $Q_{optim} = 0,29$ m ³ /s 21,8% (Q_{zahv} / Q_{expl}), tj. 14,9% ($Q_{zahv} / I_{ef,av}$)
	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom Umerena ranjivost (17,49%), Visoka ranjivost (65,86%); Veoma nizak hazard (89,98%) Veoma nizak rizik (21,31%); Nizak rizik (72,21%)
Monitoring	Kvalitet	Ne postoji / Predloženo: Operativni monitoring
	Kvantitet	Postoji (osmatranje vodomerne letve) / Predloženo: Nadzorni monitoring
Zavisni ekosistemi		Reka Vrelo sa vodopadom i ribnjak; NP Tara

PRILOG 3. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Seljašnica (Prema OGK listovi Prijepolje (K34-16), Pljevlja (K34-15), Bijelo Polje (K34-28), Žabljak (K34-27))



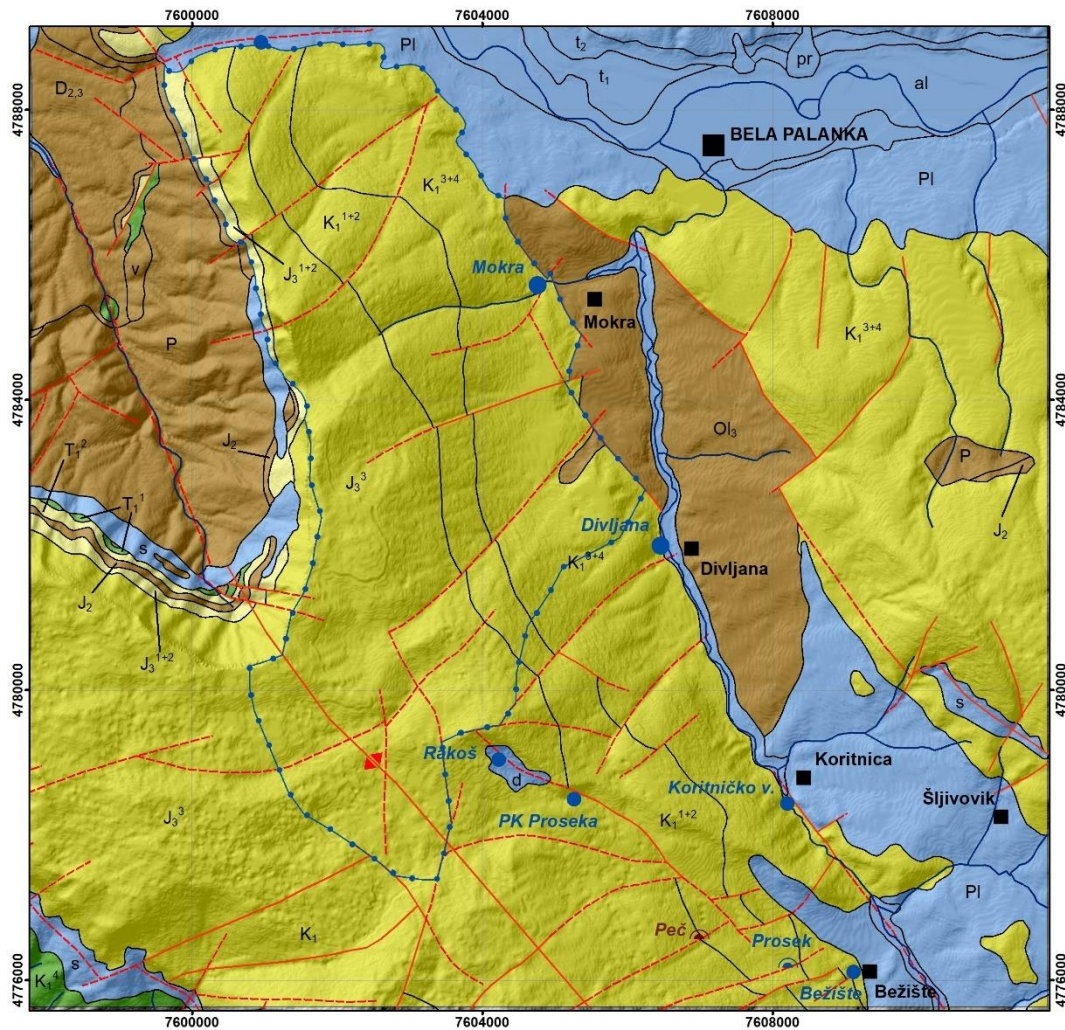
PRILOG 4. Karakterizacijska tabela karstnog sistema vrela Seljašnice

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)		
Dunav	Lim	Dinaridi	Seljašnica	43		
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem Seljašnice prostire se na području karstnog platoa Babine, od G. Babina na zapadu do Seljana na istoku i od Veljovine na severu do Jabuke na jugu. Nadmorske visine osciliraju od 830 do 1380 mnm.					
Klimatske karakteristike (MS Sjenica)	Prosečna suma padavina (mm)			840		
	Prosečna temperatura vazduha (°C)			8,2		
	Prosečna visina snega (cm)			20		
Rečna mreža	Slabo razvijena na karstnom platou. Na širem prostoru od značaja su reke Tmuša, Županjac i potok Švabare.					
Značajniji geomorfološki objekti	Ponori Švabare, Ljaljinovac, Brezovica, Vržine. Pećina Veljovina i Popova pećina					
Pedologija i vegetacija	Posmeđena rendzina na karbonatima dubine 30-50 cm; Šume četinarskog i mešovitog tipa i pašnjaci sa niskim i visokim rastinjem.					
Geološke karakteristike	Filitični škriljci i peščari, peskoviti krečnjaci i kvarcni konglomerati (Pz); Bankoviti i masivni krečnjaci (T ₂); Sprudnim krečnjacima (T ₃); Daciti (ααα), andeziti (α) i keratofiri (η); Slojeviti krečnjaci (J ₁); Ofiolitski melanž (J _{2,3}); Dijabazi (ββ) i Serpentiniti (Se); Sipari i aluvijon (Q)					
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Seljašnica		Y	X	Z
			Donje vrelo	7 384 438	4 805 829	693
			Gornje vrelo	7 384 348	4 805 898	745
		Mehanizam isticanja	Descendentno vrelo			
Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od kiše i snega ($I_{ef} = 56,47\%$). Potencijalno alogeno prihranjivanje.					

Kvantitativna karakterizacija	Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od zapada ka istoku. Potvrđena veza ponora Švabare sa vrelom Seljašnice ($v=3,14$ cm/s)			
	Dreniranje (m³/s)	Min	0,13	Max	9,47
		Q_{sr}	0,9	Q_{sr} (medijana)	0,39
	Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀	
		1,81	0,39	0,23	
	Recesija	α_1	α_2	α_3	V (x10 ⁶ m ³)
		0,135	0,037	0,00394	7,16
	Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	Q _b %
		0,13	0,53	3,4	83,5
	Autokorelacija		Q _{bazni} (dani)	Q _{direktni} (dani)	Q _{ukupni} (dani)
		$r_k < 0.2$	58	24	27
		$r_k < IP (95\%)$	103	68	68
	Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 2 dana u sušnoj i 1 dan u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 10 dana u sušnoj, 7 dana u vlažnoj godini			
	Ciklusi prihranjivanja	182, 57, 50, 28 i 18 dana			
Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}	1826, 608, 456, 365 i 101			
	Q _{direktni}	913, 365, 182, 121 i 91			
	Q _{ukupni}	365, 228, 182, 121 i 91			
Kros-spektar	Dobra amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 11 dana; Srednja koherentna vrednost 0.37, uz pad $f = 0.1$ dan ⁻¹ (10 dana); Uticaj direktnog oticaja od 14 dana				

Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane dosta tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa bakteriološkom neispravnošću (mezofilne i koliformne fekalne bakterije) i sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema. $CO_{6,81}^2 M_{0,24} \frac{HCO_{96}^3}{Ca_{84} Mg_9 Na + K_8} pH_{7,87} TV_{13,42} T_{9,7} Q_{360}$						
Bilans podzemnih voda		<table border="1"> <tr> <td>Q_{dyn(Q50)}</td> <td>0,39 m³/s</td> </tr> <tr> <td>Q_{EO}</td> <td>0,08 m³/s</td> </tr> <tr> <td>Q_{AP}</td> <td>0,06 m³/s</td> </tr> </table>	Q _{dyn(Q50)}	0,39 m ³ /s	Q _{EO}	0,08 m ³ /s	Q _{AP}	0,06 m ³ /s
Q _{dyn(Q50)}	0,39 m ³ /s							
Q _{EO}	0,08 m ³ /s							
Q _{AP}	0,06 m ³ /s							
Pritisци	Kvantitet	Potencijalno pod pritiskom 52,3% (Q _{zahnv} / Q _{expl}), tj. 19,06% (Q _{zahnv} / I _{ef,av})						
	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom Umerena ranjivost (42,16%), Visoka ranjivost (51,35%); Veoma nizak hazard (89,98%) Nizak rizik (90,54%)						
Monitoring	Kvalitet	Postoji kontinualno za izvorište Seljašnica / Predloženo: Operativni monitoring						
	Kvantitet	Postoji kontinualno za izvorište Seljašnica / Predloženo: Nadzorni monitoring						
Zavisni ekosistemi		Seljašnička reka						

PRILOG 5. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Mokra (Prema OGK listovi Niš (K34-32), Bela Palanka (K34-33), Vlasotince (K34-45))



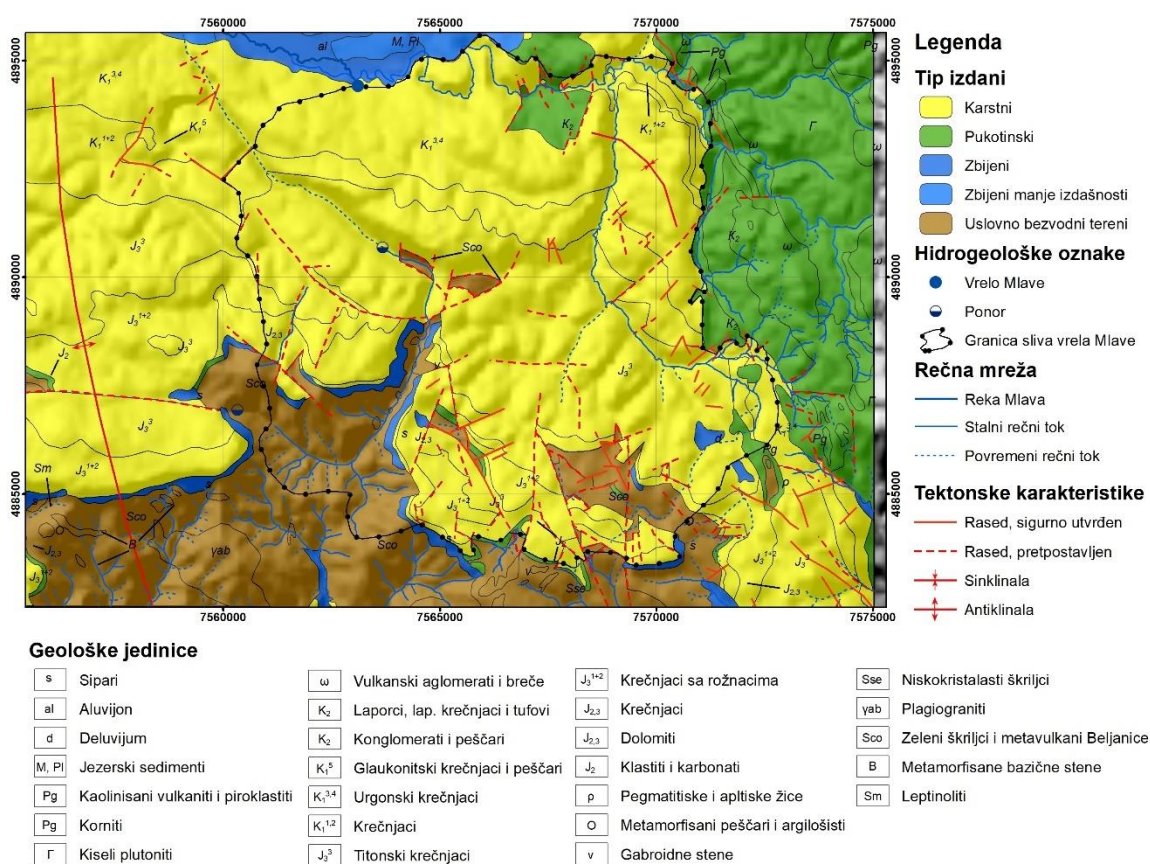
PRILOG 6. Karakterizacijska tabela karstnog sistema Mokre

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)
Dunav	Nišava	Karpatobalkanidi	Mokra	40
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem Mokra nalazi se u jugoistočnoj Srbiji, na istočnim padinama Suve planine u blizini Bele Palanke. Prostire se od vrha Preslap na zapadu do sela Moka na istoku i od Vrgudinca na severu do Treštenog vrha na jugu. Nadmorske visine unutar sliva su u dijapazonu od 380 do 1522 mnm.			
Klimatske karakteristike	Prosečna suma padavina (mm)		643,3	
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		13,1	

(MS Niš)		Prosečna visina snega (cm)	6,9			
Rečna mreža		Slabo razvijena na istočnim padinama Suve planine. Jedini rečni tokovi u podnožju su Mokranjska i Koritnička reka.				
Značajniji geomorfološki objekti		Koritnička klisura i klisura Bežiško Ždrelo. Pećina Peč i jama Prosek u Bežištu. Brojne vrtache u centralnim delovima. Odsustvo ponora.				
Pedologija i vegetacija		Terra rosa, terra fusca, podzol i buavica. Šume mešovitog tipa.				
Geološke karakteristike		Alevroliti, peščari, peskoviti glinci, konglomerati, crveni peščari, alevroliti (D _{2,3} , P); Konglomerati, peščari, krečnjaci i dolomiti (T ₁ ¹ , T ₁ ²); Peščari i peskoviti intrabiospariti (J ₂); Dolomiti i dolomitični krečnjaci, intrabiosparitski krečnjaci sa rožnacima (J ₃ ¹⁺²); Sprudni i subsprudni krečnjaci i dolomiti (J ₃ ³); Krečnjaci (K ₁ ¹⁺² i K ₁ ³⁺⁴); Peščari, peskoviti krečnjaci i laporci (K ₁ ⁴); Laporci, glinci, alevroliti, peščari, konglomerati (Ol ₃); Žuti peskovi (Pl); Deluvijalne, aluvijalne i terasne naslage (Q).				
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Mokra	Y	X	Z	
			7 604 399	4 785 653	352	
		Mehanizam isticanja	Descendentno vrelo			
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od kiše i snega (I _{ef} = 56,04%).			
		Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od Z ka I i JZ ka SI, pravcem pada istočnog krila antiklinale Suve planine. Jedini izvedeni opit trasiranja Rakoš – Gornjekoritničko vrelo (v = 4,8 cm/s)			
	Kvantitativna karakterizacija	Dreniranje (m³/s)	Min	0,066	Max	4,062
			Q_{sr}	0,524	Q_{sr} (medijana)	0,287
		Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀	
			1,21	0,28	0,12	
		Recesija	α ₁	α ₂	α ₃	V (x10 ⁶ m ³)
			0,1198	0,0305	0,00912	2,01
		Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	Q _b %
			0,01	0,332	1,28	84,6
		Autokorelacija	γ _k < 0.2	74	15	45
			γ _k < IP (95%)	98	53	112
		Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 1 dan u sušnoj i 0 dana u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 3 dana u sušnoj, 9 dana u vlažnoj godini			
		Ciklusi prihranjivanja	456, 365, 101, 83 i 9 dana			
		Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}	1826, 913, 365, 260 i 228		
Q _{direktni}	913, 456, 365, 260 i 101					
Q _{ukupni}	913, 456, 365, 260 i 101					
Kros-spektar	Dobra amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 10 dana; Srednja koherentna vrednost 0.43, uz pad f = 0.14 dan ⁻¹ (7 dana); Uticaj direktnog oticaja od 5 dana					
Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane, dosta tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa povišenim sadržajem mezofilnih i koliformnih fekalnih bakterija i mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema				
		$CO_{4,02}M_{0,32} \frac{HCO_{96}^3}{Ca_{87}Mg_{12}Na + K_1} pH_{7,35} TV_{14,77} T_{14,8} Q_{524}$				
Bilans podzemnih voda	Q _{dyn(Q50)}	0,28 m ³ /s				
	Q _{EO}	0,056 m ³ /s				
	Q _{AP}	0,028 m ³ /s				

Pritisci	Kvantitet	Pod pritiskom 88,76% (Q_{zahv} / Q_{expl}), tj. 37,3% ($Q_{zahv} / I_{ef,av}$)
	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom Umerena ranjivost (40,74%), Visoka ranjivost (55,71%); Veoma nizak hazard (90,56%) Nizak rizik (91,94%)
Monitoring	Kvalitet	Postoji kontinualno za izvorište Mokra / Predloženo: Operativni monitoring
	Kvantitet	Postoji kontinualno za izvorište Mokra / Predloženo: Operativni monitoring
Zavisni ekosistemi		Mokranjska reka

PRILOG 7. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Mlave (Prema OGK list Žagubica L34-140)



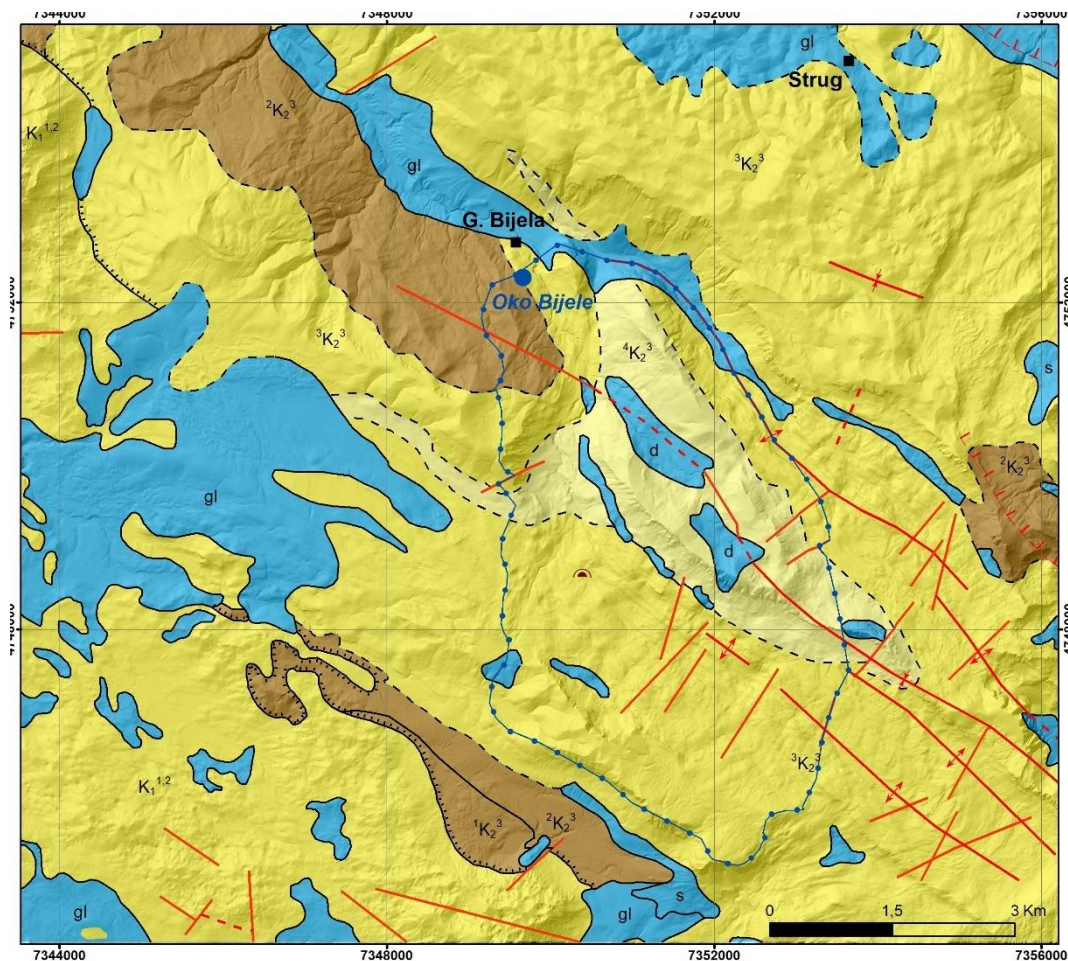
PRILOG 2. Karakterizacijska tabela karstnog sistema vrela Mlave

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)
Dunav	Dunav	Karpatobalkanidi	Mlava	115
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem vrela Mlave nalazi se u istočnoj Srbiji, na severnim padinama Beljanice u Žagubici. Prostire se od vrhova V. i M. Lisac na jugu do Žagubice na severu i od Krivulje na zapadu do Velike bare ja istoku. Nadmorske visine unutar sliva su u dijapazonu od 278 do 1339 mm.			
Klimatske karakteristike	Prosečna suma padavina (mm)		778,3	
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		8,3	

(MS Crni Vrh)		Prosečna visina snega (cm)	32,9			
Rečna mreža		Veoma slabo razvijena. Ponirući tok Suvi Do i reke M. i V. Tisnica				
Značajniji geomorfološki objekti		Suva dolinu Suvi Do; uvale Rečke i Busovate; Tisova, Ledena jama, ponor Busovate; ponor Suvi Do; ponor Crne reke				
Pedologija i vegetacija		Rendzina posmeđena na jedrom krečnjaku. Širokolisna i šume mešovitog tipa				
Geološke karakteristike		Kristalasti kompleks (leptinoliti); paleozojski škriljci; metamorfisanim peščarima i argilošistima ordovicijuma (O); Srednja jura (J ₂) - klastične i karbonatne tvorevine; Srednja i gornja jura (J _{2,3}) - dolomiti i krečnjaci; Oksford-kimeridž (J _{3¹⁺²}) - krečnjaci; titonski krečnjaci (J _{3³}); krečnjaci neokoma (K _{1¹⁺²}); Urgonski krečnjacima (K _{1^{3,4}}); Albski peščari (K _{1⁵}); gornja kreda (K ₂) - konglomerati, peščari, laporci i tufovi; vulkanski aglomerati i breče (ω)				
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Mlave	Y	X	Z	
			7 563 093	4 894 422	305	
		Mehanizam isticanja	Ascedentno vrelo			
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od kiše i snega, posredno poniranjem površinskih tokova (I _{ef} = 47,7%).			
	Cirkulacija	Generalni pravac od juga ka severu i sa JI ka SZ; utvrđena veza ponora Suvog Dola, Velike Tisnice i Crne reke sa vrelom Mlave (v = 1,28 do 1,89 cm/s)				
	Kvantitativna karakterizacija	Dreniranje (m³/s)	Min	0,11	Max	9,42
			Q_{sr}	1,415	Q_{sr} (medijana)	1,080
		Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀	
			2,73	1,05	0,491	
		Recesija	α ₁	α ₂	V (x10 ⁶ m ³)	
			0,084	0,02	4,04	
		Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	Q _b %
			0,11	1,03	3,14	82,29
		Autokorelacija	Q _{bazni} (dani)		Q _{direktni} (dani)	Q _{ukupni} (dani)
			r _k < 0.2	62	8	52
			r _k < IP (95%)	86	43	94
Kroskorelacija		Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 2 dana u sušnoj i 1 dan u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 9 dana u sušnoj, 5 dana u vlažnoj godini				
Ciklusi prihranjivanja	365, 130, 30 i 20 dana					
Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}		365, 304, 228, 121 i 107			
	Q _{direktni}		913, 365, 304, 121 i 49			
	Q _{ukupni}		365, 304, 228, 121 i 107			
Kros-spektar	Dobra amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 7 dana; Srednja koherentna vrednost 0.41, uz pad f = 0.097 dan ⁻¹ (10 dana); Uticaj direktnog oticaja od 6 dana					
Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa ustanovljenom bakteriološkom ispravnošću i sa pojavama povišene mutnoće u periodu intenzivnog prihranjivanja				
		$CO_{10,56}^2 M_{0,255} \frac{HCO_{80}^3}{Ca_{83} Mg_5 Na + K_{12}} pH_{7,5} TV_{8,9} T_{9,2} Q_{1080}$				
Bilans podzemnih voda		Q _{dyn(Q50)}	1,05 m ³ /s			
		Q _{EO}	0,22 m ³ /s			
		Q _{AP}	0,12 m ³ /s			
Pritisci	Kvantitet	Nije pod pritiskom Q _{optim} = 0,28 m ³ /s 32,9% (Q _{zahnv} / Q _{expl}), tj. 14,1% (Q _{zahnv} / I _{ef,av})				

	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom Umerena ranjivost (37,2%), Visoka ranjivost (46,2%); Veoma nizak hazard (85,1%) Nizak rizik (85,9%)
Monitoring	Kvalitet	Ne postoji kontinualno za vrelo Mlave / Predloženo: Operativni monitoring
	Kvantitet	Postoji kontinualno za vrelo Mlave / Predloženo: Nadzorni monitoring
Zavisni ekosistemi		Reka Mlava i ribnjak; NP Kučaj-Beljanica

PRILOG 9. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrelo Oko Bijele (prema OGK list Šavnik K34-39)



Legenda	
Tip izdani	Standardne oznake
Karstni tip veće izdašnosti	Rased, sigurno utvrđen
Karstni tip, manje izdašnosti	Rased, pretpostavljen
Integranularni tip	Antiklinala
Uslovno-bezvodni tereni	Sinklinala
Granica sliva	Čelo navlake, pretpostavljeno
Pećina	Geološka granica, normalna
Karstno vrelo	Geološka granica, pretpostavljena
Naselje	Transgresivna granica

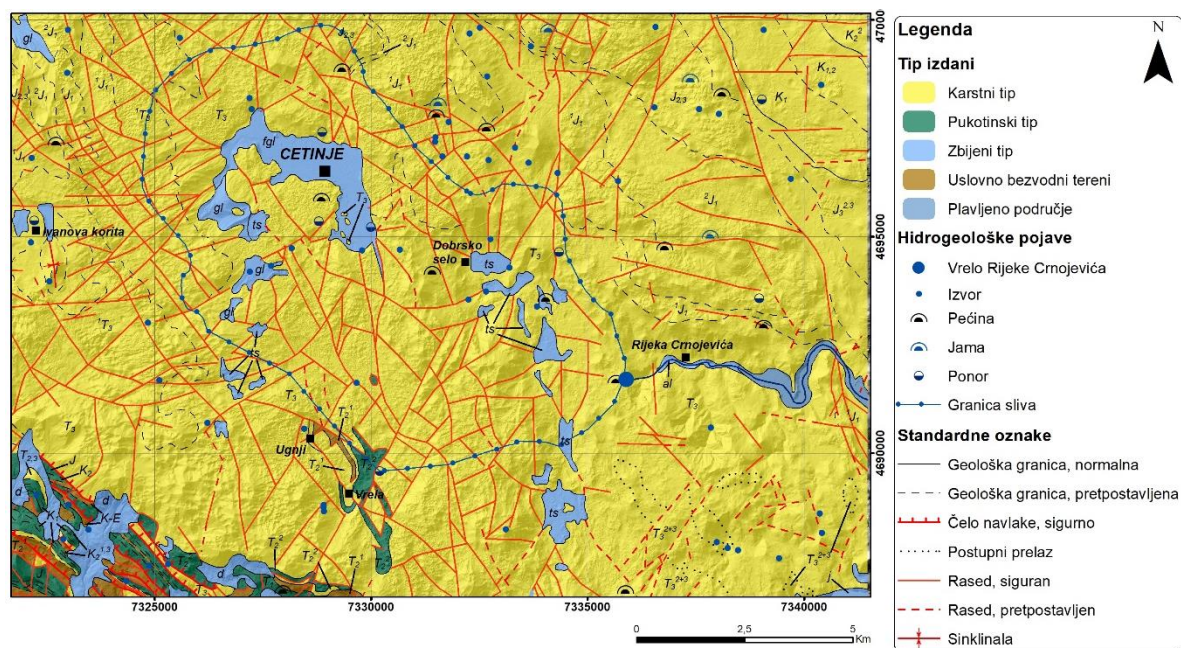


PRILOG 10. Karakterizacijska tabela karstnog sistema Oko Bijele

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)	
Piva	Dunav	Dinaridi	Oko Bijele	23	
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem Oko Bijele nalazi se u centralnoj Crnoj Gori, na Moračkim planinama i Loli. Prostire se Gornje Bijele na severu do vrha Visoke Glavice na jugu i od vrha Ostrvica na zapadu do Šorevca na istoku. Nadmorske visine u okviru sliva prostiru se od 1100 do 2032 mnm.				
Klimatske karakteristike (MS Žabljak)	Prosečna suma padavina (mm)		1159,3		
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		6,27		
	Prosečna visina snega (cm)		47,1		
Rečna mreža	Odsustvuje na slivnom području. Jedini tok je reka Bijela koja se formira nizvodno od vrela. U zaleđu se mogu javiti povremeni tokovi nakon velikih kiša				
Značajniji geomorfološki objekti	Valovi i cirkovi, vrtače ispunjene crvenicom. Uočene dve pećine, uz veće prisustvo jama usled zaravnjenosti terena. Odsustvo ponora.				
Pedologija i vegetacija	Smeđe-kiselo zemljište na karbonanto-silikatnoj podlozi i na flišu, plitko i srednje duboko; Pašnjaci i šume.				
Geološke karakteristike	Krečnjaci sa kalcitskim žicama i dolomiti (K ₁ ^{1,2}); Fliš – Bazalne breče i konglomerati (K ₂ ³) i laporovito-peskovita facija (K ₂ ³); Breče, konglomerati, krečnjaci (K ₂ ³); Krečnjaci (K ₂ ³); Glacijalni i deluvijalni sedimenti i morene (Q)				
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Oko Bijele	Y	X	Z
			6 594 774	4 751 268	1 102
		Mehanizam isticanja	Descendentno vrelo sa sifonskim kanalom		
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od snega i kiše (I _{ef} = 86,22%).		
		Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od JI ka SZ. Jedini izvedeni opit trasiranja Krnovska glavica – reka Bijela (v = 3,74 cm/s)		
	Dreniranje (m³/s)	Min	0,00285	Max	30,14
		Q_{sr}	1,61	Q_{sr} (medijana)	0,60
	Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀	
		3,95	0,53	0,01	
	Recesija	α ₁	α ₂	α ₃	V (x10 ⁶ m ³)
		0,3016	0,1236	0,0186	1,79
	Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	Q _b %
		0,00285	0,494	3,74	58,02
	Autokorelacija		Q _{bazni} (dani)	Q _{direktni} (dani)	Q _{ukupni} (dani)
		r _k < 0.2	57	8	28
		r _k < IP (95%)	81	51	81
	Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 0 dana u sušnoj i 1 dan u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 7 dana u sušnoj, 23 dana u vlažnoj godini			
	Ciklusi prihranjivanja	456, 365, 304, 183 i 114 dana			
	Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}	608, 365, 228, 182 i 107		
		Q _{direktni}	608, 365, 182, 91 i 44 dana		
Q _{ukupni}		608, 365, 182, 91 i 44 dana			
Kros-spektar	Slaba amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 11 dana; Srednja koherentna vrednost 0.52, uz pad f = 0.0952 dan ⁻¹ (10.49 dana);				

Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane dosta tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumske grupe, sa povišenom mutnoćom u periodu intenzivnog prihranjivanja karstnog sistema i sa povišenim sadržajem nitrita u jednom uzorku iz perioda visokih voda.
		$CO^2 M_{0,16} \frac{HCO_{94}^3}{Ca_{91} Mg_5 Na + K_4} pH_{8,55} TV_{21,54} T_{6,33} Q_{600}$
Bilans podzemnih voda		$Q_{dyn(Q50)}$ 0,526 m ³ /s
		Q_{EO} 0,12 m ³ /s
		Q_{AP} 0,01 m ³ /s
Pritisici	Kvantitet	Nije pod pritiskom (nekaptirano vrelo). Optimalna prosečna količina koja bi se mogla zahvatiti vode $Q_{optim} = 0,160 \text{ m}^3/\text{s}$, pri čemu je 32,9% (Q_{zahv} / Q_{expl}), tj. 7,52% ($Q_{zahv} / I_{ef,av}$)
	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom ; Niska ranjivosti (27,37%), Umerena ranjivost (15,2%), Visoka ranjivost (53,5%); Veoma nizak hazard (87,1%), Veoma nizak (21,45%) i Nizak rizik (74,6%)
Monitoring	Kvalitet	Ne postoji kontinualno za vrelo Oko Bijele / Predloženo: Operativni monitoring
	Kvantitet	Postoji kontinualno za vrelo Oko Bijele / Predloženo: Nadzorni monitoring
Zavisni ekosistemi		Reka Bijela i vodopad Crnjak (Bećirovića mlini) (direktno zavisni); Komarnica (indirektno zavisni)

PRILOG 11. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Rijeka Crnojevića (Prema OGK listovi Budva (K34-62), Bar (K34-63), Kotor (K34-50) i Titograd (K34-51))



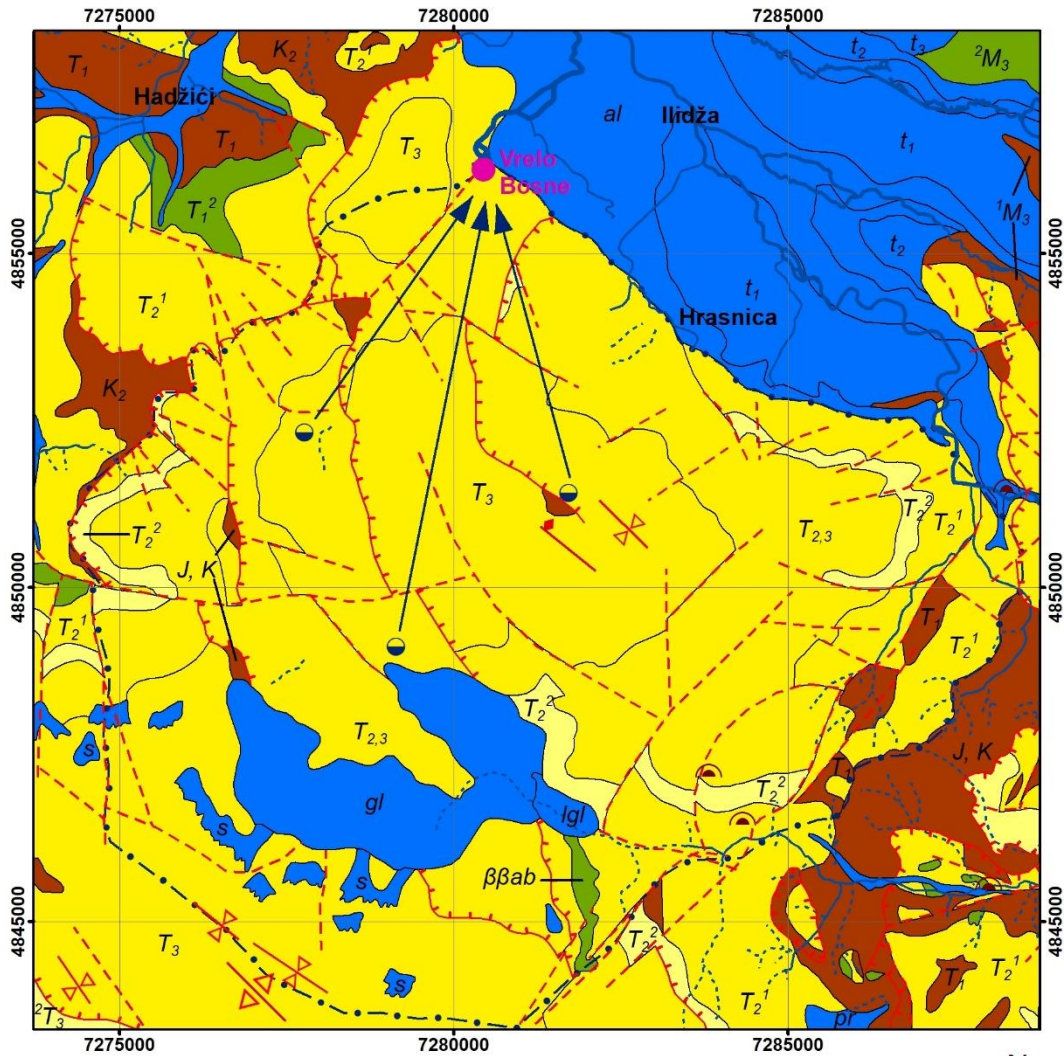
PRILOG 12. Karakterizacijska tabela karstnog sistema vrela Rijeke Crnojevića

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)
Skadarsko jezero	Bojana	Dinaridi	Rijeka Crnojevića	69
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem Rijeke Crnojevića nalazi se u južnoj Crnoj Gori, u podnožju Lovćena i Njeguša. Prostire se od Prestonice Cetinje na SZ do Začira na JI i od Donjih Ulića na SI do Očinića na JZ. Nadmorske visine u okviru sliva prostiru se od 60 do 928 mnm.			

Klimatske karakteristike (MS Cetinje)	Prosečna suma padavina (mm)		3123,7			
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		11,0			
	Prosečna visina snega (cm)		19,3			
Rečna mreža	Potpuno odsustvo rečne mreže. Jedini tok Borovik ponire u Cetinjskom polju					
Značajniji geomorfološki objekti	Cetinjsko karstno polje, skaršćene suve doline nekadašnje Cetinjske reke, vrtače i uvala u Dobrskom selu; Cetinjski ponor i drugi ponori na obodu polja i uvala, ponori Obzovice; Cetinjska, Lipska i Obodska pećina, Zapecka i Gradinska pećina u Bokovu, Ilijina pećina u Zagori i Brovska pećina u selu Gornja Brova; Kašička i jama Jarčica, kao i brojne druge jame					
Pedologija i vegetacija	Rendzina posmeđena na tvrdim karbonatima, plitka i šumska; Šumovito-žbunasta i šumska vegetacija					
Geološke karakteristike	Peskoviti dolomiti sa laporcima (T ₁); Anizijski fliš i krečnjačka facija (T ₂ ¹); Krečnjaci sa muglama rožnaca (T ₂ ²); Slojeviti do bankoviti krečnjaci i rožnaci (T _{2,3}); Dolomiti, dolomitični krečnjaci i krečnjaci (T ₃) sa megalodonima (¹ T ₃); Krečnjaci i dolomiti (T ₃ ²⁺³); Krečnjaci, rožnaci i breče (J); Krečnjaci i dolomiti sa laporcima i rožnacima (² J ₁); Krečnjaci i dolomiti sa amonitima (¹ J ₁); Krečnjaci i dolomiti (J _{2,3}); Rožnaci, krečnjaci i dolomiti (K ₁); Krečnjaci, dolomiti i dolomitični krečnjaci (K _{1,2}); Breče i kalkareni sa proslojcima rožnaca (K ₂ ; K ₂ ^{1,3}); Krečnjaci i dolomiti (K ₂ ²); Fliš (K-E); Glacijalni, fluvio-glacijalni i aluvijalni sedimenti i crvenica					
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrela Rijeke Crnojevića		Y	X	Z
			Obodska p.	6 583 236	4 690 289	61
			Stalni izvor	6 583 369	4 690 286	58
		Mehanizam isticanja	Descendentno vrelo			
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno na račun efektivne infiltracije od kiše i snega (I _{ef} = 92,9%). Poniranje povremenog potoka Borovika u Cetinju malim delom prihranjuje sistem			
	Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od SZ ka JI. Izvršeni opiti trasiranja i dokazana veza Cetinjski ponor – Rijeka Crnojevića (v=4,05 cm/s) i bušotine u Cetinjskom polju – Rijeka Crnojevića (v=1 cm/s)				
	Dreniranje (m³/s)	Min	0,03	Max	108	
		Q_{sr}	5,63	Q_{sr} (medijana)	1,34	
	Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀		
		15	1,43	0,39		
	Recesija	α ₁	α ₂	α ₃	V (x10 ⁶ m ³)	
		0,2285	0,02557	0,00644	4,37	
	Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	BFI %	
		0,03	1,08	5,13	61,9	
	Autokorelacija		Q _{bazni} (dani)	Q _{direktni} (dani)	Q _{ukupni} (dani)	
		r _k < 0.2	87	6	6	
		r _k < IP (95%)	114	56	59	
	Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrela na efektivnu infiltraciju 1 dan u sušnoj i 0 dana u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 3 dana u sušnoj, 5 dana u vlažnoj godini				
	Ciklusi prihranjivanja	608, 365, 130, 42 i 38 dana				
	Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}	1826, 913, 608, 365, 228 dana			
Q _{direktni}		608, 365, 228, 101 i 91 dana				
Q _{ukupni}		608, 365, 228, 101 i 91 dana				
Kros-spektar	Relativno slaba amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 8.4 dana; Srednja koherentna vrednost 0.61, uz pad f=0.15 dan ⁻¹ (6.6 dana); Uticaj direktnog oticaja 2.3 dana					

Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	Malomineralizovane dosta tvrde vode hidrokarbonatno-kalcijumsko-mangezijumske grupe, sa pojavama povišene mutnoće u periodu visokih voda i ukupnih bakterija, amonijaka i fenola. $CO_{1,84}^2 M_{0,21} \frac{HCO_{90}^3}{Ca_{73} Mg_{19} Na + K_8} pH_{8,2} TV_{9,1} T_{12,1} Q_{1340}$
Bilans podzemnih voda		
		$Q_{dyn(Q50)}$ 1,427 m ³ /s
		Q_{EO} 0,29 m ³ /s
		Q_{AP} 0,1 m ³ /s
Pritisci	Kvantitet	Nije pod pritiskom (nekaptirano vrelo). Optimalna prosečna količina koja bi se mogla zahvatiti vode $Q_{optim} = 0,380 \text{ m}^3/\text{s}$, pri čemu je 32,9% (Q_{zahv} / Q_{expl}), tj. 2,99% ($Q_{zahv} / I_{ef,av}$)
	Kvalitet	Potencijalno pod pritiskom ; Umerena ranjivost (57,61%), Visoka ranjivost (41,5%); Veoma nizak hazard (83,9%), Nizak rizik (87,22%)
Monitoring	Kvalitet	Postoji kontinualno za vrelo Rijeke Crnojevića / Predloženo: Operativni monitoring
	Kvantitet	Postoji kontinualno za vrelo Rijeke Crnojevića / Predloženo: Nadzorni monitoring
Zavisni ekosistemi		Rijeka Crnojevića, Lipska i Obodska pećina (direktno zavisni); Skadarsko jezero (indirektno zavisni); NP Skadarsko jezero

PRILOG 13. Hidrogeološka karta karstnog sistema vrela Bosne (Prema OGK list Sarajevo K34-1)



Karta urađena prema OGK SFRJ, list Sarajevo K34-1

Legenda

Tip izdani

- Karstni, veća izdašnost
- Karstni, manja izdašnost
- Zbijeni tip
- Pukotinski tip
- Uslovno bezvodni tereni
- Vrelo
- Ponor
- Pećina

Rečna mreža

- Reka Bosna
- Veći rečni tok
- Stalni rečni tok
- Povremeni rečni tok
- Granica sliva vrela Bosne
- Pravac kretanja PV

Tektonika_Bosna

- Pretpostavljeni rased
- Navlaka
- Antiklinala
- Prevrnuta sinklinala
- Sinklinala

0 1 2 Km



PRILOG 14. Karakterizacijska tabela karstnog sistema vrele Bosne

Rečni sliv	Podsliv	HG rejon	Naziv sistema	Površina sliva (km ²)	
Dunav	Bosna	Dinaridi	Vrelo Bosne	117	
Topografija i geografski prikaz	Karstni sistem vrele Bosne nalazi se u centralnoj Bosni i Hercegovini, u podnožju planine Igman. Prostire se od vrha Bjelašnice na jugu do vrele Bosne na Ilidži na severu i od Bojišća na zapadu do Zoranovića na istoku. Nadmorske visine u okviru sliva prostiru se od 476 do 2067 mnm.				
Klimatske karakteristike (MS Bjelašnica)	Prosečna suma padavina (mm)		1192,3		
	Prosečna temperatura vazduha (°C)		2,4		
	Prosečna visina snega (cm)		85		
Rečna mreža	Potpuno odsustvo rečne mreže. Povremeni tok na Bjelašnici kao izvorišni deo reke Presjenice				
Značajniji geomorfološki objekti	Pećine Hrid, Greda, Bukurići i Vranjača; ponori na Velikom polju, Sitničkoj lokvi, Radovoj vodi i kod Hrasničkog stana				
Pedologija i vegetacija	Rendzina i smeđe tlo na krečnjacima i dolomitima i deluvijalno tlo vrtača; Širokolisna i četinarska vegetacija				
Geološke karakteristike	Donji trijas (T ₁) – kvarc-liskunoviti peščari; ² T ₁ - laporoviti krečnjaci i laporci; Anizik (T ₁ ²) – krečnjaci i dolomiti; Ladinik (T ₂ ²) sedimentne i vulkanske stene; spiliti (ββab); T _{2,3} dolomiti i krečnjaci; T ₃ krečnjaci i dolomiti; ² T ₃ brečasti krečnjaci; Klastični sedimentni jure i krede (J, K); Fliš gornje krede (K ₂); Koševski slojevi (¹ M ₃) i orlački konglomerati (² M ₃); kvartarni sedimenti				
Hidrogeološke karakteristike	Opšte karakteristike	Koordinate vrele Bosne	Y	X	Z
			6 522 007,3	4 852 682,5	492
		Mehanizam isticanja	Ascedentno vrelo		
		Prihranjivanje	Dominantno difuzno prihranjivanje na račun efektivne infiltracije od kiše i snega (I _{ef} = 81,7%)		
		Cirkulacija	Generalni pravac kretanja PV od JJZ ka SSL. Izvršeni opiti trasiranja i dokazana veza ponora na Velikom polju, Sitničkoj lokvi, Radovoj vodi i kod Hrasničkog stana sa vrelom Bosne (v = 0,83 do 2,3 cm/s)		
		Dreniranje (m³/s)	Min	1,28	Max
	Q_{sr}		5,29	Q_{sr} (medijana)	4,35
	Frekvencije isticanja (m³/s)	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₉₀	
		10,1	4,23	1,71	
	Recesija	α ₁	α ₂	V (x10 ⁶ m ³)	
		0,12	0,018	12,87	
	Bazni oticaj	Q _{b, min} (m ³ /s)	Q _{b, sr} (m ³ /s)	Q _{b, max} (m ³ /s)	Q _b %
		1,28	4,11	13,3	13,3
	Autokorelacija	Q _{bazni} (dani)		Q _{direktni} (dani)	Q _{ukupni} (dani)
		r _k < 0.2	51	7	43
	Kroskorelacija	r _k < IP (95%)		66	16
		r _k < IP (95%)		66	16
	Kroskorelacija	Zakašnjenje reakcije vrele na efektivnu infiltraciju 2 dana u sušnoj i 1 dan u vlažnoj godini. Reakcija celog sliva 2 dana u sušnoj, 1 dan u vlažnoj godini			
Ciklusi prihranjivanja	365, 182, 57 i 16 dana				
Ciklusi isticanja (dani)	Q _{bazni}		548, 365, 182, 99 i 28		
	Q _{direktni}		121, 99, 49, 39 i 28 dana		
	Q _{ukupni}		548, 365, 182, 99 i 28 dana		
Kvantitativna karakterizacija					

		Kros-spektar	Veoma dobra amortizacija sistema; Zakašnjenje odziva sistema od 6 dana; Srednja koherentna vrednost 0.46, uz pad $f = 0.091 \text{ dan}^{-1}$ (11 dana); Uticaj direktnog oticaja 11 dana
Hidrogeološke karakteristike	Kvalitativna karakterizacija	<p>Malomineralizovane, dosta tvrde vode, hidrokarbonatno-kalcijumsko-magnezijumske grupi, sa povišenim sadržajem koliformnih i bakterija <i>Escherichia coli</i>, <i>Enterococcus spp</i> i <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p> $CO_{8,8}^2 M_{0,25} \frac{HCO_{91}^3}{Ca_{69} Mg_{30} Na + K_1} pH_{7,6} TV_9 T_{7,9} Q_{4230}$	
Bilans podzemnih voda		$Q_{dyn(Q50)}$	4,23 m ³ /s
		Q_{EO}	0,85 m ³ /s
		Q_{AP}	0,44 m ³ /s
Pritisci	Kvantitet	<p>Nije pod pritiskom $Q_{optim} = 0,80 \text{ m}^3/\text{s}$ 23,6% (Q_{zahv} / Q_{expl}), tj. 14,9% ($Q_{zahv} / I_{ef,av}$)</p>	
	Kvalitet	<p>Potencijalno pod pritiskom; Umerena ranjivost (37,19%), Visoka ranjivost (54,28%); Veoma nizak hazard (95,69%), Nizak rizik (88,11%)</p>	
Monitoring	Kvalitet	Ne postoji kontinualno za vrelo Bosne / Predloženo: Operativni monitoring	
	Kvantitet	Postoji kontinualno za vrelo Bosne / Predloženo: Nadzorni monitoring	
Zavisni ekosistemi		Spomenik prirode „Vrelo Bosne“; reka Bosna	

BIOGRAFIJA AUTORA

Veljko J. Marinović rođen je 29. juna 1990. godine u Beogradu. Nakon završene Šeste beogradske gimnazije, 2009. godine upisuje smer za hidrogeologiju na Rudarsko – geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Osnovne akademske studije završava septembra 2013. godine, sa prosečnom ocenom 9,39. Iste godine upisuje master akademske studije, koje završava septembra 2014. sa prosečnom ocenom 10,00.

Veljko J. Marinović radni odnos započinje 2015. godine u Centru za hidrogeologiju karsta Departmana za hidrogeologiju Rudarsko – geološkog fakulteta u Beogradu, u okviru projekta osnovnih istraživanja „*Potencijal i podloge za održivo korišćenje podzemnih voda*“, čiji je rukovodilac prof. dr Zoran Stevanović. Veljko J. Marinović od 2015. godine stiče profesionalno iskustvo u istraživačkim projektima i studijama u kojima se najviše bavi istraživanjem hidrogeoloških karakteristika karstnih terena Srbije i regiona, ocenom karstnih podzemnih vodnih resursa, procenom prirodne ranjivosti, hazarda i rizika podzemnih voda na zagađivanje, određivanjem kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na osnovu operativnog monitoringa uspostavljenog na nacionalnom nivou i hidroloških analiza, ocenom bilansa podzemnih karstnih voda i implementacijom Okvirne direktive o vodama Evropske unije u Srbiji, Crnoj Gori i Bosni i Hercegovini.

Objavio je preko 50 radova i saopštenja u domaćim i stranim časopisima i monografijama, od čega 5 radova u časopisima sa SCI liste, od kojih jedan kao prvi autor. Osim angažovanja na nacionalnim i međunarodnim projektima, Veljko J. Marinović je od 2015. godine pomagao u održavanju nastave na Departmanu za hidrogeologiju iz predmeta ***Metode hidrogeoloških istraživanja i Vodosnabdevanje podzemnim vodama*** na osnovnim studijama, odnosno ***Metodologija naučnog rada i Menadžment podzemnih vodnih resursa*** na master studijama, kao i u organizaciji međunarodnog kursa pod pokroviteljstvom UNESCO „***Characterization and Engineering of Karst Aquifers***“.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Вељко Мариновић

Број индекса Г811/14

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

РЕГИОНАЛНА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА КАРСТНИХ ПОДЗЕМНИХ ВОДА ДЕЛА ЦЕНТРАЛНОГ
БАЛКАНА У ФУНКЦИЈИ ЊИХОВОГ ОДРЖИВОГ КОРИШЋЕЊА И МЕНАѢМЕНТА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 30.11.2022 године

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Вељко Мариновић

Број индекса Г811/14

Студијски програм Хидрогеологија

Наслов рада РЕГИОНАЛНА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА КАРСТНИХ ПОДЗЕМНИХ ВОДА ДЕЛА ЦЕНТРАЛНОГ БАЛКАНА У ФУНКЦИЈИ ЊИХОВОГ ОДРЖИВОГ КОРИШЋЕЊА И МЕНАЏМЕНТА

Ментор др Зоран Стевановић, ред. проф. у пензији

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 30.11.2022. године

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

РЕГИОНАЛНА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА КАРСТНИХ ПОДЗЕМНИХ ВОДА ДЕЛА
ЦЕНТРАЛНОГ БАЛКАНА У ФУНКЦИЈИ ЊИХОВОГ ОДРЖИВОГ КОРИШЋЕЊА И МЕНАџМЕНТА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 30.11.2022. године

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.