

Hydrodynamic analysis application of contaminated groundwater remediation to oil hydrocarbons

Predrag Pajić, Aleksandar Čalenić, Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Hydrodynamic analysis application of contaminated groundwater remediation to oil hydrocarbons | Predrag Pajić, Aleksandar Čalenić, Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić | Tehnika | 2018 | |

10.5937/tehnika1706825P

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007333>

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

Primena hidrodinamičke analize remedijacije kontaminiranih podzemnih voda naftnim ugljovodonicima

PREDRAG R. PAJIĆ, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

ALEKSANDAR I. ČALENIĆ, Institut za vodoprivredu

„Jaroslav Černi“, Beograd

DUŠAN M. POLOMČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DRAGOLJUB I. BAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 504.4:556.32:553.98

DOI: 10.5937/tehnika1706825P

U ovom radu sagledana je primena hidrodinamičke analize u okviru odabrane remedijacione metode „pumpanja i tretiranja“ kontaminiranih podzemnih voda ugljovodonicima, na primeru pretakališta rafinerije nafte u Pančevu. Primenjena hidrodinamička analiza predstavlja pravilan, a sve češće i neophodan pristup u savremenoj hidrogeologiji.

Prethodnim hemijskim analizama uzoraka tla i podzemnih voda na istražno - osmatračkim objektima detektovano je zagađenje produktima nafte. Novoizvedena istraživanja obuhvatila su izvođenje 12 pijezometara različitih dubina, geoelektrično sondiranje tla, „in situ“ merenja prisutnog kontaminanta, izdvojenog kao hidrofobna faza LNAPL, hemijske analize nabušenog materijala i uzoraka podzemnih voda sa akcentom na sadržaj ukupnih naftnih ugljovodonika (TPH), ukupnih masti i mineralnih ulja, katjona žive i drugih karakterističnih jedinjenja i dr. Ovim istraživanjima definisan je obim kontaminacije izdani „lakom“ fazom zagađenja.

Odabrana remedijaciona metoda za sanaciju ove vrste zagađenja je „Pump and Treat“ metoda, koja podrazumeva ispuštanje zagađenih podzemnih voda iz izdani i njihov dalji tretman. Za izbor optimalnog hidrotehničkog rešenja za ekstrakciju „lake“ faze zagađenja (LNAPL) korišćena je hidrodinamička metoda. Na matematičkom modelu sprovedeni su prognozni proračuni za dva varijantna rešenja („hidrauličke izolacije“ i kompleksno) za primenu remedijacije kontaminacije podzemnih voda okarakterisanih kao front zagađujuće materije (ekstrakcionim i upojnim bunarima ili infiltracionim bazenom). Izvođenjem ekstrakcionih bunara omogućilo bi se uklanjanje „lake“ faze sa površine vode posebnim pumpama - skimerima. Značaj primene hidrodinamičke metode je, pored odabira hidrotehničkog rešenja za ekstrakciju hidrofobne faze LNAPL i omogućavanje podloga za dimenzionisanje ovih objekata na osnovu rezultata bilansiranja podzemnih voda.

Ključne reči: kontaminacija, matematički model, podzemne vode, remedijacija, ugljovodonici

1. UVOD

U procesu pretakanja naftnih derivata mogu se javiti mnogobrojni problemi po zagađenje životne sredine ukoliko se sam proces ne sprovodi na adekvatan način. Potencijalno zagađenje, paketnog ili kontinualnog unosa, može negativno da se reperkutuje u dužem vremenskom periodu na kvalitet geološke sredine

podzemnih ili površinskih voda.

U ovom radu, na primeru rafinerije nafte u Pančevu, sagledan je negativni efekat procurivanja naftnih derivata na pretakalištu u zemljište i podzemne ili površinske vode, a zatim i mogućnost odabira remedijacionih mera za sanaciju hidrofobne „lake“ faze zagađenja (LNAPL) primenom metode hidrodinamičke analize.

Adresa autora: Predrag Pajić, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Jaroslava Černog 80
e-mail: Predrag.Pajic@jcerni.co.rs

Rad primljen: 28.11.2017.

Rad prihvaćen 11.12.2017.

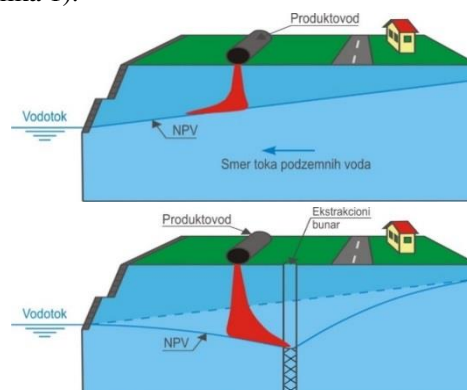
Dugogodišnja eksploatacija rafinerije nafte u Pančevu prouzrokovala je različite vrste kvarova i havarija na samom pretakalištu, što se dalje reperkutovalo na zagađenje tla, podzemnih voda, pa čak i reke Dunav, procurivanjem kroz naslagane betonske blokove

obaloutvrde pri niskim vodostajima i hidrauličkom gradijentu prema reci. Prethodnim istraživanjima, koja su uključila hemijske analize uzoraka tla i podzemnih voda, sa različitih dubina, detektovano je njihovo zagađenje ugljovodonicima [6, 18]. Pretpostavljeno je da oštećeni deo uljne kanalizacije predstavlja potencijalni izvor polucije.

Za potrebe definisanja stepena i obima kontaminacije u aktuelnim uslovima izvedena su nova istraživanja. Ona su obuhvatila izradu 12 novih osmatračkih objekata - pijezometara, u nasutom i osnovnom, aluvijalnom sloju, geoelektično sondiranje tla, „in situ” merenja hidrofobne faze LNAPL i laboratorijske, hemijske analize uzoraka tla i podzemnih voda iz ovih objekata. Hemijskim analizama nabušenog materijala konstatovano je prisustvo ugljovodonika u visokim koncentracijama, a hemijskim analizama uzoraka podzemnih voda detektovano je zagađenje u 5 novoizvedenih pijezometara. „In situ” merenjima specijalizovanim uređajem - sondom, zasnovanoj na registovanju promene elektroprovodljivosti, na ovim pijezometarima evidentirane su debljine kontaminiranog sloja podzemnih voda i do 1,6 m.

Sanacija ovakvih problema u praksi se najčešće rešava remedijacionim „in situ” metodama, koje se odlikuju jednostavnošću i ekonomskom opravdanošću [9, 13]. Kao rešenje eliminisanja zagađenja podzemnih voda ugljovodonicima u zoni pristaništa rafinerije nafte u Pančevu nameće se metoda „pumpanja i tretiranja” (eng. Pump and treat) [8, 20]. Ovo je jedna od najzastupljenijih „in situ” metoda dekontaminacije podzemnih voda na svetu i podrazumeva pumpanje zagađenih voda i njihovo dalje tretiranje, najčešće na površini terena. Ova metoda može imati i određena ograničenja, te se u zavisnosti od efikasnosti primene u konkretnom slučaju, može po potrebi kombinovati sa

drugim poznatim metodama. Za pumpanje podzemnih voda na području istraživanja koristiće se vertikalni bunari, koji ne samo da dreniraju zagađenu podzemnu vodu nego i omogućavaju rad plutajućim pumpama-skimerima za evakuaciju značajnije mase hidrofobne faze LNAPL sa površine izdani (registrovan sloj 1,6 m) (slika 1).

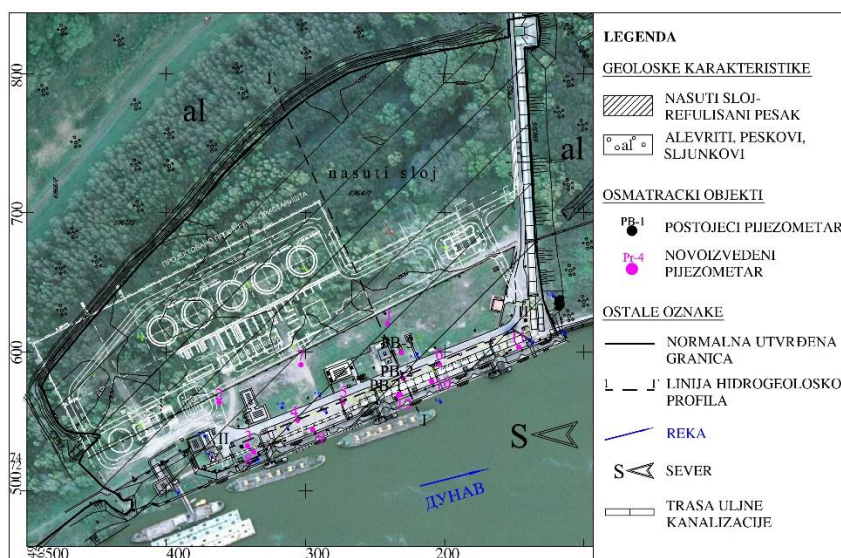


Slika 1 - Šematizovan prikaz zagađenja podzemnih voda i moguće ekstrakcije hidrofobne faze LNAPL radom usamljenog bunara (modifikovano) [4]

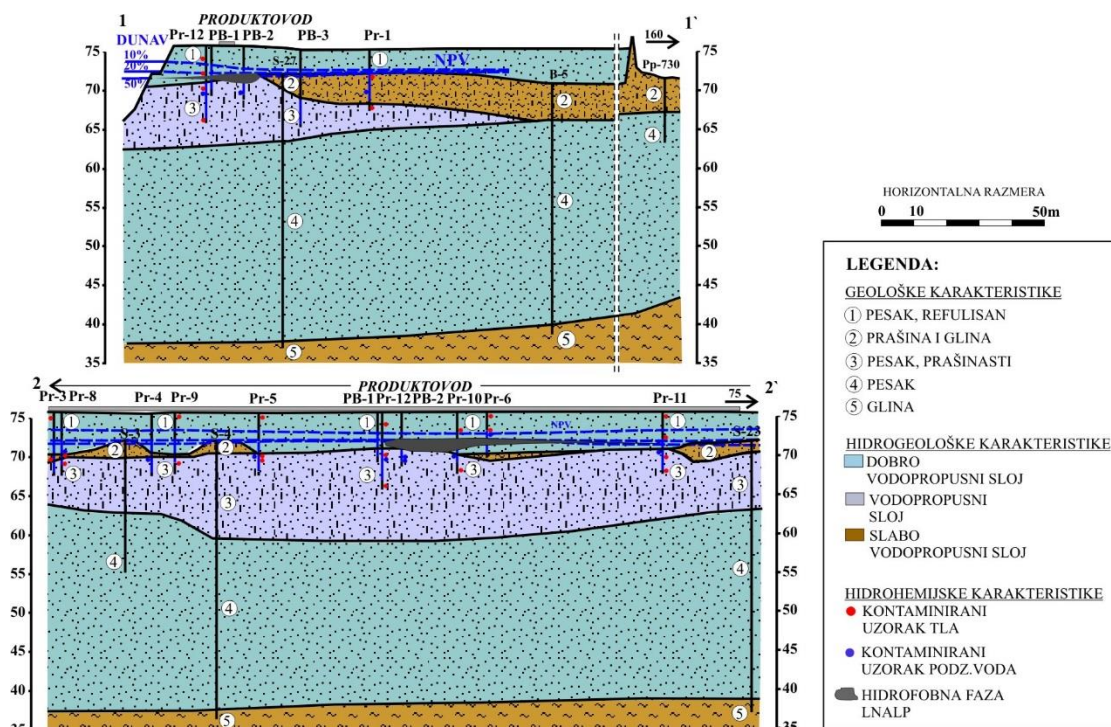
Za izbor optimalnog hidrotehničkog sistema za ekstrakciju značajnije mase hidrofobne faze LNAPL u okviru metode „pumpanja i tretiranja” primenjena je hidrodinamička metoda, gde je za strujanje uzeto kretanje fronta zagađujuće supstance, koja predstavlja pravilan i savremen pristup u rešavanju ovakvih problema.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ISTRAŽNOG PODRUČJA I SPROVEDENA ISTRAŽIVANJA

Istražno područje nalazi se u inundaciji, na levoj obali Dunava, na stacionaži reke km 1151- 1152. Na slici 2 data je aerofotokarta istražnog područja.



Slika 2 - Aerofotokarta istražnog područja sa položajem pijezometara i hidrogeoloških profila



Slika 3 - Hidrogeološki presek terena u zoni registrovanog tela kontaminacije

Hidrogeološka sredina sačinjena je od nasutog refulisanog peska (prosečne debljine 4 m, do kote 76,0 mm) i peskovito- šljunkovitih aluvijalnih sedimenata (prosečne debljine 20-25 m), između kojih se nalazi prašnasto - glinoviti aluvijalni međusloj (debljine 0-5 m). Zbog diskontinuiteta slabije propusnog međusloja, prvenstveno u priobalnom delu područja istraživanja, navedeni slojevi formiraju jedinstvenu intergranularnu vodonosnu sredinu (slika 3). U podini ovih sedimenata nalazi se tercijarni glinovita, slabovodopropusni sediment.

Režim podzemnih voda u zoni pristaništa formira se u složenim uslovima, a dominantno prihranjivanjem iz reke Dunav. U uslovima aktuelnog režima uspora u đerdapskoj akumulaciji, nivoi reke Dunav variraju u intervalu 69,5-73,5 mm, a samo povremeno i do 75,0 mm; prosečni vodostaji reke nalaze se oko kote 71,0 mm [10, 11, 12].

Pri visokim vodostajima Dunava, dominantan uticaj na formiranje režima podzemnih voda ima doticaj iz reke na osnovu ostvarene aktivne hidrauličke veze reka- izdan. Pri prosečnim i niskim vodostajima Dunava, u zoni pristaništa se formiraju složeniji uslovi.

Na formiranje režima podzemnih voda u osnovnom vodonosnom sloju utiče direktno prihranjivanje izdani iz reke, te podzemni doticaj sa hipsometrijski višeg terena u zaleđu i doticaj iz nasutog sloja poreklom od padavina.

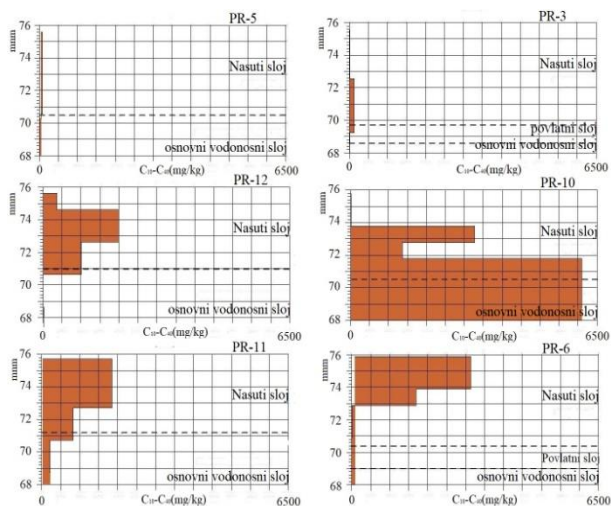
Za definisanje hidrogeoloških i geomehaničkih karakteristika područja u proteklom periodu izvedeno je 30 istražnih bušotina, za potrebe izgradnje rezervoara

ukupno 8 pijezometara i za potrebe sagledavanja potencijalne kontaminacije izdani dodatne 3 pijezometarske bušotine. Prethodnim hemijskim analizama uzoraka tla i podzemnih voda sa različitih dubina, detektovano je njihovo zagađenje ugljovodonicima [3].

Za definisanja stepena i obima kontaminacije u aktuelnim uslovima izvedeno je ukupno 12 novih pijezometara i to 10 plitkih, dubine 5-8 m (u nasutom i slabije propusnom sloju) i 2 dublje, dubine 10-15 m (u aluvijalnom peskovito- šljunkovitom sloju), kao i geoelektrično sondiranje tla na 4 profila upravna na reku Dunav (24 sonde, $AB/2 = 80$ m) (NIS- Naftagas- Geofizički servis). Hemijskim analizama nabušenog materijala obuhvaceno je ukupno 36 uzoraka (po 3 odabrana sa svake bušotine) sa posebnim akcentom na praćenje sadržaja ugljovodonika ($C_{10}-C_{40}$), ukupnih masti i mineralnih ulja, katjona žive (Hg^{2+}) i drugih jedinjenja (1,2 dihloretan, vinilhlorid i dr.) [17].

Rezultati sprovedenih analiza pokazali su visok sadžaj ukupnih ugljovodonika mineralnog porekla ($C_{10}-C_{40}$) u tlu na delu pristaništa oko bušotina PR-6, PR-10, PR-11 i PR-12 (slika 4). Na bušotinama PR-6, PR-8, PR-9 evidentirana pojava katjona žive (Hg^{2+}) u zemljištu (u vrednostima višim od 1 mg po 1 kg zemljišta (Centralna laboratorija NIS Naftagas). Pojava 1,2 dihloretana i vinilhlorida u zemljištu nije ni u jednom uzorku evidentirana iznad granice detekcije (Laboratorija GZJZ Beograd).

Hemijske analize uzoraka podzemnih voda iz novoizvedenih pijezometara sprovedene su u dve serije.



Slika 4 - Prikaz promene sadržaja ukupnih ugljovodonika mineralnog porekla ($C_{10}-C_{40}$) u tlu sa promenom dubine

Visoke koncentracije ugljovodonika detektovane su u uzorcima iz 5 od 12 novoizvedenih pijezometara-PB-2, PR-6, PR-10, PR-11 i PR-12 (tabela 1).

Tabela 1. Rezultati hemijskih analiza podzemnih voda pri vodostajima Dunava trajanja 50% (prva serija) i 1% (druga serija) (uzorak: 1-sa površine, 2-sa sredine vodonosnog stuba)

Analiziran uzorak		Masti i ulja (mg/l)	Mineralna ulja (mg/l)	Hg ²⁺ (mg/l)
pijez.	uzorak	prva serija/ druga serija		
PR-1	1	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	300/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-2	1	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	600/ 800	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-3	1	/ <0,1	/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	300/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-4	1	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	80/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-5	1	<0,1/ <0,1	0,02/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	300/ <0,1	0,17/ 0,17	<0,05/ <0,05
PR-6	1	vis. konc./29200	vis. konc./1,04	vis. konc./<0,05
	2	vis. konc./41200	vis. konc./0,51	vis. konc./<0,05
PR-7	1	<0,1/ 600	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	80/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-8	1	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	600/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-9	1	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
	2	<0,1/ <0,1	<0,1/ <0,1	<0,05/ <0,05
PR-10	1	vis. konc./27600	vis. konc./0,54	vis. konc./<0,05
	2	1850/ 13800	1/ 2,26	<0,05/ <0,05

Analiziran uzorak		Masti i ulja (mg/l)	Mineralna ulja (mg/l)	Hg ²⁺ (mg/l)
pijez.	uzorak	prva serija/ druga serija		
PR-11	1	1600/ 2100	0,61/ 2,17	<0,05/ <0,05
	2	80/ 2600	0,22/ 0,84	<0,05/ <0,05
PR-12	1	nije uzet uzorak	0,47/ 1,03	<0,05/ <0,05
	2	550/ 3900	1,72/ 1,26	<0,05/ <0,05
PB-2	1	nije uzet uzorak	nije uzet uzorak	<0,05/ <0,05
	2	800/ 63200	2,88/ 2,1	<0,05/ <0,05

Sadržaj ukupnih ulja i masti u podzemnim vodama na ovim pijezometrima iznosi i do 60 g/l, a na nekim se nije ni mogla izmeriti navedenim metodama. Sadržaj katjona žive (Hg²⁺) u podzemnim vodama nije evidentiran, dok se sadržaj 1,2 dihloretana i vinilhlorida nalazi u malim koncentracijama (3 μg/l). Dobijeni rezultati ukazuju na postojanje značajnog zagađujućeg sloja nafte i naftnih derivata na površini („laka” faza), ali i na određenoj dubini vodonosnog sloja i ukazuju na potencijalno žarište zagađenja u zoni oštećenog dela uljne kanalizacije [5].

„In situ” merenjima specijalizovanim uređajem-sondom, zasnovanoj na bazi promene elektroprovodljivosti („Geotech Env. Equip.- YSI Water Quality Sonde“), na određenim pijezometrima izmerene su debljine hidrofobne „lake” faze zagađenja. Pri različitim nivoima reke Dunav, a samim tim i režimima podzemnih voda, izmerene su debljine ove faze zagađenja u intervalu 0,6- 1,6 m (izuzetno male elektroprovodljivosti <1 μS) (tabela 2).

Tabela 2. Rezultati merenja položaja naftnog sloja u podzemnim vodama specijalizovanom sondom (1-dno sloja (mm), 2- debljina sloja (m))

pijez.	datum	16.6.10	22.7.10	12.8.10
PR-6	dubina do PV	3,85	4,85	4,56
	1	72,06	70,75	70,74
	2	0,47	0,78	1,08
PR-10	dubina do PV	4,19	5,23	4,78
	1	70,95	70,25	71,13
	2	1,15	0,81	0,38
PR-12	dubina do PV	4,49	5,46	4,84
	1	71,71	70,73	71,31
	2	0,01	0,02	0,06
PB-1	dubina do PV	4,15	4,90	4,75
	1	72,07	71,32	71,47
	2	0,01	0,01	0,01
PB-2	dubina do PV	3,80	4,77	4,54
	1	70,81	70,45	70,36
	2	1,62	1,01	1,33

Pored zagađenja tla i podzemnih voda, registrovana je i povremena kontaminiranost probalnog dela

reke Dunav, do koje dolazi procurivanjem ugljovodnika kroz naslagane betonske blokove obaloutvrde pri niskim vodostajima i hidrauličkom gradijentu prema reci [6, 18]. Pri prosečnim i višim vodostajima Dunava nema njihovog isticanja u korito reke, već kontaminant ostaje zarobljen u hidrogeološkoj sredini ili eventualno može blago migrirati prema zaleđu.

3. PRIMENJENA METODOLOGIJA (HIDRODINAMIČKI MODEL)

Za sanaciju zagađenja odabrana je jedna od zastupljenih remedijacionih „in situ” metoda - „pumpanje i tretiranje” (eng. “Pump and treat”) kontaminiranih podzemnih voda. Optimalnu hidrotehničku meru za dreniranje („pumpanje”) ovih voda predstavljaju vertikalni, ekstrakcioni bunari, prvenstveno zbog jednostavnosti izvođenja i malih dimenzija na već zauzetom manipulativnom prostoru pristaništa. Tretiranje hidrofobne faze LNAPL obaviće se na ovim objektima putem posebnih pumpi - „skimera”, sa površine podzemnih voda. Treba napomenuti da će u daljem procesu tretiranja iscrpljene podzemne vode prolaziti kroz posebne separatore za odvajanje preostalih faza zagađenja i zatim upuštati u vodonosnu sredinu putem upojnih (injekcionih) bunara i/ili infiltracionih bazena [21].

U ovom radu prikazana je metoda hidrodinamičke analize za definisanje varijantnih mogućnosti ispumpavanja hidrofobne faze LNAPL u okviru remedijacione metode „pumpanja i tretiranja”. Primenjena hidrodinamička analiza predstavlja pravilan pristup u savremenoj hidrogeologiji i sačinjena je od skupa različitih metoda hidrodinamičkih proračuna baziranih na numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju prostorno kretanje podzemnih voda [14].

Hidrodinamički model područja istraživanja koncipiran je i šematizovan kao strujanje u troslojevitoj, heterogenoj i anizotropnoj hidrogeološkoj sredini. Prostorni raspored i geometrija izdvojenih slojeva simulirani su na modelu u skladu sa njihovim realnim rasprostranjenjem u prirodi, a na osnovu rezultata sprovedenih terenskih istražnih radova (istražno bušenje, geoelektrično sondiranje tla). Filtracione karakteristike izdvojenih slojeva dobijene su na osnovu rezultata prethodnih istraživanja [6, 18] i granulometrijskih analiza nabušenog materijala (laboratorija „Kosovoprojekt-Geotehnika”). Posmatrano od površine terena korespondentni šemativani slojevi modela prikazani su u tabeli 3.

Prostorno rasprostranjenje i orijentacija matematičkog modela definisani su na osnovu pravca pružanja reke Dunav, kao osnovne granice posmatrane strujne oblasti. Diskretizacija strujnog polja u planu je izvršena osnovnom mrežom kvadrata sa pravicima podele

koji su u skladu sa usvojenom orijentacijom modela severozapad - jugoistok. Dimenzije polja diskretizovane strujne oblasti su 5x5 m. Model sačinjava 30 redova i 60 kolona tj. 1800 aktivnih polja (kvadrata). Ukupna površina matematičkog modela iznosi 0,045 km².

Tabela 3. Prikaz litoloških članova i šematizacija strujne oblasti u vertikalnoj projekciji

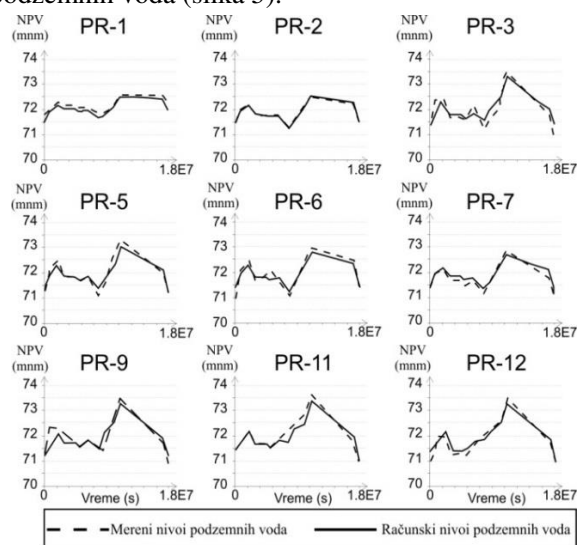
Br.	Hidrogeološka funkcija sloja	Litološ. sastav	Debljina sloja (m)	koef.filtracije K (m/s)
1	Vodonosni sloj	Refulisani pesak	4-5	$(0.5-3.0)*10^{-4}$
2	Povlatni sloj	Pesak, prašina	0-5	$(0.5-60)*10^{-8}$
3	Osnovni vodonosni sloj	Peskovi i šljunk.peskoviti	20-25	$(0.7-9.0)*10^{-5}$

Kao granični uslovi strujanja podzemnih voda zadaju se zone hranjenja, zone dreniranja i granice rasprostranjenja izdani [16]. Na hidrodinamičkom modelu izučavanog područja zadati su sledeći granični uslovi: granični uslov „reka” i granični uslov „opšteg pijezometarskog nivoa” (GHB). Graničnim uslovom „reka” definisan je uticaj reke Dunav na formiranje režima podzemnih voda na diskretizovanom području. Na modelu ova granica definisana je promenom nivoa vodotoka, zadatih na osnovu rezultata kontinualnog osmatranja vodostaja, zatim kotama dna korita, zadatih na osnovu ranijih rezultata geodetskih snimanja i hidrauličkom propustljivošću dna korita vodotoka, čija vrednost je menjana u procesu tariranja matematičkog modela [15]. Graničnim uslovom „opšteg pijezometarskog nivoa” (GHB) simulira se uticaj prihranjivanja ili dreniranja van područja obuhvaćenog modelom. Na modelu ova granica predstavlja doticaj podzemnih voda iz zaleđa, sa istočne strane modela. Inicijalne vrednosti nivoa podzemnih voda duž ove granice zadate su na osnovu strujnih slika dobijenih osmatranjem pijezometarskih bušotina u periodu simulacije. Vrednost konduktiviteta i hidraulička uloga menjani su u procesu etaloniranja modela. Parametri vertikalnog bilansa - infiltracija od padavina i evapotranspiracija, predstavljaju granični uslov trećeg reda i na modelu su zadati u okviru paketa „prihranjivanje”, a prema zvaničnim podacima RHMZ i iz fondovske dokumentacije. Filtracione karakteristike porozne sredine predstavljene su na modelu koeficijentima filtracije i parametarima „usklađivanja” litoloških članova u svakom diskretizovanom polju. Inicijalne vrednosti zadate su za svaki litološki član na osnovu rezultata namenskih hidrogeoloških istraživanja, a menjane su u procesu tariranja modela.

Kao alat za sprovođenje hidrodinamičkih proračuna korišćen je komercijalni softver Processing Modflow koji predstavlja savremeni integralni trodimenzionalni sistem za matematičko modeliranje strujanja podzemnih voda [1].

4. REZULTATI I DISKUSIJE

Etaloniranje modela je sprovedeno u nestacionarnim uslovima za polugodišnji period u kojem su izvedena kontinualna merenja nivoa podzemnih voda (januar - juli 2010.). Strujanje fonta zagađujuće materije je simulirano na matematičkom modelu kao realno strujanje sa slobodnim nivoom, u svakoj ćeliji diskretizacije pojedinačno. Osnovni vremenski korak od sedam dana u skladu je sa karakterom oscilovanja nivoa podzemnih voda na izučavanom području. U procesu etaloniranja matematičkog modela obavljeno je upoređivanje računskih i osmotrenih (izmerenih) nivoa podzemnih voda na postojećim i novoizvedenim osmatračkim objektima - pijezometrima. Etaloniranje modela je bilo završeno kada je postignuta zadovoljavajuća saglasnost između računskih i osmotrenih nivoa podzemnih voda, uz kontrolu bilansa podzemnih voda (slika 5).



Slika 5 - Registrovani i računski nivogrami podzemnih voda na odabranim osmatračkim objektima-pijezometrima

Osnovni cilj izrade matematičkog modela je analiza mogućnosti ispumpavanja podzemnih voda i evakuacije hidrofobne „lake“ faze kontaminiranih podzemnih voda u okviru odabrane remedijacione metode „pumpanja i tretiranja“ [7]. Dreniranje ovih voda je analizirano kroz dva konceptualno različita varijantna rešenja i to:

- varijanta 1: „hidraulička izolacija“ hidrofobne faze LNAPL
- varijanta 2: kompleksno rešenje ekstrakcije hidrofobne faze LNAPL

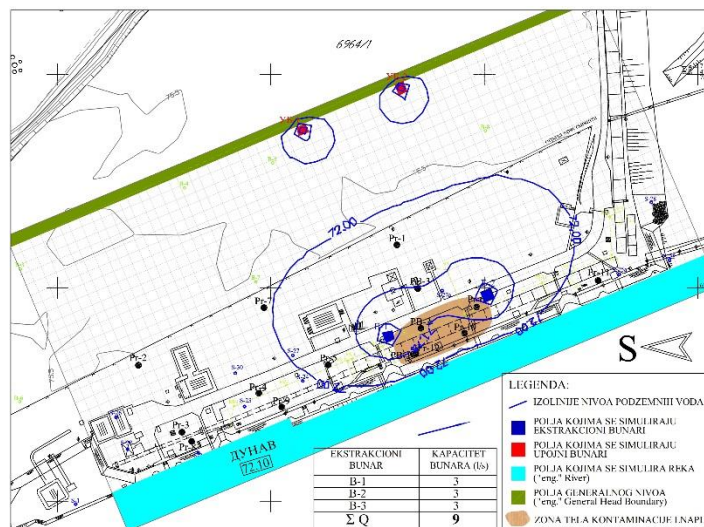
Prvo podvarijantno rešenje podrazumeva postavljanje neophodnog broja (u ovom slučaju dva) drenažna (ekstrakciona) bunara u neposrednoj blizini izvora zagađenja, čijim radom bi se obezbedila ekstrakcija značajnije mase hidrofobne faze LNAPL. Deo ove faze LNAPL sa površine podzemnih voda evakuise se pomoću posebnih pumpi-skimera, a zatim i prolaskom kroz odgovarajuće separatore [2, 19]. Preostale količine iscrpljene vode evakuisu su putem nalivajućih bunara prema zaleđu područja ili u infiltracioni bazen, postavljen nizvodno od pristaništa na nenasutom, originalnom području koji je u direktnom kontaktu sa aluvijalnim peskovito-šljunkovitim slojem.

Na matematičkom modelu simuliran je sistem bunara sa utopljenim pumpama postavljen paralelno sa Dunavom, na međusobnom rastojanju od oko 50 m, neposredno uz izvor zagađenja. U ovim poljima simuliran je nivo za najmanje 1,0 m niži od Dunava, koji omogućava formiranje depresionog levka i strujanje zagađenih podzemnih voda prema bunaru, uz ograničene kapacitete podzemnih voda čije poznavanje je neophodno za dalje dimenzionisanje nalivajućih (injekcionih) bunara odnosno infiltracionog bazena. U prvoj podvarijanti ovog rešenja, simuliran je rad dva drenažna i dva nalivajuća bunara ili infiltracionog bazena za 10%, 20% i 50% nivoe Dunava. Sračunato je da je pri najnepovoljnijim simuliranim hidrološkim uslovima potrebno drenirati ukupno 9 l/s kontaminiranih podzemnih voda. Na slici 6 prikazana je karta nivoa podzemnih voda na području istraživanja prema prvoj podvarijanti ovog varijantnog rešenja (sa drenažnim i nalivajućim bunarima) 10% trajanja vodostaja Dunava.

U drugoj podvarijanti planirano je dodatno odstranjivanje dela hidrofobne faze LNAPL koja ostaje u nadzidanskoj zoni, prilikom sniženja nivoa podzemnih voda, simuliranjem upuštanja tretirane vode direktno u ovu zonu, na mestu tela kontaminacije, putem plitkih infiltracionih bunara. Na ovaj način simuliranom remedijacionom merom obuhvatila bi se cela geološka sredina.

Drugo varijantno rešenje predstavlja kompleksan pristup i podrazumeva postavljanje neophodnog broja bunara ne samo u zoni žarišta, već i na celom području pristaništa (pretakališta nafte). Kompleksnim pristupom staje se na stranu sigurnosti zaštite u slučaju pojave još nekog kvara ili havarije na složenom postrojenju za pretakanje nafte.

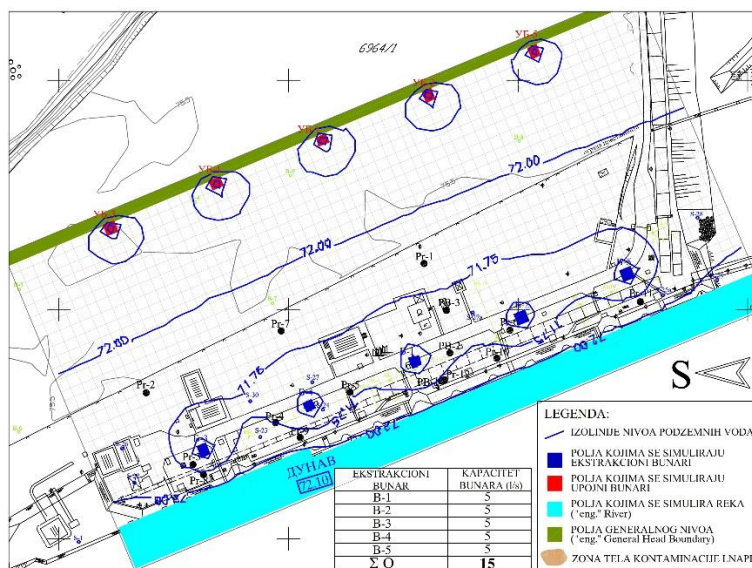
U ovom varijantnom rešenju predviđeno je postavljanje još po tri drenažna bunara, u linijskom nizu paralelnom Dunavu (dva uzvodno i jedan nizvodno od bunara simuliranih u prvom varijantnom rešenju). Tretman i evakuacija podzemnih voda obavlja se na isti način kao u prvoj varijanti.



Slika 6 - Karta nivoa podzemnih voda na području istraživanja prema varijanti I/1

Prognozni proračuni za ovo varijantno rešenje obavljani su za iste granične uslove (10%, 20% i 50% vodostaja Dunava), a sprovedeni proračun je pokazao da je pri najnepovoljnijim simuliranim hidrološkim uslo-

vima potrebno drenirati ukupno 15 l/s zagađenih podzemnih voda. Na slici 7 prikazana je karta nivoa podzemnih voda na području istraživanja prema ovom podvarijantnom rešenju za 10% trajanja vodostaja Dunava.



Slika 7 - Karta nivoa podzemnih voda na području istraživanja prema varijanti II/1

I u ovom varijantnom rešenju, u okviru druge podvarijante, planirano je dodatno odstranjivanje hidrofobne faze LNAPL iz nadizdanske zone upuštanjem (nalivanjem) tretirane vode plitkim infiltracionim bunarima u zoni celog produktovoda, na način prikazan u prethodnom rešenju. Primenom ove remedijacione mere obuhvatila bi se cela potencijalno ugrožena geološka sredina.

Na osnovu prikazanih rezultata uočava se da je primenom hidrodinamičke analize moguće ne samo definisanje hidrotehničkih objekata za potrebe ekstrakcije hidrofobne faze LNAPL, već je i na osnovu sagledavanja bilansa podzemnih voda moguće odrediti i

količine podzemnih voda koje će biti drenirane odnosno nalivane. Ovo može biti od izuzetnog značaja za buduće dimenzionisanje ovih objekata- drenažne (ekstrakcione) bunare, odnosno upojne (nalivne) bunare ili infiltracioni bazen, u zavisnosti od odabranog varijantnog rešenja, odnosno od toga da li se želi samo rešiti aktuelni problem na žarištu zagađenja ili će se problemu pristupiti kompleksno.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je mogućnost primene hidrodinamičke analize u procesu remedijacije kontaminiranih podzemnih voda naftnim ugljovodonocima,

na primeru pristaništa (pretakališta) rafinerije nafte u Pančevu. Cilj sprovedene hidrodinamičke analize strujanja podzemnih voda jeste definisanje optimalnog hidrotehničkog rešenja u okviru odabrane remedijacione metode „pumpanja i tretiranja“ za sanaciju ove vrste zagađenja.

Za potrebe definisanja mogućnosti ekstrakcije hidrofobne faze LNAPL i upuštanja prečišćenih podzemnih voda u izdan, formiran je hidrodinamički model područja istraživanja (pristaništa sa pretakalištem nafte). Kretanje fronta zagađujuće supstance simulirano je u troslojevitoj poroznoj sredini, u nestacionarnim uslovima strujanja sa slobodnim nivoom. Geometrijski odnosi između litoloških članova su verodostojno prikazani na modelu na osnovu velikog broja istražnih radova. Granični uslovi na konturama modela zadati su na osnovu rezultata osmatranja vodostaja Dunava i namenski osmatranih vrednosti pijezometarskih nivoa. Vrednosti filtracionih parametara zadati su na osnovu rezultata namenskih istraživanja. Određeni hidrogeološki parametri menjani su u procesu etaloniranja modela.

Na matematičkom modelu sprovedeni su prognozni proračuni za dva varijantna rešenja za ekstrakciju hidrofobne faze LNAPL (ekstrakcionim i upojnim bunarima ili infiltracionim bazenom). Prvo varijantno rešenje predstavlja metodu „hidrauličke izolacije“ za sanaciju postojećeg problema u zoni žarišta zagađenja. Drugo varijantno rešenje predstavlja kompleksno rešenje sanacije degradacije na celom istražnom području, za slučaj potencijalnog kvara ili havarije na složenom postrojenju za pretakanje nafte koje je u dugogodišnjoj eksploataciji. Izvođenjem simuliranih ekstrakcionih bunara omogućilo bi se uklanjanje hidrofobne faze LNAPL sa površine vode posebnim pumpama - skimerima, dok bi prestale faze zagađenja bile uklanjane posebno predviđenim separatorima i zatim ponovo, simuliranim hidrotehničkim objektima (injekcionim bunarima ili infiltracionim bazenom), u prečišćenom stanju upuštane u izdan.

Dobijeni rezultati hidrodinamičke analize pokazuju na koji način je moguće drenirati kontaminirane podzemne vode iz izdani i upustiti prethodno tretirane podzemne vode u izdan, u zavisnosti od toga da li se želi samo rešiti registrovani problem na žarištu zagađenja ili će se istom pristupiti kompleksno i potencijalni hazard sprečiti i u budućnosti. Praktičan značaj hidrodinamičke metode je, pored odabira hidrotehničkog rešenja i omogućavanje kvalitetnih podloga za dimenzionisanje ovih objekata na osnovu rezultata bilansiranja podzemnih voda.

Na razmatranom području neophodno je, prema unapred definisanom programu i dinamici, na formiranoj mreži novih pijezometarskih bušotina sprovesti

kontinualno osmatranje (monitoring) efekata rada projektovanog sistema za smanjenje koncentracije kontaminanta u podzemnim vodama; ovu mrežu moguće je i proširiti novim osmatračkim objektima u skladu sa dobijenim rezultatima.

Neophodno je napomenuti da metoda hidrodinamičke analize predstavlja inicijalnu ali i neophodnu podlogu, kao i da može imati i određena ograničenja u smislu primene u konkretnom slučaju, te da je u zavisnosti od rezultata efikasnosti remedijacije po potebi treba evaluirati nekom od drugih poznatih metoda.

LITERATURA

- [1] Brusseau ML, Maier RM, Soil and groundwater remediation, *Environmental Monitoring and Characterization*, Pages 335–356, 2004.
- [2] Dimkić M, Pušić M, Vidović D, Đurić D, Boreli-Zdravković Đ. Analiza transporta zagađenja kod određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda u aluvijalnim sredinama. *Vodoprivreda*, 264-266: 203-218, 2013.
- [3] Fetter CW, Boving T, Kremer D, *Contaminated Hydrogeology*, 3 edition, Waveland Press Inc., ISBN 1478632798, 2017.
- [4] Filipovic B, Vujasinovic S, *Zaštita podzemnih voda*, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 1982.
- [5] Grgić Z, Skanski V, Hodzić Z, Aspekti zagađenosti bunarskih voda naftnim derivatima, *Voda i sanitarna tehnika*, 1973.
- [6] Institut IMS, *Tehnički izveštaj o izradi istražno-pijezometarskih radova na lokaciji pristaništa Rafinerije nafte u Pančevu*, 2008.
- [7] Jeongkon Kim M, Corapcioglu Y, Modeling dissolution and volatilization of LNAPL sources migrating on the groundwater table. *Journal of Contaminant Hydrology*. Volume 65, Issues 1–2, Pages 137-158, 2003.
- [8] Krešić N, Vujasinovic S, Matic I, *Remedijacija podzemnih voda i geosredine*, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 2006.
- [9] Mateas DJ, Tick GR, Carroll KC, In situ stabilization of NAPL contaminant source-zones as a remediation technique to reduce mass discharge and flux to groundwater, *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 204, Pages 40-56, 2017.
- [10] Pajić P, *Evaluacija uticaja uspora HE „Đerdap 1“ na formiranje režima podzemnih voda u priobalju Dunava*, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, str. 1-317, 2016.
- [11] Pajić P, Urošević U, The Importance of Establishing Water Source Protection Zones in Order to Prevent Groundwater Contamination (Water Source “Carina”

- Fluorine Contamination) in Proc. *International Science Conference "Reporting for Sustainability"*, Bečići, Montenegro, pp. 399-404, 7-10 May 2013, ISBN 978-86-7550-070-4.
- [12] Pajić P, Urošević U, Polomčić D, Dimkić M, Negative Impact of Backwater Levels of Danube River and its Tributaries to the Groundwater Regime in Meliorated Riverside Areas, in Proc. *IWA Specialist Groundwater Conference*, Belgrade, Serbia, pp. 84-89, 09-11 June 2016, ISBN 978-86-82565-46-8.
- [13] Paria S, Surfactant- enhanced remediation of organic contaminated soil and water. *Advances in Colloid Interface Science*, Volume 138: pp. 24-58, 2008.
- [14] Polomčić D, *Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvoristima izdanskih voda u intergranularnoj poroznoj sredini*, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 2001.
- [15] Polomčić D, Hajdin B, Stevanović Z, Bajić D, Hajdin K, Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia. *Hydrogeology Journal*, Volume 21(7): pp. 1519-1530, 2013.
- [16] Pušić M, *Hidraulika podzemnih voda*, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 2012. ISBN 978-86-7352-231-9
- [17] Thapa B, Kumar KC, Ghimire A, A review on bio-remediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science*, Volume 8(1), pp. 164–170, 2012.
- [18] VND inženjering & konsalting, *Generalni projekat sanacije i rekonstrukcije pretakališta Rafinerije nafte u Pančevu*, 2007.
- [19] Vujasinović S, *Ekcesna zagađenja podzemnih voda derivatima nafte u Srbiji- Hidrogeološki aspekt*. Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 1995.
- [20] Vujasinović S, Matić I, *Osnovi hidrogeoeкологије*, AGM knjiga, 2009.
- [21] Zhang X, Huang GH, Lin Q, Yu H, Petroleum-contaminated groundwater remediation systems design: A data envelopment analysis based approach. *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 3, Part 1, pp. 5666-5672, 2009.

SUMMARY

HYDRODYNAMIC ANALYSIS APPLICATION OF CONTAMINATED GROUNDWATER REMEDIATION TO OIL HYDROCARBONS

In this paper, the application of the hydrodynamic analysis in the selected "pumping and treatment" remediation method of groundwater hydrocarbon pollution in the case of the Pancevo oil refinery is examined. The applied hydrodynamic analysis represents a regular and necessary approach in modern hydrogeology.

Previous chemical analysis of soil and groundwater samples at observation objects revealed their pollution by oil products. New researches included the construction of 12 piezometric boreholes of varying depths, geoelectric soil sounding, "in situ" measurement of the present contaminant, detected as a hydrophobic phase of LNAPL, chemical analysis of soil and groundwater samples with emphasis on total petroleum hydrocarbons (TPH) content, total fats and mineral oils, mercury cations and other characteristic compounds, etc. These researches define the volume of contamination issued by the "light" (LNAPL) contamination phase.

The selected remediation method for this type of pollution is the "Pump and Treat" method, which implies the pumping of contaminated groundwater from aquifer and their subsequent treatment. A hydrodynamic method was used to select the optimal hydrotechnical solution for LNAPL extraction. On the mathematical model, the prediction calculations for two variant solutions were carried out ("hydraulic isolation" and complex) for the application of groundwater contamination remediation characterized as front pollution substance (by extraction and injection wells or infiltration pool). By extraction wells performing, it would be possible to remove the LNAPL from the surface of the water with special pumps-skimmers.

The importance of the hydrodynamic method application is, in addition to the hydrotechnical solution selection for the LNAPL drainage, the provision of quality basis for the dimensioning of these objects based on the results of the groundwater balance.

Key words: contamination; mathematical model; groundwater; remediation; hydrocarbons.