

Бинарни циклус за производњу електричне енергије

Петар Драгаш



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Бинарни циклус за производњу електричне енергије | Петар Драгаш || 2023 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007913>

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ



ДИПЛОМСКИ РАД

БИНАРНИ ЦИКЛУС ЗА ПРОИЗВОДЊУ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Ментор:

проф. др Марија Живковић

Студент:

Петар Драгаш Р65/14

Београд, 2023.

Комисија:

1. Проф. др Марија Живковић, ментор

Универзитет у Београду, Рударско – геолошки факултет

2. Проф. др Дејан Ивезић, члан комисије

Универзитет у Београду, Рударско – геолошки факултет

3. Доц. др Александар Мијатовић, члан комисије

Универзитет у Београду, Рударско – геолошки факултет

Датум одбране: _____

Сажетак

Овај дипломски рад истражује бинарни циклус као иновативну методу производње електричне енергије, која се истиче високом ефикасношћу и еколошком одрживошћу. Бинарни циклус представља технолошки напредну алтернативу традиционалним термоелектранама које користе класичне парне циклусе.

У раду је наглашена еколошка важност бинарног циклуса. Уместо директног коришћења високо-температурних извора попут геотермалних извора или индустријских отпадних топлота, бинарни циклус користи ниске-температурне изворе у комбинацији са радном течностима са нижим тачкама кључања. Ова техника смањује емисију штетних гасова и потенцијално негативне утицаје на животну средину.

Проучени су кључни елементи бинарног циклуса. То укључује избор радне течности, који је од виталног значаја за оптимизацију ефикасности система. Различите радне течности имају различите карактеристике, што директно утиче на енергетски перформансе. Такође, анализирани су и различити системи размене топлоте који могу бити примењени у бинарном циклусу како би се постигла максимална ефикасност.

Analizirani su i elementi sistema sa upotrebivim matematičkim obrascima.

Кључни речи: бинарни циклус, геотермални флуид, радни флуид, излазна снага, термодинамички степен корисности, измењивач топлоте, карнотов циклус, троугласти циклус

Садржај

1.	Увод	8
2.	Геотермална енергија	13
2.1	Порекло и начин преноса геотермалне енергије	14
2.1.1	Унутрашње порекло	15
2.1.2	Спољашње порекло	15
2.2	Енергетски биланс	16
2.3	Основни начин преноса топлоте	17
2.3.1	Кондукција	17
2.3.2	Конвекција	18
2.3.3	Зрачење	19
2.3.4	Основи геотермални процеси	20
2.4	Терестрични топлотни ток и геотермални градијент	21
2.4.1	Терестични топлотни проток и потенцијал у Европи	24
2.4.2	Терестични топлотни проток и потенцијал у Србији	24
2.5	Геотермални системи	28
3.	Геотермални ресурси	30
3.1	Суб-геотермални ресурси	34
3.2	Геотермални ресурси у ужем смислу	35
3.3	Геотермални ресурси са температуром преко 100°C	37
3.3.1	Хидрогеотермални ресурси	37

3.3.2	Напредни геотермални системи (ЕГС)	37
3.4	Коришћење геотермалних ресурса	39
3.4.1	Коришћење ГТЕ за производњу топлотне енергије	39
3.4.2	Коришћење ГТЕ за производњу електричне енергије	39
3.4.3	Геотермалне електране са сувом паром.....	40
3.4.4	Геотермалне електране са накнадним испаравањем (једноструким и двоструким)	42
4.	Геотермалне електране са бинарним циклусом	44
4.1	Анализа турбине	47
4.2	Анализа кондензатора.....	48
4.3	Анализа доводне пумпе	48
4.4	Анализа размењивача топлоте	49
4.5	Избор радног флуида	52
4.5.1	Брзина флуида и величина турбине	54
4.5.2	Еколошка, безбедносна и здравствена својства	56
4.6	Напредни бинарни циклус	57
5.	Закључак.....	59
6.	Литература.....	60

Слика 1- Глобална употреба фосилних горива по врсти горива, мерена у ТWx9	9
Слика 2 - Шематски приказ удела сунчевог зрачења у геотермалном билансу (Киехл и Тренбертх 1997)16	16
Слика 3 - Распоред тектонских плоча на Земљи23	23
Слика 4 - Вредност терестичног топлотног тока Земље23	23
Слика 5 - Основни елементи геотермалног система29	29
Слика 6 - Могућности коришћења геотермалне енергије у зависности од температуре32	32
Слика 7 - Карта геотермалних ресурса Србије36	36
Слика 8 - Принцип рада електране на суву пару41	41
Слика 9 - Принцип рада електране са накнадним испаравањем43	43
Слика 10 - Принцип рада бинарног постројења44	44
Слика 11 - Схематски приказ процеса45	45
Слика 12 - Притисак-енталпија дијаграм за бинарни процес46	46
Слика 13 - Турбина и генератор бинарног система47	47
Слика 14 - Размењивач топлоте: предгрејач и испаривач49	49
Слика 15 - Температура- пренос топлоте дијаграм за предгрејач и испаривач50	50
Слика 16 - Нормално и ретроградно стање радног флуида на Т-С дијаграму53	53
Слика 17 - Два идеална термодинамичка система58	58

Табела 1 - Топлотна проводљивост основних магматских и метаморфних стена и њихових минерала	27
Табела 2 - Термодинамичка својства неких од радних флуида коришћених у бинарном циклусу	52
Табела 3 - Поређење величине турбине при раду са неколико различитих радних флуида	55
Табела 4 - Безбедносна, еколошка и здравствена својства за разматране флуиде .	56

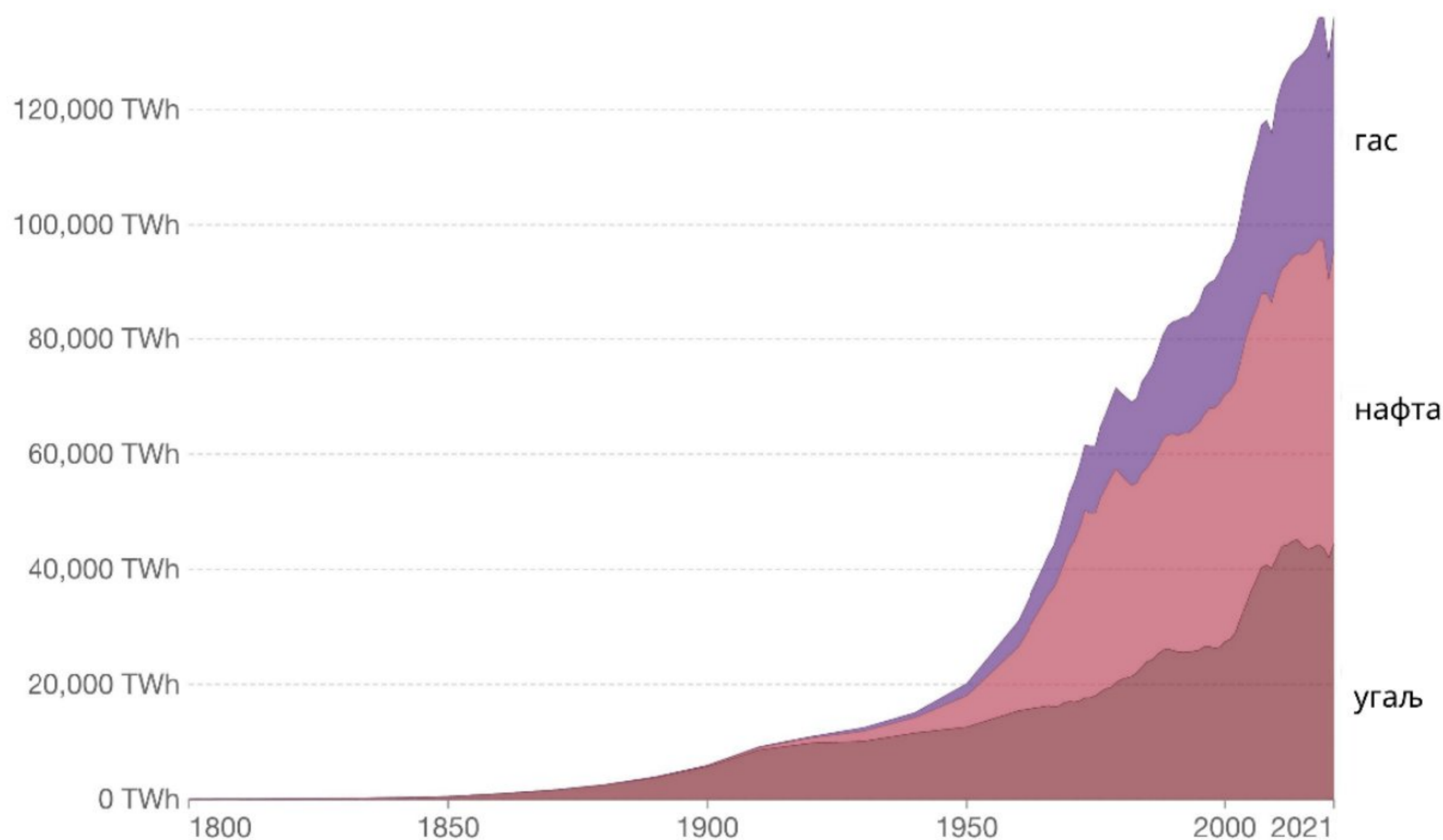
1. Увод

Глобална потреба за енергијом се драматично повећала у неколико последњих деценија, а до 2050 се прогнозира да ће бити двоструко већа него што је у овом тренутку ([хттпс://канадиангеограпхиц.ца](http://канадиангеограпхиц.ца)). Главни разлог свакако јесте континуалан раст људске популације - конкретније говорећи, до поменуте године, прогнозе су да ћемо достићи бројку од 9.5 милијадри људи. Међутим, није скок у популацији једини кривац за данашње забрињавајуће прогнозе. Криви смо и ми данас: наше навике, висок ниво животног комфора, прекомерно коришћење технологије, хиперконзумеризам и хиперпродукција. И док ми свесно или несвесно окрећемо главу од ових горућих проблема и тиме им само доприносимо, игноришемо апсурд да тренутно преко једне целе милијарде људи нема уопште приступ електричној енергији.

За тренутак утехе, наш заједнички дом, планета Земља, је изразито богата сопственим енергетским ресурсима, али ми као њена деца смо некако успели себе да доведемо у ненадоместиву зависност баш од оних најштетнијих извора и по њу, па и по нас. Тренутно доступни начини генерисања енергије у највећој мери су засновани на сагоревању фосилних горива- нешто мање од 80% укупне количине произведене енергије на планети данас. Сагоревање је процес приликом ког се дешава небројано много директних и индиректних штетних последица по околину и здравље нас, али и генерација које долазе.

Глобална употреба фосилних горива

Our World
in Data



извор Our World in Data based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy OurWorldInData.org/fossil-fuels/ • CC BY

Слика 1- Глобална употреба фосилних горива по врсти горива, мерена у ТWh

Тачку без повратка смо нажалост одавно превазишли идући овим путем. Глобално загревање, топљење олова, ритична загађења ваздуха, воде и земљишта су само неке од последица која никада неће моћи бити враћена на фабричка подешавања.

Додатно, јако важан негативан аргумент против коришћења фосилних горива у мери у којој их данас користимо јесте ограниченост резерви и неравномерна распрострањеност. Предвиђања су разна, неки упозоравају да са досадашњим темпом потрошње нећемо их имати ни за наредних 50 година, неки научници мисле да имамо duplo толико, али оно што је неминовно јесте да славине нафте, природног гаса и угља не могу, а и не требају вечно бити отворене.

Обновљиви извори енергије су међу водећим конкурентним и одрживим одговорима на овако комплексна питања, посебно у смислу смањења зависности од фосилних горива. Постоје у бројним облицима, док је њихова примена најпре условљена географским и сезоналним факторима. Можемо их незванично поделити у групу примарних: соларна енергија, биомаса, енергија ветра, хидро-потенцијал и геотермална енергија; и у групу нешто мање заступљених, секундарних: енергија плиме и осеке, морских таласа, морских струја и биогаз.

Као што им и сам назив каже, овде спадају извори енергије који се обнављају сталним природним процесима и који се, посматрано на људски век, никада не могу потрошити (колико тренутно и колике су прогнозе по питању коришћења обновљивих извора енергије). Поред тога, енергија добијена из обновљивих извора се сматра готово потпуно чистом, с'обзиром да су процеси њихове трансформације углавном прости, механички и не захтевају примарно сагоревање, нити било које друге хемијски штетне нус-појаве. На овај начин ми бирамо здравији ваздух, воду, земљиште, односно виши здравствени квалитет живота.

Занимљиво је поменути да 11% глобалног БДП (око 9 трилиона = 10^{12} УСД) свет троши на очување здравља популације. Овим новцем СЗО се наравно бори и против здравствених проблема који нису ни у каквој вези са проблемима изазваним сагоревањем фосилних горива, али свесни смо да је удео тих проблема и тренутно огроман, а сваким даном све већи. Здрављим одлукама на нивоу енергетске производње и потрошње, односно еколошке свести, можемо постићи финансијски простор за репрограме буџета и новцем који трошимо да решавамо последице по здравље сагоревања фосилних горива, коначно почнемо да радимо на узроку, а то је свет чистији од полутаната.

Још један социолошки глас разума јесте што насупротив фосилним енергентима, који су од открића увек били мета спорова, сукоба и ратова, обновљиви извори имају потпуно мирну природу употребе. Другим речима, трговински закони, политичке нестабилности или територијалне претензије не утичу на коришћење ОИЕ.

Објективно посматрајући ситуацију, не можемо остати ни на овом претерано идиличном углу посматрања обновљивих извора енергије. Испрва све делује лако решиво, док је истина прилично супротна.

Свет који данас познајемо још увек није достигао степен развоја у ком би могао у потпуности или бар већим делом, да се ограда од употребе фосилних горива. Иако можда нису условљене политичким и трговачким факторима, ОИЕ покрећу природне силе, што их јасно и директно доводи у њихову зависност. Уколико локалитет нема довољан број ветровитих или сунчаних дана, нема речни потенцијал или пропусне стене над геотермалним водама, нажалост нема ни прилике да се бави зеленом енергијом. Чак када су ови фактори и повољни, потребна су висока иницијална улагања за потребе истражних радова, изградњу постројења док је степен ефикасности углавном далеко испод оног који се постиже сагоревањем фосилних горива.

Дакле, низ промена које су потребне да се десе за неку већу комерцијализацију обновљивих извора енергије је поприлично велик, а промена се не може десити преко ноћи. И поред присутних напора светске енергетске политике у правцу те комерцијализације, нећемо моћи да избегнемо комбиновани сценарио. Чињеница је да наше данашње потребе за енергијом једино можемо задовољити служећи се свим расположивим енергетским изворима са тенденцијом ка овим здравијим.

До 2040. године, прогнозе су да ће из обновљивих извора долазити 40% генерисане енергије ([хттпс://канадиангеограпхиц.ца](http://канадиангеограпхиц.ца)). Можда није задовољавајући проценат, али је опет помак у пожељном правцу.

Што се тиче потенцијала на светском нивоу, несумњиво највећи потенцијал има соларна енергија (потенцијал од око 23000 TW/год – чак 10 пута већи потенцијал него сви фосилни ресурси заједно). Потенцијал представља, наравно, опет само полазну основу и често није у складу са актуелном производњом, коришћењем и потрошњом. Да би дошло до реализације, неопходан је низ предуслова, попут горе поменутих.

Поред потенцијала соларне енергије, један од водећих извора обновљиве енергије јесте и геотермална енергија. Многу аутори данас сматрају да уколико развој технологија коришћења водне снаге и геотермалне енергије буду довољно форсирани, фосилни извори енергије би могли да премосте период потребан да се значајно развије технологија чистих горива, као и јефтинија технологија коришћења осталих обновљивих извора енергије, како би се обезбедила прерасподела у светском снабдевању енергијом.

Тема геотермалне енергије, под окриљем зелене агенде, добија све више на популарности како у свету, тако и код нас. Бројни су разлози, који ће даље бити детаљније разрађени у овом раду. Геотермална енергија је део решења и важно је приближити је садашњим и будућим генерацијама јер су нам бројне иновације потребне, како на пољу геотермалне, тако и свих осталих врста енергије.

2. Геотермална енергија

Назив геотермална енергија потиче од грчких речи 'Геа' – земља и 'тхерме' – топлота, а сам појам представља енергију акумулирану у виду топлоте испод површине чврстог тла. У енергетском смислу, геотермална енергија представља онај део геотермалне топлоте који се може употребити као корисна топлота за њено директно коришћење или за претварање у друге видове енергије.

Топлота потиче највећим делом од топлоте Земљиног језгра (4000-6000°Ц на 6000км дубине), као и радиоактивног распадања стена и изотопа урана, торијума и калијума. У унутрашњости Земље акумулирана топлота износи $12,6 \times 10^{24}$ MJ, док у Земљиној кори $5,4 \times 10^{21}$ MJ. Ако тај капацитет посматрамо из угла енергетских потреба човечанства, топлоту акумулирану у Земљиној унутрашњости је немогуће потрошити, те се зато може сматрати неограниченим, односно обновљивим извором енергије.

Деловањем топлоте из Земљиног језгра, топе се стене у земљиним омотачу и формира се магма. Магма се даље креће према земљиној кори, преносећи топлоту конвекцијом. Она може тећи као лава, мирно или експлозивно избијајући на површину или може остати испод површине терена грејући околне стене и подземне воде. Од туда и познајемо 2 конвенционална облика ГЕ:

- хидро-геотермална - када се топлота из унутрашњости земље акумулира у води и гасовима;
- петро-термална - акумулирање се одвија у чврстим стенама.

Геотермалне воде мигрирају навише кроз раседне зоне и пукотине, избијајући на површину у виду топлих извора или гејзира. Међутим, највећи део ових вода остаје под земљом, заробљен у пукотинама и порозним стенама, формирајући тако геотермалне резервоаре.

Под нормалним условима на дубини од 1 до 1.5км, очекиване температуре су од 30-50°C; у геотермалним подручјима температура ће вероватно достићи 100-150°C на сличним дубинама. У областима у близини сударања тектонских плоча, температуре могу достићи и до 400°C.

2.1 Порекло и начин преноса геотермалне енергије

Иако је традиционално мишљење до скоро било да се појам геотермалне енергије односи само на високо-температурне појаве и на енергију насталу преносом топлоте из Земљине унутрашњости, ЕУ је недавно дефинитивно потврдила да се и плитка топлота у Земљи класификује као геотермална енергија. ЕУ Директива бр 2009/28/ЕЦ дефинише појам геотермалне енергије као сваки вид енергије ускладиштен у форми топлоте испод површине тла.

Таква дефиниција је отворила приступ проширењу теорије о пореклу геотермалне енергије, па се тако поред топлоте која се преноси из средишта Земље, у обзир рачуна и количина топлоте која допире у површинске слојеве Земље зрачењем са Сунца.

Дакле, најшире посматрано, порекло ГЕ у Земљи може бити двојако:

- **Унутрашње**, из унутрашњости Земље и
- **Спољашње**, настаје сунчевим загревањем.

2.1.1 Унутрашње порекло

Као што је претходно поменуто ГТЕ која се налази у земљиној кори потиче у највећем делу од радиоактивних распада, односно радиогене топлоте (80%). Највећи део распада елемената дешава се у Земљиној кори и на овај начин се произведе око 900ЕЈ/годишње. Остали процеси који утичу на порекло ГТЕ су мање битни јер свеукупно имају мању улогу:

- Гравитационе диференцијације њене праматерије;
- Конверзије земљине ротационе енергије у топлотну.

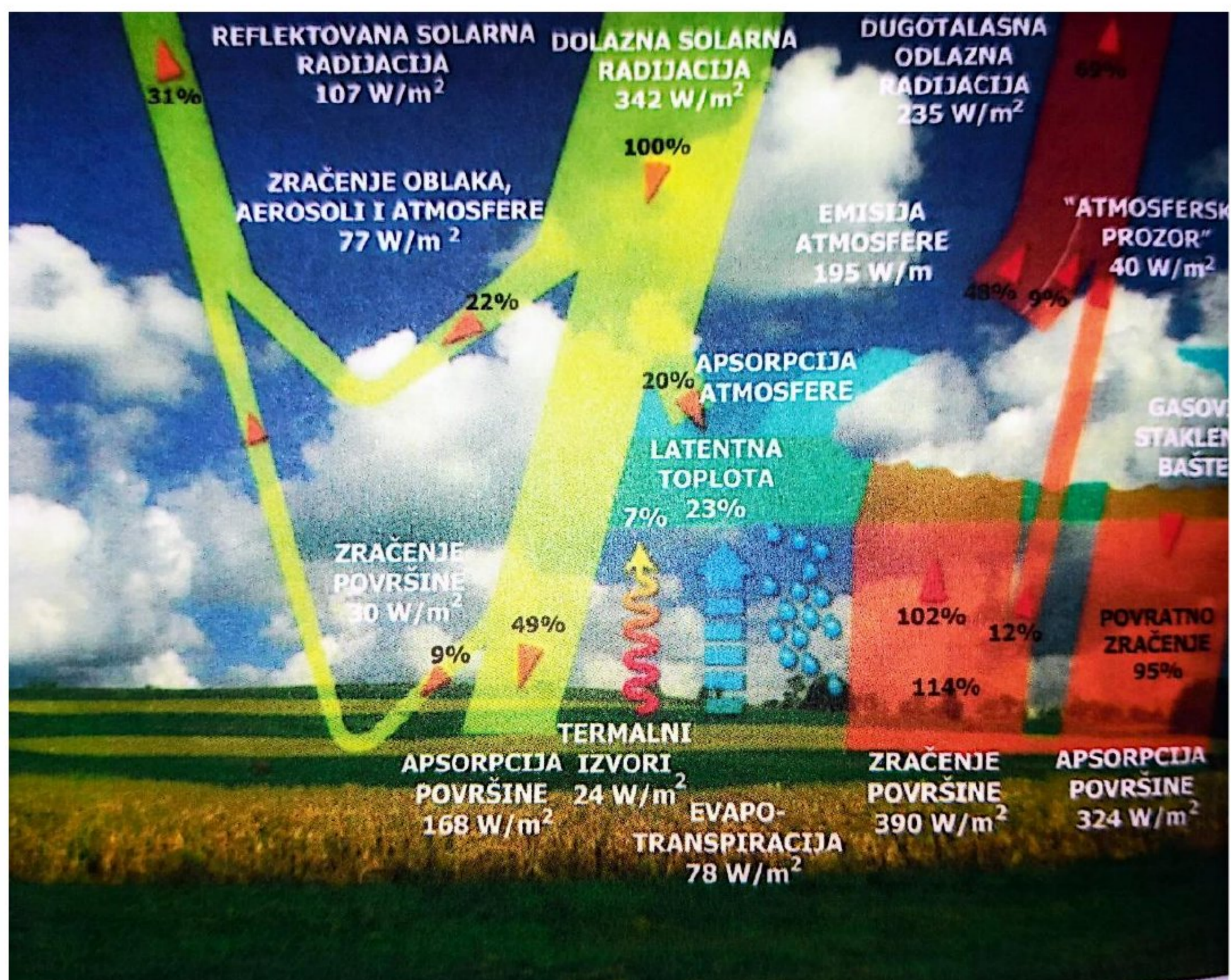
2.1.2 Спољашње порекло

Топлота површинских слојева је у највећој мери последица сунчевог зрачења коју је земљина површина апсорбовала. Земљина површина заправо има улогу огромног соларног колектора. Дубина до које се осећа овај утицај је до 10м.

Поред тога, у површинским деловима такође се региструје и утицај геотермалног топлотног тока, који утиче на топлотни биланс у зонама дубине 10-12м.

Просечна глобална количина соларне енергије која доспева на Земљу је $170\text{W}/\text{m}^2$. У поређењу са просечним топлотним током који доспева из унутрашњости Земље од $0.09\text{W}/\text{m}^2$, разлика је и више него очигледна. Ова количина одговара енергији од 5.4 ГЈ годишње по m^2 , што отприлике одговара енергији која се може добити из једног барела нафте, 200кг угља или 140m^3 природног гаса.

Наравно, не прође сва количина сунчеве енергије у земљину унутрашњост, одређен део се и рефлектује.



Слика 2 - Шематски приказ удела сунчевог зрачења у геотермалном билансу (Киехл и Тренбертх 1997)

2.2 Енергетски биланс

Пренос топлоте врши се јер постоји температурна разлика између површине и унутрашњости планете. Док је просечна температура на земљиној површини 14°C , температура на граници језгра и мантла износи $3000\text{--}4000^{\circ}\text{C}$, а температура самог језгра иде и до 6000°C .

Оваква температурна разлика доприноси сталном преносу топлоте ка земљиној површини и одатле у атмосферу. Са друге стране, већ је изнето да се од сунца топлота дозрачује на исту површину. Одређивање енергетског биланса површине земље је веома сложен поступак.

2.3 Основни начин преноса топлоте

Унутрашња термичка енергија је облик енергије која представља енергију садржану у неком термодинамичком систему (одређена количина материја ограничена затвореном површином). Ако два физичка тела имају исту температуру, сматра се да су у топлотној равнотежи и у том случају не утичу једно на друго, тј не постоји пренос топлотне енергије. Ако је једно тело топлије (има вишу температуру) од другог, јавља се пренос топлотне енергије од топлијег ка хладнијем. Пренос топлоте са хладнијег тела према топлијем није могућ спонтано. Начини преноса могу бити:

- Кондукција
- Конвекција
- Зрачење
-

2.3.1 Кондукција

Топлотна кондукција представља процес којим се топлота преноси кроз чврсте материјале, течности или гасове процесима молекуларне интеракције. Кондуктивни пренос топлоте исказан је кроз Фуријеов закон на основу ког се закључује (у идеалним термодинамичким условима и без губитака конвекцијом или зрачењем) да ће топлота бити кондукована са топлијег на хладније тело сразмерно вредности његове топлотне проводљивости λ . То дакле значи да вредности топлотне проводљивости стена имају кључну улогу у вредностима кондуктивног преноса топлоте из унутрашњости Земље.

Вредност Земљиног кондуктивног топлотног протока је процењена на око 31 TW, скоро половина од укупне количине топлоте која долази из унутрашњости Земље.

Највећи део стена и других геолошких средина имају вредност топлотне проводљивости у опсегу $1-3\text{W/мК}$. Што се минералног састава тиче, кварц има највећу топлотну проводљивост од око 7W/мк , што даље указује да топлотна проводљивост стена практично зависи од садржаја кварца у њима. Насупрот томе, вода има ниске вредности топлотне проводљивости ($1.5-2\text{W/мк}$). Најниже вредности имају суви, порозни седименти, попут добро сортираних пескова или прашина где су вредности топлотне проводљивости испод <1 .

Из изнетог следи да су најбољи геолошки кондуктори стене са ниском порозношћу, густе и компактне структуре са високим садржајем кварца. Типичан такав пример је гранит.

2.3.2 Конвекција

Флуиди су врста материјала која се карактерише способношћу складиштења топлоте, нпр вода складишти око $4,2\text{КЈ}$ по једном литру за сваки $^{\circ}\text{Ц}$ температуре. Ако се вода креће, она са собом такође преноси и ту топлоту. Пренос топлоте који се јавља услед особине флуида за кретањем назива се конвекција. Конвекција је, дакле, процес при ком се топлота преноси кретањем маса молекула флуида са једног места на друго.

Конвективни пренос топлоте бројчано је одређен Њутновим Законом. На основу њега се закључује да конвекција директно зависи од коефицијента конвекције (прелаза топлоте), а да је он даље условљен од параметра: разлика температура, брзине и начина струјања флуида (ламинарно или турбулентно), врсте стена кроз коју се креће као и од врсте флуида. Његове вредности за ваздух износе $5-25 \text{ W/m}^2\text{K}$, а за воду $25-100 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Кретање магме типичан је пример конвективног преноса топлоте. Топлота настала радиоактивним распадањима у унутрашњости земље ствара магму (истопљене стене) у астеносфери. Астеносфера (70-250км) је део мантла (омотача) који се простире до дубине од 2900км. Она се знатно разликује у односу на круту и чврсту литосферу (0-70 км). Велике конвективне струје из астеносфере преносе топлоту до површине износећи врелу магму мале густине на површину и уједно гурајући хладнију, гушћу магму у дубље делове. Та цикличност карактерише се типичним конвективним преносом.

Слично цикличности кретања магме различитих густина, хладне подземне воде се у оквиру геотермалног резервоара спуштају на веће дубине, загревају се, а затим се због разлике у густини крећу ка површини терена где се дренирају. На њихово место долазе нове хладне, углавном атмосферске воде и успоставља се цикличност конвективног трансфера топлоте.

2.3.3 Зрачење

Енергија која се преноси у облику електромагнетних таласа назива се зрачење. Електромагнетни таласи могу бити различитих таласних дужина, укључујући и инфрацрвено (невидљиво) зрачење, које је главни начин преношења топлотне енергије. С'обзиром да се електромагнетни таласи простирати и кроз вакуум, нису потребни никакви предуслови попут постојања неког материјала, или другог медијума како би се топлота простирала на овај начин.

Сваки материјал који садржи унутрашњу термичку енергију, емитује зрачење.

*Главни механизам преноса пренос топлоте кроз Земљино језгро, посебно кроз спољашње језгро је конвекција (кроз флуидну, течну магму), а уласком у очврсли омотач и кору кондукција постаје доминантан начин пренос топлоте. Земља такође емитује своју топлоту и зрачењем кроз атмосферу.

2.3.4 Основи геотермални процеси

У геотермалној енергији постоји више параметара који квантификују топлотне карактеристике медијума кроз који се топлота преноси – они одређују колико је нека стена способна да складишти и да проводи топлоту. Главни параметар који дефинише способност стене или другог медијума да складишти топлоту јесте **специфични топлотни капацитет**.

Специфични топлотни капацитет (специфична топлота) представља склоност било ког медијума (чврстог, течног или гасовитог) да складишти топлоту унутар себе. То је количина топлоте потребна да се јединици мере неког тела температура промени за 1К.

Специфични топлотни капацитет се може изразити на 3 начина:

- Масени стк – c , $J/(kg \times K)$
- Запремински стк – c' , $J/(m^3 \times K)$
- Моларни стк – $C=M \times c$, $J/(kmol \times K)$

Параметар који дефинише способност стене да проводи топлоту је **топлотна проводљивост**.

Топлотна проводљивост је количина топлоте Q , која се за време t спроведе кроз стену на растојању x , у правцу нормалном на попречни пресек површине F , услед температурне разлике ΔT , у стационарним условима и када је пренос топлоте узрокован искључиво температурном разликом.

Јединица за топлотну проводљивост је $W/(m \times k)$, и добија се из једначине Фуријевог закона:

$$Q = -\lambda F \frac{d\theta}{dx}; \text{ следи } \lambda = \frac{Q}{F \frac{dT}{dx}}$$

$$\text{Из тога следи да је } \lambda = \frac{W}{\frac{m^2 k}{m}} = \frac{W}{m k} = W m^{-1} K^{-1}$$

2.4 Терестрични топлотни ток и геотермални градијент

Пренос топлоте кроз Земљу односно литосферу, доминантно се врши кондуктивним начином, у просторно хомогеном смислу. Другим речима, претпоставља се да су геотермални градијент и топлотни ток релативно униформисани у свим деловима Земље.

Терестични топлотни проток (Земљин топлотни проток, геотермални топлотни проток или само топлотни проток) представља топлоту која се кондукцијом преноси из Земљине унутрашњости до Земљине површине. Просечна вредност Земљиног топлотног протока је реда величине $60-100 \text{ mW/m}^2$, са глобалном упрошћеношћу на 87 mW/m^2 .

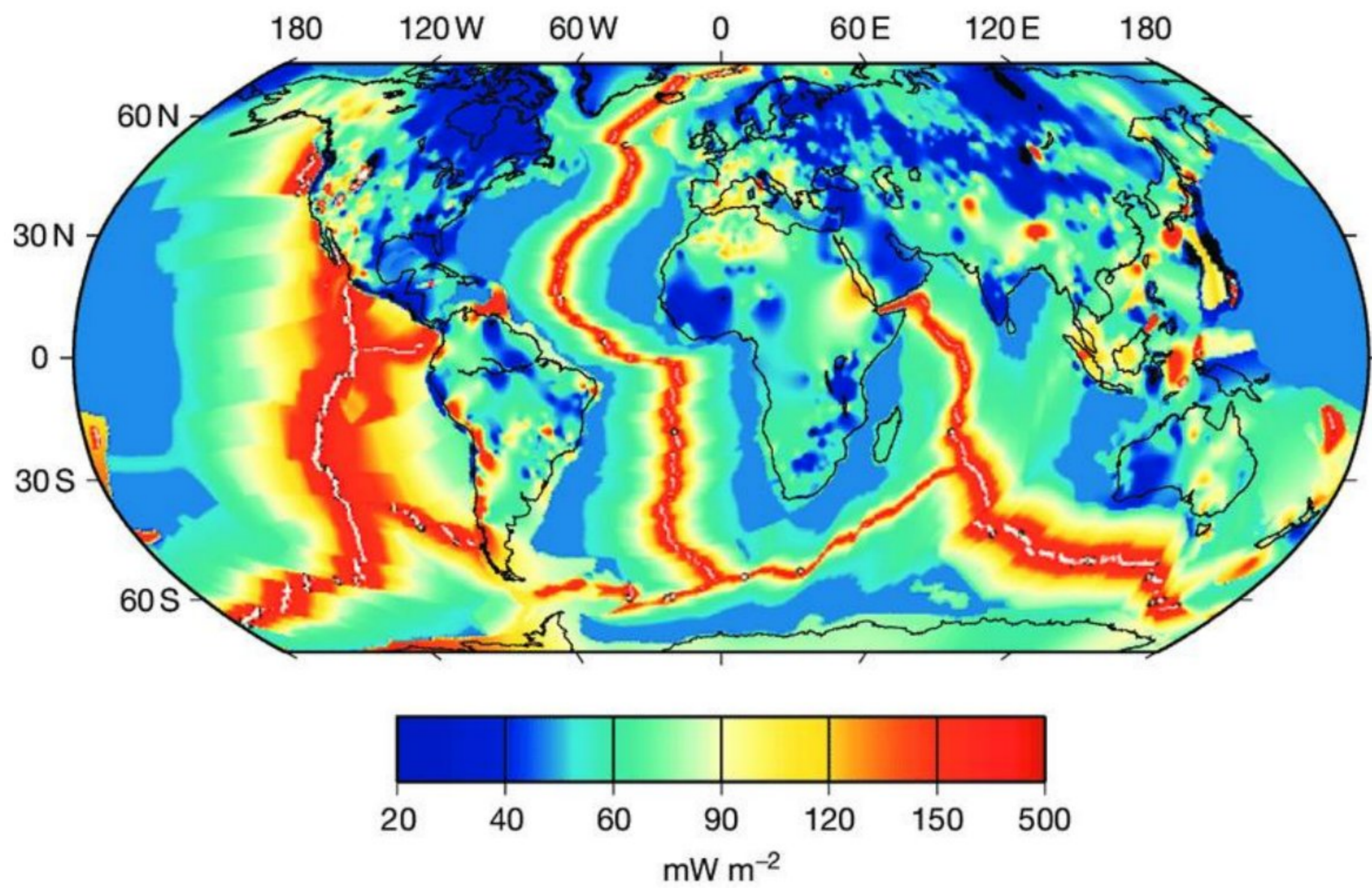
Геотермални градијент представља пораст температуре са дубином Земље. Његове просечне вредности су $2-3.5^\circ\text{C}$ на 100m . Треба напоменути да се прорачун очекиваних температура на неким дубинама коришћењем геотермалног градијента

не почиње рачунањем од нуле, већ од средње годишње температуре ваздуха сваког појединачног места на ком се прорачун врши. Геотермалне карактеристике неког терена, а самим тим и вредности топлотног тока и геотермалног градијента, зависе од више фактора: дебљине и састава Земљине коре, старости тектонских активности, врсте магматских процеса, садржаја радиоактивних елемената у стенама и хидро-геолошких карактеристика.

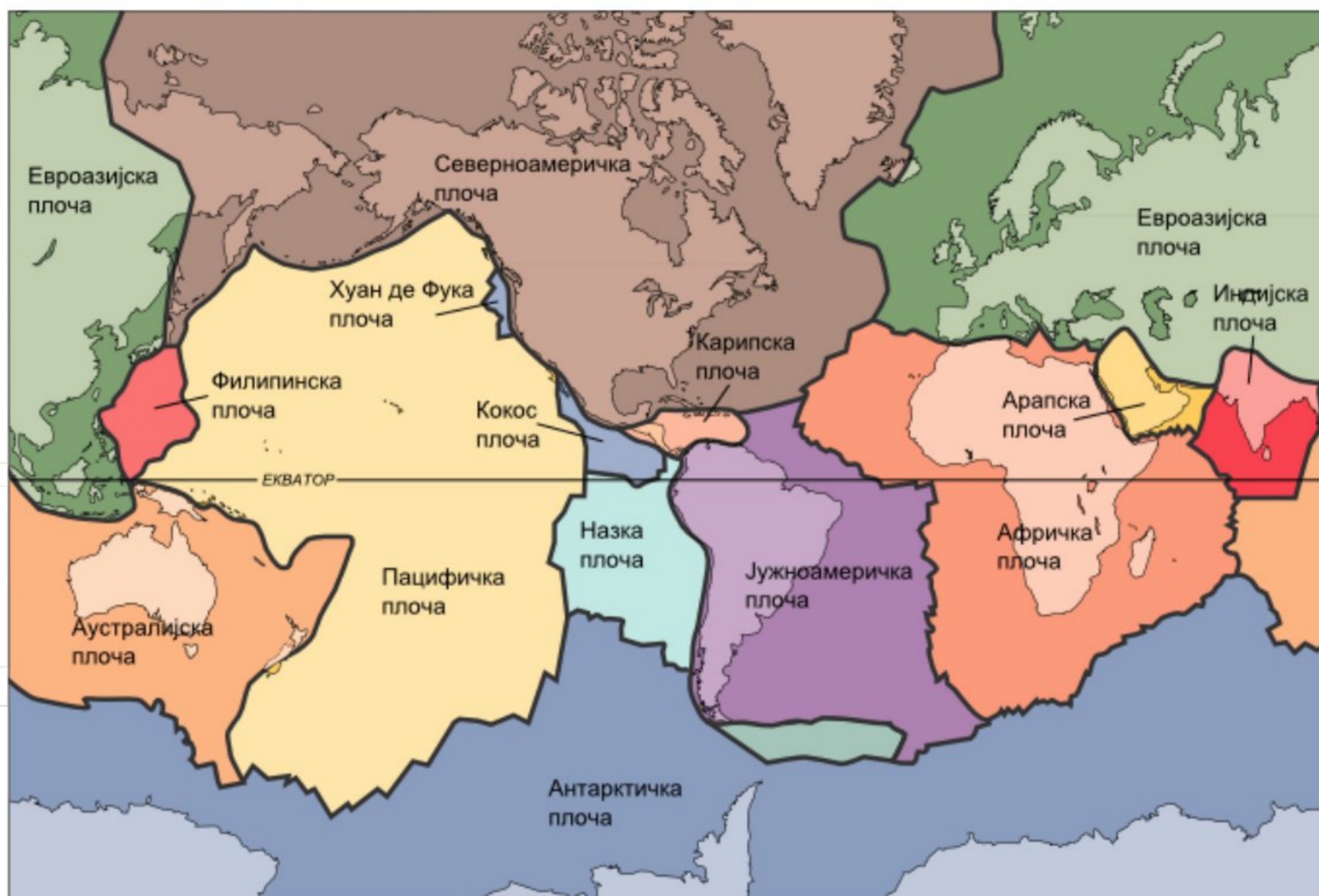
Имајући у виду да је земљин полупречник 6370км, обим 40 000км, и укупна површина око 510 милиона км², може се срачнати да је укупни топлотни проток на Земљи око 44 TW.

Вредности терестичног топлотног протока земље се крећу у широким опсегу од 0 до 350 мW/м², зависно од близине тектонских плоча. То је разумљиво, с'обзиром да та места представљају директан контакт атмосфере и хидросфере са ужареном магмом која долази из мантла.

На сликама испод приказан је распоред тектонских плоча и детаљ колизије између две тектонске плоче и механизме истицања магме на површину или океанско дно.



Слика 4 - Вредност терестичног топлотног тока Земље



Слика 3 - Распоред тектонских плоча на Земљи

2.4.1 Терестични топлотни проток и потенцијал у Европи

Области са највећом густином топлотног протока у Европи су Исланд, Италија, Грчка, делови Француске, Немачке и Аустрије. Исланд се налази на директном гребену раздвајања Евро-азијске и Северноамеричке тектонске плоче и као острво представља огроман вулкан који је настао непрестаним изливањем лаве на дну Атлантског океана. Поједине медитеранске земље такође су у зони контакта две тектонске плоче: Евро-азијске и Афричке. Алпски и Панонски регион који су настали подвлачењем Афричке под Евро-азијску плочу, такође су у неким својим деловима веома перспективни са аспекта експлоатације геотермалне енергије.

Земље са ниским вредностима топлотног тока су: Ирска, Шведска, Норвешка, Пољска и Велика Британија.

Максималне вредности топлотног тока у Европи иду преко 150 mW/m^2 , док се минималне вредности крећу испод 30 mW/m^2 .

2.4.2 Терестични топлотни проток и потенцијал у Србији

Дебљина Земљине коре на територији Србије је променљива и расте у правцу север-југ. Дебљина литосфере најмања је у подручју Панонског басена, Српско-Македонског масива и његовог граничног дела са Динаридима и износи око 40км. На подручју Карпато-Балканида и осталог дела Динарида достиже 150км. На подручју Мезијске платформе је највећа, 160-180км. У Српско-Македонском масиву њена дебљина је око 32 км, а у подручју Карпато-Балканида од 33-38 км.

Вредности густине терестичног топлотног протока на највећем делу територије Србије су веће од његове просечне вредности за континентални део Европе. Највеће вредности ($>100 \text{ mW/m}^2$) су у Панонском басену, Српско-

Македонском масиву и граничном делу Динарида са Српско-Македонским масивом. Најмање вредности су у подручју Мезијске платформе.

Терени у Србији изграђени су од тврдих стена и због тако повољних хидрогеолошких и геотермалних карактеристика. У Србији се налази око 160 извора геотермалних вода са температуром већом од 15°C. Најтоплији су извори у Врањској Бањи где температура износи до 96°C.

Процењена укупна количина топлоте садржане у налазиштима геотермалних вода у Србији је око два пута већа од еквивалентне количине топлоте која би се добила сагоревањем свих резерви угља. У Војводини постоје и 62 вештачка геотермална извора (бушотине) укупне издашности од 550 л/с и топлотне снаге од око 50 MW. У делу Србије јужно од Саве и Дунава налази се још 48 бушотина са процењеном снагом од 108 MW. Ови подаци указују на велики потенцијал за експлоатацију геотермалне енергије који је тренутно готово у потпуности неискоришћен.

У Србији је веома изражен проблем недовољне енергетске ефикасности и нерационалног коришћења постојећих извора или бушотина које се налазе у експлоатацији. У термалним бањама се не посвећује скоро никаква пажња енергетској ефикасности и велике количине топле воде се испуштају као некорисне, иако би се могле искористити применом топлотних пумпи. Истовремено се простор греје помоћу угља, нафте или електричне енергије. Уколико би се извршила рационализација коришћења топлотне енергије из топлих извора у бањама, онда би из истих извора енергијом могли да се снабдевају и нови атрактивнији садржаји. Такође, будући корисници за сада запечаћених бушотина треба на време да се упознају са начинима рационалног коришћења максимума енергетског потенцијала чиме ће и финансијске анализе показати повољније резултате

	Топлотна проводљивост ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Запремински топлотни капацитет (MJm^3K^{-1})
Стена		
Гранит	3,0 – 4,0 (3,4)	1,6 – 3,1 (2,4)
Базалт	1,3 – 2,3 (1,7)	2,4 – 2,6
Диорит	1,7 – 3,0 (2,6)	2,9 – 3,3
Гнајс	2,5 – 4,5 (2,9)	2,1 – 2,6 (2,1)
Кварцит	5,5 – 7,5 (6,0)	1,9 – 2,7 (2,1)
Кречњак	1,5 – 3,0	1,9 – 2,4 (2,3)
Пешчар	2,0 – 6,5 (2,3)	2,0 – 2,1
Суви песак/шљунак	0,3 – 0,12	1,2 – 1,7
Незасићени песак	0,7 – 2,0	1,6 – 2,2 (1,8)
Засићени песак/шљунак	1,7 – 3,8 (2,4)	2,2 – 2,9 (2,5)
Сува глина	0,8 – 1,2	1,5 – 1,7
Влажна глина	0,9 – 1,2	1,6 – 2,8 (2,4)
Угаљ	0,3	1,8
Аркоза	2,3 – 3,7	2,0
Минерал		
Плагиоклас	1,5 – 2,3	1,64 – 2,21
Лискун	2,0 – 2,23	2,2 – 2,3
К-фелдспат	2,3 – 2,5	1,6 – 1,8
Оливин	3,1 – 5,1	2,0 – 3,6
Кварц	7,7 – 7,8	1,9 – 2,0
Калцит	3,4 – 3,6	2,24

Пирит	19,2 – 23,2	2,58
Галенит	2,3 – 2,8	1,59
Хематит	11,3 – 12,4	3,19
Дијамант	545	-
Халит	5,9 – 6,5	1,98

Табела 1 - Топлотна проводљивост основних магматских и метаморфних стена и њихових минерала

2.5 Геотермални системи

Геотермални системи представљају делове горњих зона литосфере, где у ограниченем простору флуиди преносе конвективним путем топлоту од топлотног извора ка хладнијим деловима, најчешће до површине земље. (Хочстеин 1990)

Геотермални системи су увек састављени од три главна елемента:

1. Извора топлоте
2. Резервоара
3. Флуида који преноси топлоту

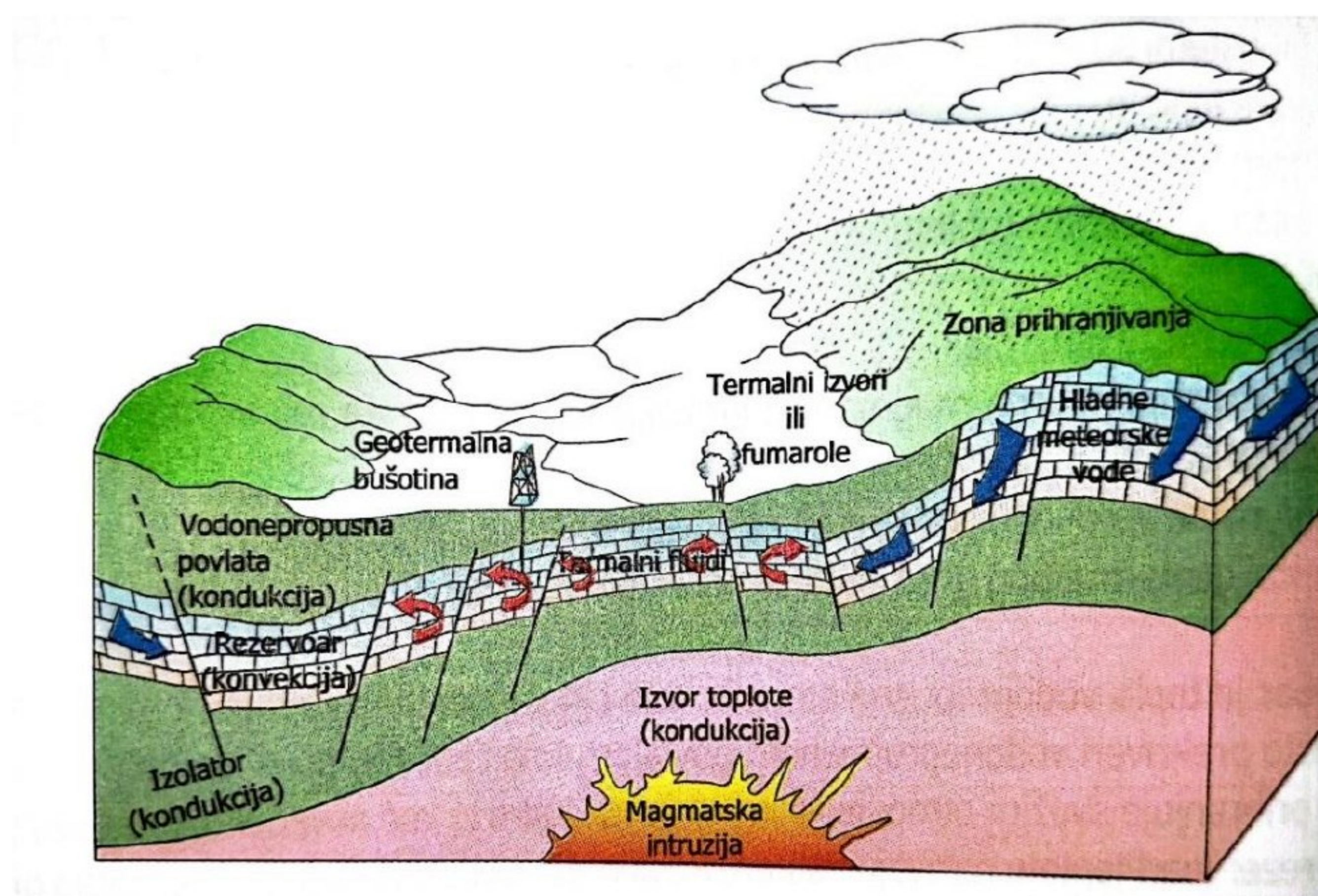
Извор топлоте може бити:

- a) Високотемпературна магматска интрузија која је досегла релативно плитку дубину (преко 600°C, 5-10км)
- b) Велике вредности геотермалног топлотног протока
- c) Утицај геотермалног градијента са порастом дубине

Резервоар је топла водопрпусна стена из које циркулишући флуид „извлачи“ топлоту. Резервоар је најчешће прекривен водонепропусном повлатом и најчешће је повезан са површином, одакле се прихрањује свежим атмосферским водама.

Флуиди који преносе топлоту, у најчешћем броју случајева су подземне воде атмосферског порекла, у течној фази или фази водене паре, зависно од температуре и притиска. Оне често могу носити гасове попут CO_2 , H_2S , итд.

Од свих елемената геотермалног система прва компонента – извор топлоте једини мора да буде природан. У осталим случајевима преостала два могу бити и вештачки формирана, односно изазвана. На пример, геотермалне воде исцрпљене из резервоара да би покренуле турбине у геоелектранама, након употребе утискују се назад у геосредину, односно у исти резервоар кроз ињекционе бушотине. На тај начин природно прихрањивање подземних вода замењено је вештачким.



Слика 5 - Основни елементи геотермалног система

Са друге стране, у такозваним ЕГС (Енханцед Геотхермал Системс) и резервоар и флуид су вештачки. Вода се под високим притиском упумпава у врелу, компакну стену изазивајући хидраулички дезинтеграцију у стени. Вода се потом у тим стенама које добијају функцију резервоара, загрева и експлоатише другим бунаром као врела вода или пара.

Конвективни геотермални системи могу бити формирану у најразличитијим стенским формацијама, од алувијјалних песковито-шљунковитих седимената, преко карстних средина до магматских и метаморфних масива.

3. Геотермални ресурси

За израду било каквих пројеката у домену коришћења геотермалне енергије, односно за услове експлоатације, постоје одређени параметри које је нужно одређени извор да задовољи да би уопште ушли у фазу разматрања. Не постоје унифицирано дефинисани параметри, али неки од значајних величина и параметара су:

- **Температура** - искористива геотермална температура може ићи од 10°C (геотермалне топлотне пумпе за грејање) до температура изнад 300°C за постројења која се баве производњом електричне енергије.
- **Енергетска оправданост** – количина енергије која се може економски оправдано произвести на рачун температуре, протока и технике обраде флуида
- **Употребни фактор** – због знатних улагања у почетним фазама бушења и прављења трансформационих постројења, најеконичније се сматра да енергија има директну примену на лицу места експлоатације, без губитака насталих у току транспорта, складиштења и слично.
- **Дубина бушотине** – што је бушотина дупља, то су трошкови већи. Данашње дубине бушотина из ове сфере иду од 60-3000м. У екстремним случајевима могу бити и дубље уколико се процени висока ефикасност енергетске производње.
- **Транспорт енергије** – Геотермална пару има смисла користити у опсегу од километар до два од самог изворишта. Загрејана вода може бити транспортована и до 50км (иако је најбоља пракса такође 1-2км) у зависности од жељених излазних параметара. Док произведена електрична енергија се може преносити и јако дуге дистанце, у зависности од производног и логистичког система.

На основу економске оправданости, могу се дефинисати два појма:

1. **Геотермални ресурси** – који представљају онај део расположивих и доступних ресурса који би могли бити експлоатисани на економски оправданим и легалним основама у одређеном времену у будућности (мањем од 100 година).
2. **Геотермалне резерве** – које представљају део расположивих и доступних ресурса који се може тренутно економски оправдано експлоатисати у односу на друге енергетске ресурсе и који су утврђени и доказани бушењем и/или другим геохемијским, геофизичким или геолошким методама.

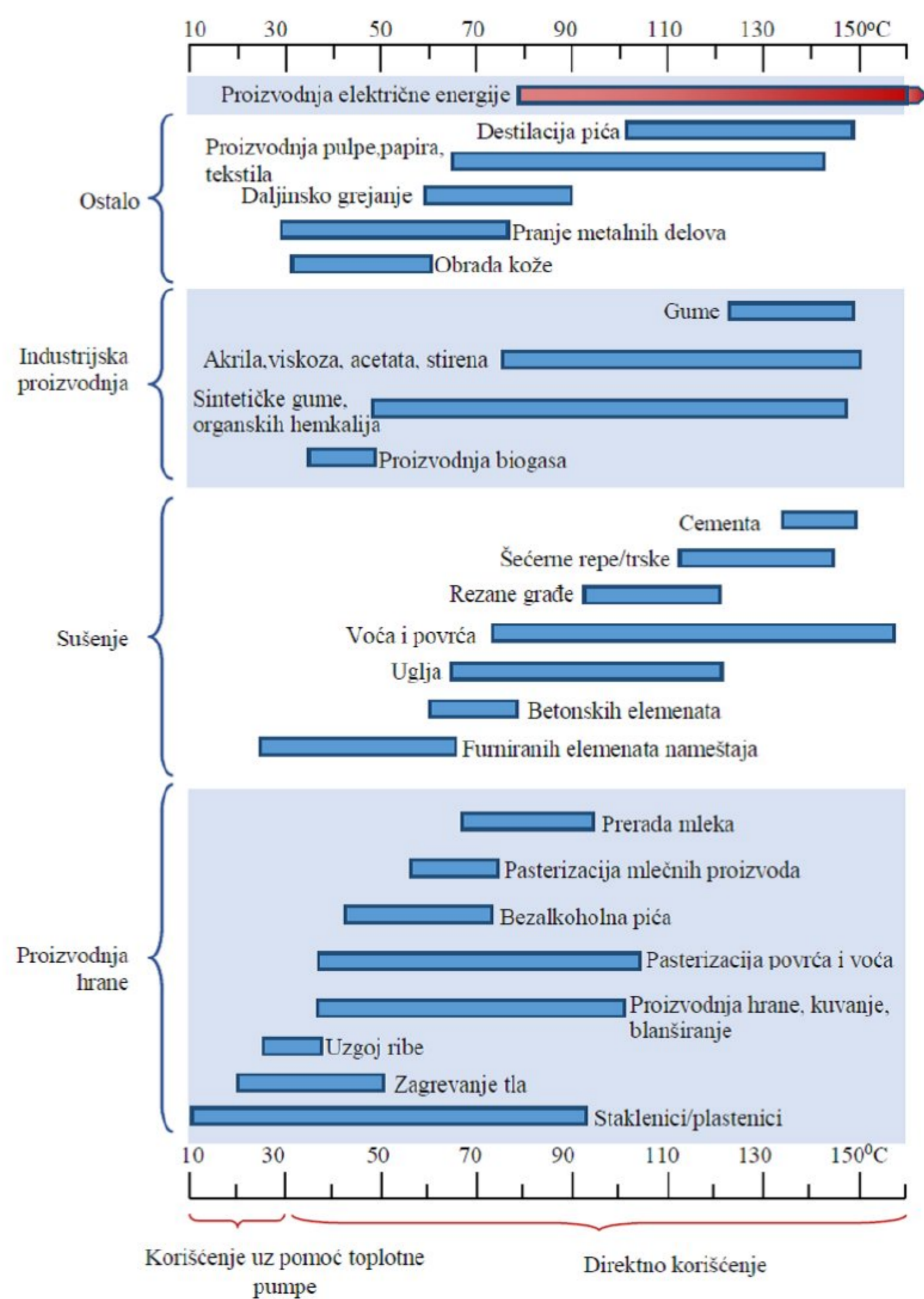
Постоји још критеријума према којима се категоришу геотермални ресурси:

Класификација хидро-геотермалних ресурса према температури флуида, односно енталпији (унутрашњем садржају топлотне енергије):

- Геотермални ресурси ниске енталпије (температура флуида $<100^{\circ}\text{C}$)
- Геотермални ресурси средње енталпије (температура флуида $100\text{-}200^{\circ}\text{C}$)
- Геотермални ресурси високе енталпије (температура флуида $>200^{\circ}\text{C}$)

Класификација геотермалне енергије према локацији на којој је акумулирана у Земљиној кори:

- Хидрогеотермалну енергију (акумулирану у подземној води)
- Петрогеотермалну (акумулирану у чврстим стенским масама без воде)
- Магмагеотермалну (акумулирану у магми)
- Пнеумогеотермалну (акумулирану у топлим гасовима)



Слика 6 - Могућности коришћења геотермалне енергије у зависности од температуре

У зависности од температуре флуида зависи и могућност примене хидрогеотермалне енергије. Пре свега се користи у сврху добијања топлотне енергије, а при вишим и високим температурама и електричне енергије. Доња границе температуре хидрогеотермалног флуида за производњу електричне енергије јесте 100°C . Испод ове границе експлоатације ресурса у циљу добијања струје није економски експлатива, премда се на тржишту појављују бинарни системи у којима је могуће користити и ниже температуре.

Република Србија до сада није на својој територији доказала постојање геотермалних ресурса средње и високе енталпије. Насупрот томе, у оквиру геотермалних ресурса ниске енталпије, Србија се карактерише као држава са скоро највећим бројем термо-минералних појава са температуром преко 20°C у односу на број становника у Европи. Та чињеница је условила да се приступи детаљним истраживањима и подели геотермалних ресурса унутар прве групе – геотермалних ресурса ниске енталпије са температуром до 100°C .

На основу изложене класификације и критеријума према температури односно енталпији, геотермални ресурси у Републици Србији квантификовани су по следећим подгрупама:

Субгеотермални ресурси (до 30°C):

- а) Субхидрогеотермални ресурси,
- б) Субпетрогеотермални ресурси;

Субгеотермални ресурси у ужем смислу ($30\text{-}100^{\circ}\text{C}$);

Геотермални ресурси температуре преко 100°C:

- a) Хидрогеотермални ресурси
- b) Напредни геотермални ресурси

3.1 Суб-геотермални ресурси

У практичној примени геотермалних облика енергије, хидрогеотермална енергија већ деценијама има своју широку примену у производњи топлотне и електричне енергије, док се петрогеотермална тек онедавно употребљава за загревање и хлађење објеката. Такође територија Републике Србије обилује хидрогеотермалним ресурсима ниске енталпије са температуром до 100°C, при том чему су највеће количине расположивих вода у геолошким формацијама дубине до 300м са температурама које не прелазе 20-30°C.

Насупрот њима, хидрогеотермални ресурси са температурама изнад тих вредности, углавном су везани за магматске и метаморфне масиве, али са знатно мањим расположивим резервама воде.

По дефиницији субгеотермални извори енергије представљају вид хидрогеотермалне енергије ниске енталпије, акумулиран у подземним водама температурног опсега до 30°C и чија је експлоатације и коришћење условљено применом геотермалних топлотних пумпи. Горња температурна граница (30°C) одређена је графоаналитички и узета је као температура изнад које почиње тзв. директно коришћење ресурса, односно то је температура до које се хидрогеотермални ресурси експлоатишу уз помоћ топлотних пумпи.

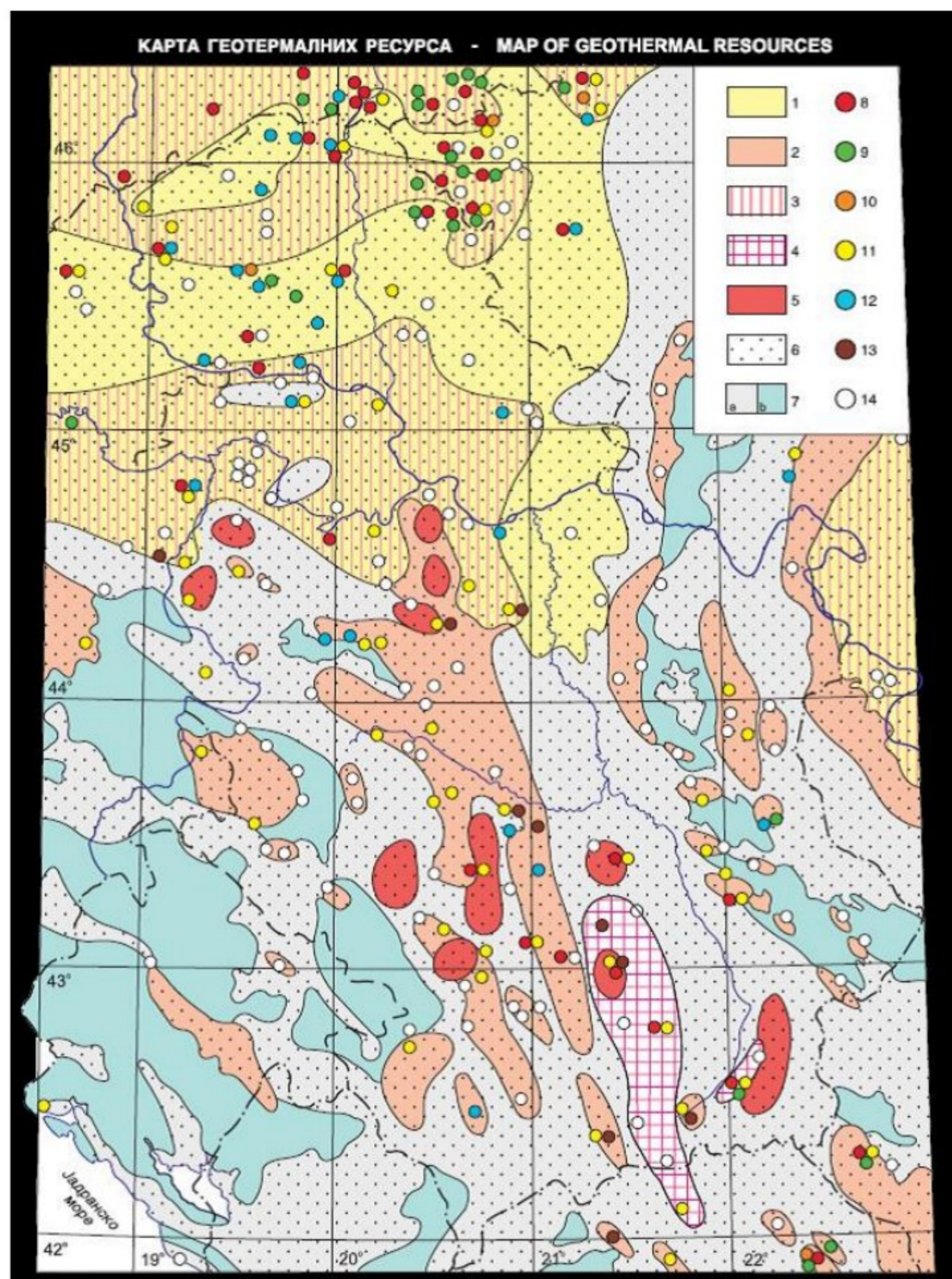
Према развојним плановима на пољу енергетике и енергетске ефикасности Републике Србије, хидрогеотермални ресурси спадају у обновљиве изворе енергије чија се примена и коришћење, односно верификација резерви налазе у почетној фази (и поред вишедеценијске традиције коришћења).

На територији Србије постоје повољне могућности за експлоатацију геотермалне енергије из сувих стена, применом геотермалних сонди. Овај вид експлоатације ресурса доживљава експанзију у последњих неколико година. Предност је у релативно плитким бушотинама 100-125 м и самој сигурности система што је довело до тога да су многе индивидуалне стамбене куће увеле овај вид енергије за грејање/хлађење простора. Како би се користио петрогеотермални ресурс за потребе загревања породичних домаћинста физичких лица неопходно је дефинисати услове коришћења топлоте стенских маса земљине коре до 30 °С.

3.2 Геотермални ресурси у ужем смислу

Геотермални ресурси са температуром од 30-100°C карактеришу се могућношћу директног коришћења, без употребе топлотних пумпи. Република Србија изразито је богата овим ресурсима, што се пре свега огледа у појави природних извора термалних вода са температуром већом од 20°C, чији број достиже преко 150 појава. Највећу температуру имају термалне воде у Врањској бањи (96°C), Јошаничкој бањи (78°C), Сијаринској бањи (72°C), Куршумлијској бањи (68°C) и др.

Узимајући у обзир степен истражености и обим коришћења, најзначајније налазиште геотермалне енергије у Србији се тренутно налази у Врњачкој бањи. Најперспективније налазиште геотермалне енергије у ужем смислу се налази у Мачви. (Мартиновић и Милојевић 2000)



Слика 7 - Карта геотермалних ресурса Србије

1 – ХГТ налазишта у стенама кенозојске старости; 2 – ХГТ налазишта у стенама мезозојске старости; 3 – ХГТ налазишта у стенама мезозојске старости испод стена кенозојске старости; 4 – ХГТ налазишта у стенама препалеозојске старости; 5 – петрогеотермална налазишта у гранитоидним стенама терцијарне старости; 6 – хидро-петрогеотермална налазишта до дубине од 200м за експлоатацију геотермалне топлоте помоћу топлотних пумпи; 7 – подручја без значајних хидрогеотермалних налазишта: а-терени од стена палеозојске и препалеозојске старости, б-карстни терени; Коришћење: 8 – за грејање; 9 – за роизводњу хране; 10 – у индустрији; 11 – за балнеотерапију; 12 – за рекреацију и спорт; 13 – за производњу и паковање воде; 14 – појаве које се не користе.

3.3 Геотермални ресурси са температуром преко 100°C

3.3.1 Хидрогеотермални ресурси

Као што је већ наглашено, најзначајније налазиште геотермалне енергије у Србији се тренутно налази у Врњачкој бањи где је максимално регистрована температура термалних вода у бушотини ВГ-3 100°C.

На жалост, поред те појаве, у Србији до сада нису откривене појаве подземних вода са температурама вишим од 100°C. То свакако не значи да их нема, него је ниво инвестиција у хидрогеотермална истраживања недовољан и нема могућности за озбиљнија истраживања која би евентуално довела до откривања нових налазишта.

3.3.2 Напредни геотермални системи (ЕГС)

Поред повољних могућности за експлоатацију геотермалне енергије из резервоара хидрогеотермалних система, на територији Србије постоје и повољне могућности за експлоатацију геотермалне енергије из сувих стена. Гранитоидне интрузије су најпогоднија стенска средина за интензивну експлоатацију геотермалне, тј. петрогеотермалне енергије (топлота сувих стена). Развој технологије за експлоатацију ове врсте геотермалне енергије је завршен од стране америчких, енглеских, јапанских и немачких истраживача. Њега су започели амерички научници у другој половини 20. века и они су најдаље отишли са експериментима на изради такозваних ЕГС (некадашњи ХДР – хот дру роцк, данас се сматра застарелим термином) система за интензивно извлачење геотермалне топлоте из сувих стена за производњу електричне енергије.

Србија располаже веома повољним петрогеотермоенергетским могућностима, јер се на њеној територији налази десет гранитоидних интрузија неогене старости. Постоје индикације да су присутне и скривене гранитоидне интрузије.

Основне могућности примене ових високотемпературних ресурса јесу у могућности когенерације, односно производњи топлотне и електричне енергије.

Основни принцип ЕГС система је захватање постизанје високих температура преко 150°C на великим дубинама, уз манипулацију и повећање пермеабилности стенских маса сложеним хидрауличким техникама (уз коришћење притиска преко 1000 бара). У тако створене вештачке пукотине у врелим стенама, кроз ињекционе бунаре се утискује хладна вода која се загрева и експлоатационим бунарима извлачи на површину земље. ЕГС технологија укључује израду два бунара (ињекционог и експлоатационог) на међусобном растојању од неколико стотина метара дубине 3-5 км. Могуће је поставити бунаре и ближе уколико се користи комбинована техника са усмереним бушењем на већим дубинама. На површини се вода (или прегрејана пара) са температуром преко 150°C користи конвенционалне парне турбине. Сваки од ових бунарских парова или модула може обезбедити 3-6 MW топлотне снаге.

Израда првог пробног ЕГС постројења на подручју Европе започета је 1987. године у Соултз-соус-Форетс, Француска, топлотног капацитета 1,5 MW. Постројење је пуштено у пробни рад 2005. године. Сличан пројекат започет је 2004. године на простору Немачке (Ландау) капацитета 3 MW, за потребе производње електричне енергије. Годишња производња електричне енергије из овог постројења износи 22ГWh (БИНЕ 2012).

3.4 Коришћење геотермалних ресурса

3.4.1 Коришћење ГТЕ за производњу топлотне енергије

Како је за производњу електричне енергије минимална температура 100ц, геотермални ресурси нижих температура се могу користити само за потребе добијања топлотне енергије, односно за грејање и климатизацију простора разне намене, као и за друге пратеће сврхе.

Дакле, зависно од температуре, геотермални ресурси се могу користити за следеће намене у смислу извора топлотне енергије:

- Грејање затворених и отворених просторија
- Загревање стакленика и пластеника
- Балнеолошке потребе
- Спортско-рекреационе сврхе
- Туристичке сврхе
- Сушење поврћа и друге потребеу пољопривредној производњи
- Индустијске потребе
- Флаширање воде

3.4.2 Коришћење ГТЕ за производњу електричне енергије

Геотермалне електране функционишу на сличан начин као и свака друга термоелектрана, само што је у овом случају медијум за покретање парне турбине пара добијена из унутрашњости унутрашњости земље, начешће.

Дакле, температура која одваја геотермалне ресурсе за потребе производње струје је 100ц. Систем је уобичајен: пара покреће турбину, која активира генератор и на тај начин се производи електрична енергија струја. Након проласка кроз турбину, пара иде у кондензатор, претвара се у течно стање и враћа под земљу или се даље каскадно користи.

Оно што је важно поменути јесте да у овај процес користи искључиво природно добијену пару, и да за њега није потребно присуство било каквог сагоревања, као у конвенционалним електранама.

Постоје три основна модела електрана на геотермалну енергију:

1. ГТ. електране на суву пару
2. ГТ. електране са накнадним испаравањем (једноструким и двоструким)
3. ГТ. електране са бинарним циклусом

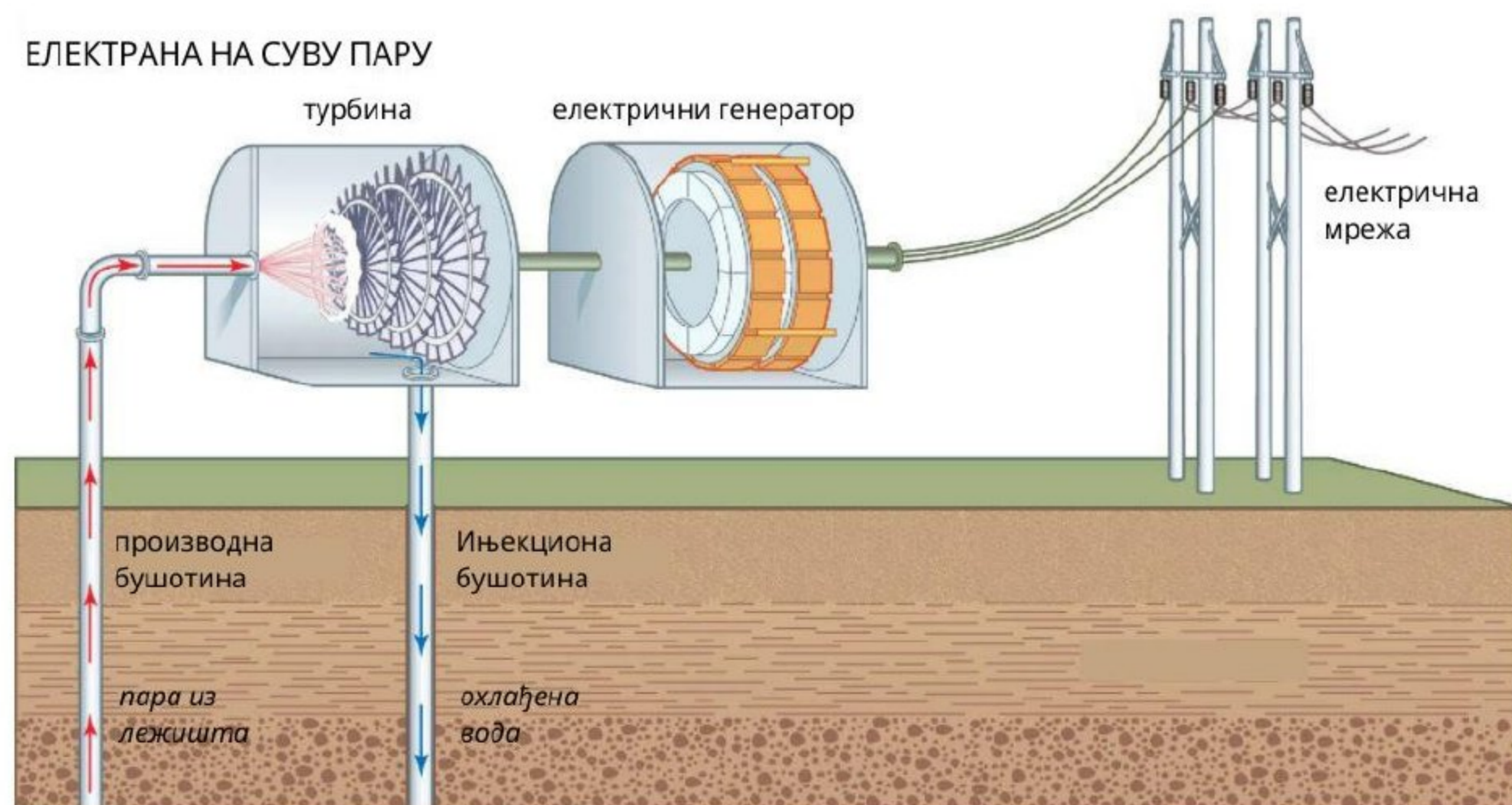
Због тога што подржавају изворишта нижих температура, која су знатно и бројнија и приступачнија, бинарна постројења обухватају непуну половину свих постројења на геотермалну енергију тренутно у свету. Што се инсталираних капацитета тиче, бинарна постројења имају најмању снагу на излазу (3-4MW), док су ГТ постројења на суву пару најјача са излазном снагом иснаге до 50MW.

3.4.3 Геотермалне електране са сувом паром

Постројења на суву пару су први тип геотермалних електрана који су постигли комерцијални статус. Прво постројење инсталирано 1904. године у Лардерелу, Тоскана, Италија, била је такво постројење. Постоји и дан данас и користи суву засићену или прегрејану пару са притисцима вишим од атмосферског, директно из резервоара богатог паром.

Пара се може директно из производне бушотине доводити у турбину и пуштати у атмосферу након експанзије. Добијена пара је прегрејана и садржи само мале количине других гасова, углавном CO₂ и H₂S. Овај директни циклус без кондензације је најједноставнија и најјефтинија опција за производњу електричне енергије из геотермалне енергије. Са друге стране, овај циклус користи двоструко више паре по произведеном киловат-часу при идентичном улазном притиску него кондензациони циклус. Постројења са директним циклусом су се показала као добра као почетна или додатна постројења (бушотине) при формирању неког поља за локалну производњу струје електричне енергије при почетним фазама. Користе се у случајевима када пара садржи велики удео гасова који не могу кондензовати.

У кондензационим постројењима пара се кондензује на излазу из турбине и хлади у конвенционалним расхладним торњевима. Добијени кондензат се може користити у систему за хлађење електране или пумпати назад у резервоар. На овај начин се обнавља резервоар, односно одржава потребан притисак. Постројења са овим принципом рада су доста комплекснија у смислу опреме и саме изградње, што доводи и до податка да њихова изградња траје у просеку двоструке дуже од постројења са директним циклусом.



Слика 8 - Принцип рада електране на суву пару

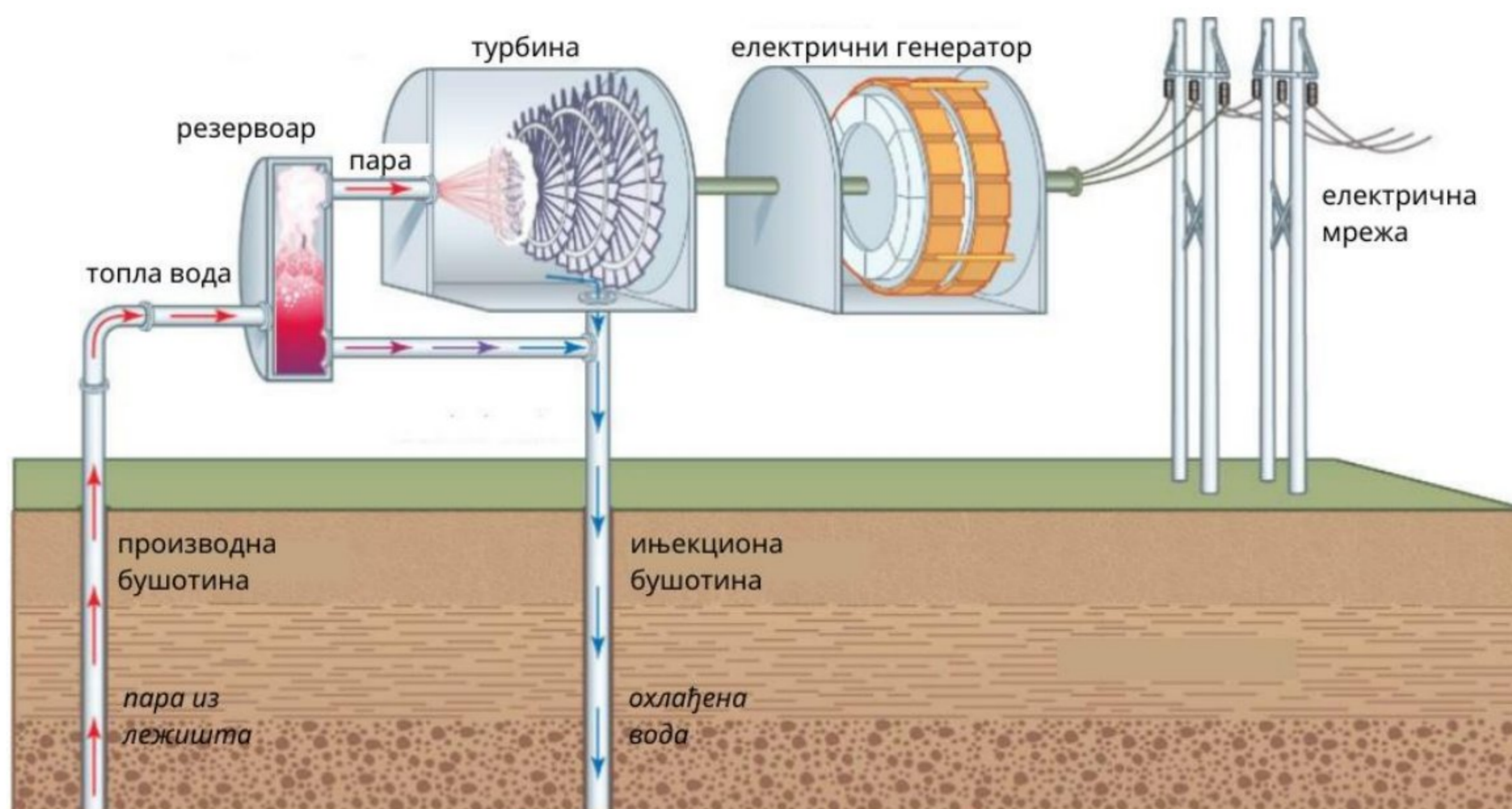
Геотермална електрана Лардерело у Италији и геотермална електрана Гејзири у Калифорнији користе највећа су светска налазишта суве паре. Укупна инсталисана снага постројења са сувом паром у 2004. години износила је 2.460 MW, што представља 28% укупне светске инсталисане снаге. Просечна снага постројења са сувом паром је 39 MW.

3.4.4 Геотермалне електране са накнадним испаравањем (једноструким и двоструким)

У лежиштима са доминантном воденом фазом (преко 180°C) флуида примењује се технологија геотермалних електрана са испаравањем. Извор енергије, у овом случају, је вода под притиском. Пошто је притисак у бушотини генерално нижи од притиска у резервоару, вода под притиском у бушотини тече према површини. Као резултат пада притиска, одређени део течности кондензује испараваи бушотина истовремено производи топлу воду и пару, при чему је вода доминантна фаза. Стога се ови резервоари називају и резервоари за влажну пару.

Геотермална вода често садржи велику количину растворених минерала, углавном хлорида, бикарбоната, сулфата, бора, флуорида и силицијума. Ово може изазвати присуство соли у цевоводу и постројењу. Оваква експлоатациона поља производе велику количину отпадних вода, а управо због велике количине растворених минерала геотермални флуид мора да се врати у резервоар, путем ињекционих бушотина. Мокра Влажна пара се не може користити са стандардним турбинама а без ризика од оштећења лопатица турбине. Због тога се у свим инсталацијама које користе резервоаре са влажномза мокру парому користе сепаратори за одвајање паре од воде. Производња електричне енергије из ових поља остварује се испаравањем кондензатног геотермалног флуида у једном или више испаривача на површини, што се постиже обарањем притиска флуида.

Постројења са једнократним испаравањем чине 29% свих геотермалних постројења и приближно 40% укупне инсталисане снаге геотермалних електрана у свету. Снаге блокова се крећу од 3 до 90 MWB, док је просечна снага 28,1 MWB по блоку.



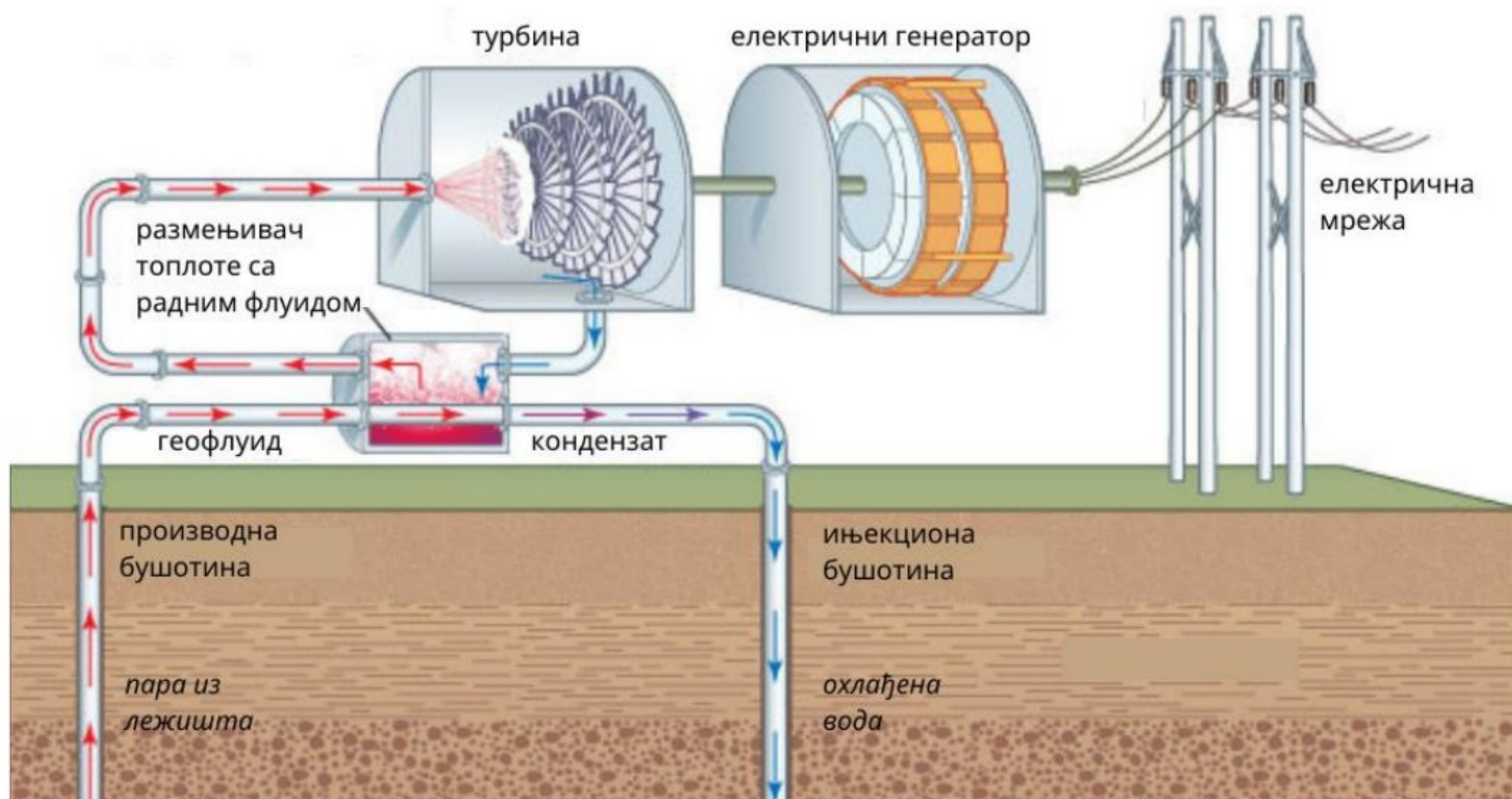
Слика 9 - Принцип рада електране са накнадним испаравањем

Постројење за двоструким испаравањем су побољшана верзија постројења са једноструким испаравањем јер обезбеђује 15-25% више излазне снаге, за исте услове расположиве геотермалне течности. Постројење је сложеније, скупље и захтевније у погледу одржавања, али већа излазна снага обично оправдава уградњу оваквих постројења. Постројења за двоструко испаривање су прилично бројна и раде у 9 земаља. Средином 2004. године било је у функцији 70 таквих блокова, 15% од укупног броја геотермалних електрана. Снаге блокова се крећу од 4,7 до 110 MBMW, док је просечна снага блока око 30 MBMW.

4. Геотермалне електране са бинарним циклусом

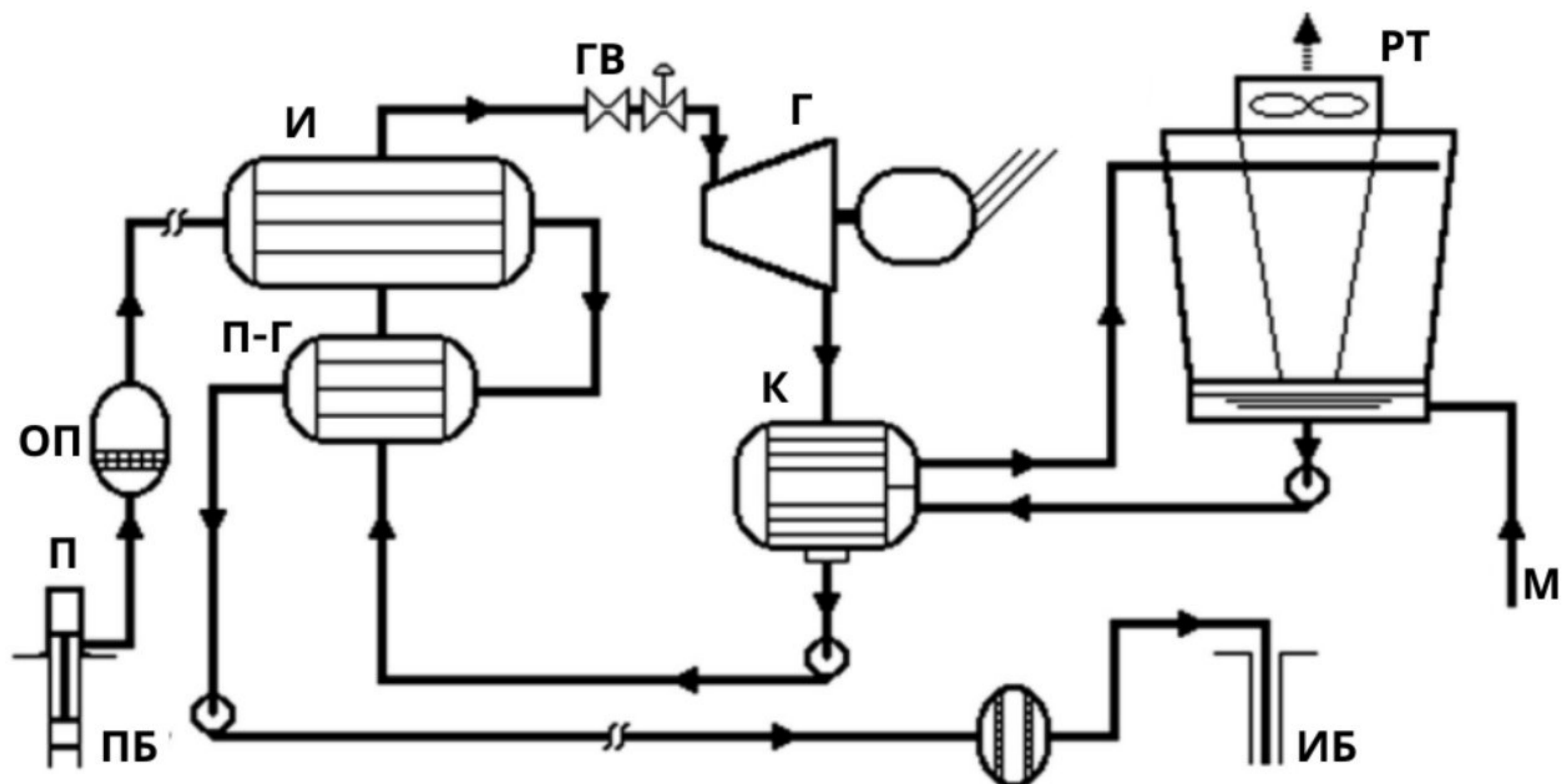
Геотермалне електране са бинарним циклусом су, по радном принципу, најближе термоелектранама на фосилна горива или нуклеарним електранама, где радни флуид обавља прави затворени циклус. Радни флуид, одабран према повољним термодинамичким особинама, прима топлоту из геотермалног флуида, испарава, шири се у турбини, кондензује и враћа се у испаривач помоћу напојне пумпе.

У бинарним постројењима, измењивач топлоте преноси топлоту из геотермалне течности која се доводи из производне бушотине у примарном кругу до лако испарљивог радног флуида у секундарном кругу, као што су халогеновани угљоводоници (нпр. фреон, фреген), пропан, изобутан, пентан, амонијак. Овај термодинамички циклус је познат као органски Ранкин циклус или ОРЦ. Радни флуид у секундарном кругу испарава у испаривачу користећи геотермалну топлоту из примарног круга. Пара се шири пролазећи кроз турбину (у овом случају се често назива "органска турбина"), која је повезана са електричним генератором. Издувна пара се кондензује у кондензатору хлађеном водом или ваздухом, а кондензат се напојном пумпом враћа у испаривач.



Охлађена геотермална вода се може испуштати у животну средину или враћати у лежиште без испаравања, чиме се минимизира проблем таложења растворених минерала.

У свом најједноставнијем облику, бинарно постројење следи схематски дијаграм тока дат на слици испод. Производне бушотине **ПБ** опремљене су пумпама **П** које се постављају испод дубине на којој флуид испарава, одређене својствима лежишта и жељеним протоком. **ОП** - одстрањивачи песка могу бити потребни како би се спречила оштећења и ерозија цевовода и цеви измјењивача топлоте. Обично постоје два корака у процесу загревавања, који се одвија у предгријачу **П-Г**, где се радни флуид доводи до тачке кључања и у испаривачу **И** где излази као zasiћена пара. Геофлуид се држи под притиском изнад тачке испаравања (фласх поинт) за одређену температуру флуида, како би се спречило ослобађање паре и гасова који се не могу кондензовати, а који би могли довести до стварања каменца у цевоводу.

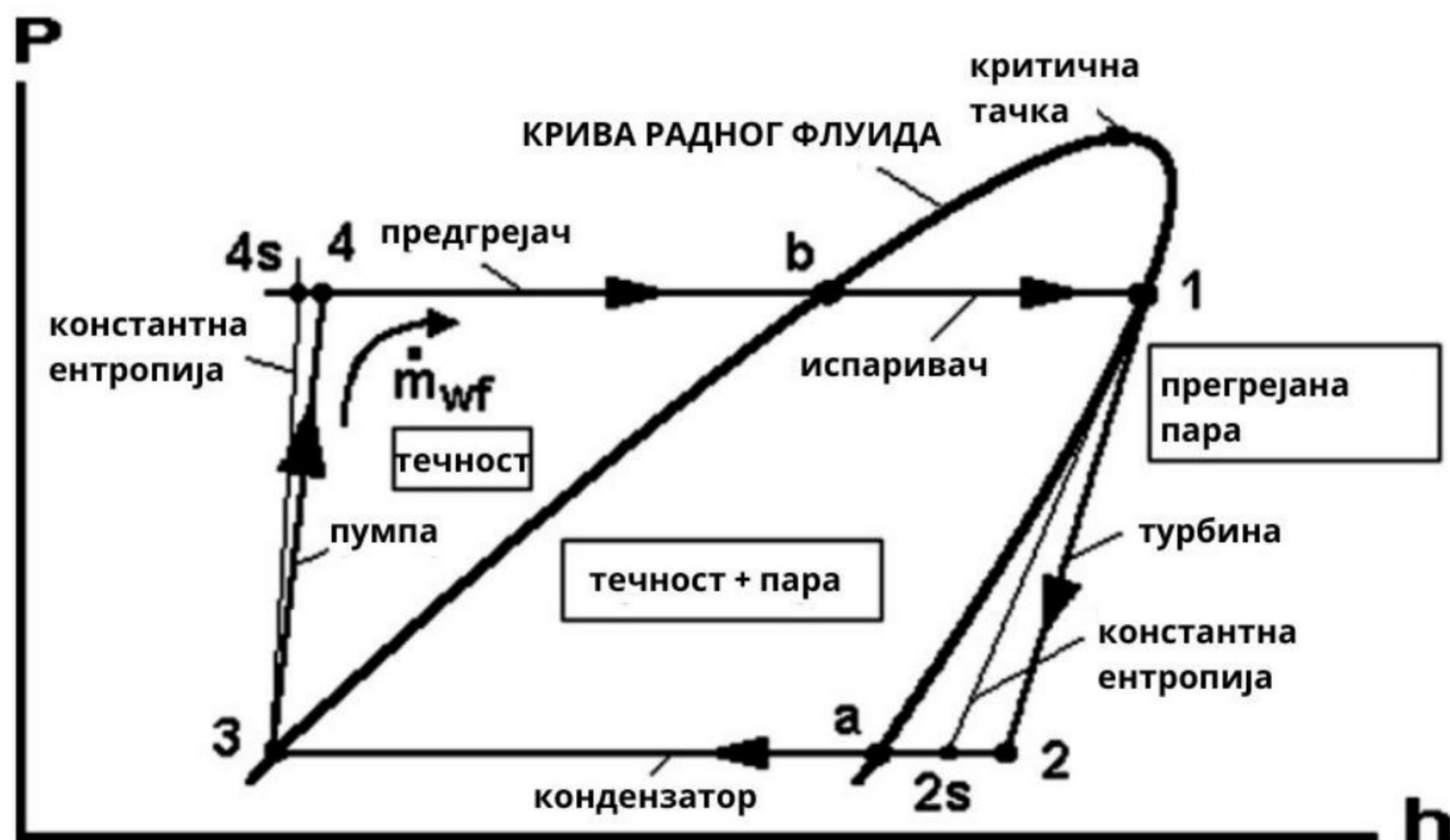


Слика 11 - Схематски приказ процеса

На слици 11 представљен је двокомпонентни принцип размене топлоте са предгрејачем и испаривачем. Овакви системи су присутни у случајевима када је као излазни медијум потребна прегрејана пара. У обе врсте размењивача одвија се изобарски пренос топлоте са геотермалног на радни флуид.

Температура течности не сме да падне до тачке где би каменац могао да постане проблем у предгрејачу и у цевоводима и ињекционим бушотинама низводно од њега.

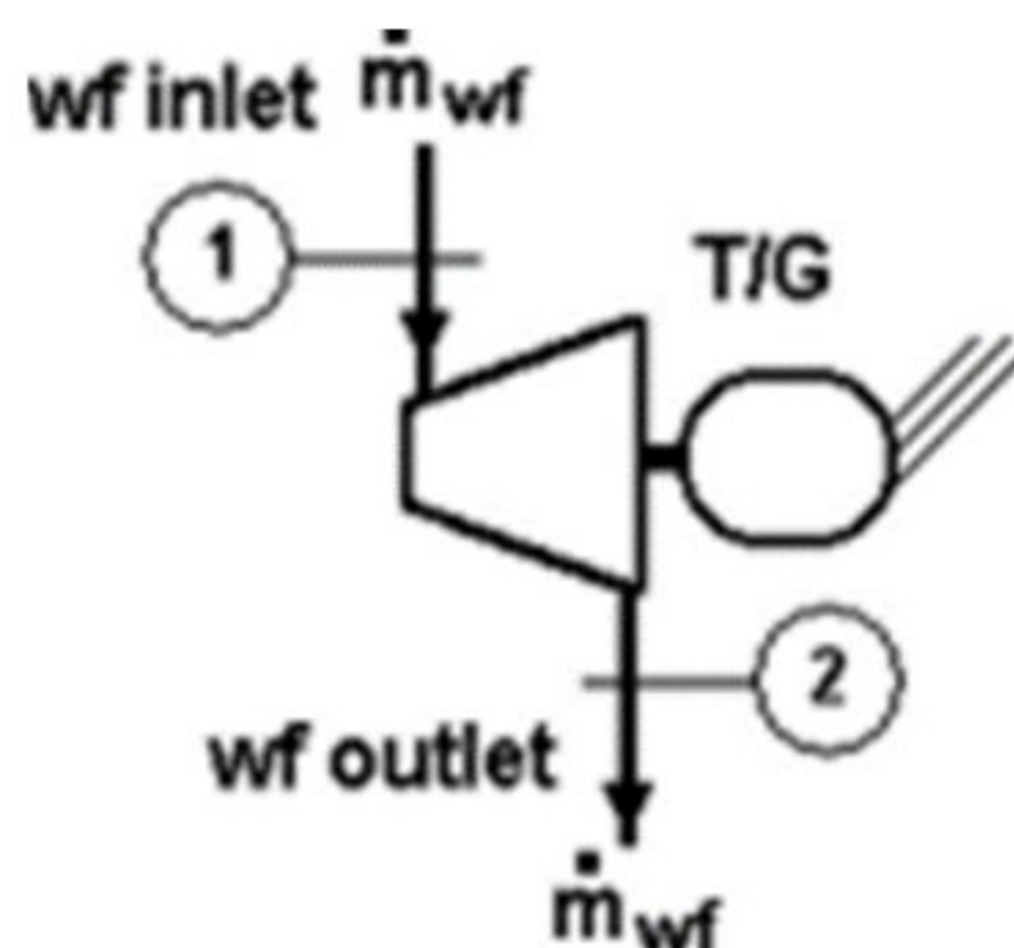
На слици 12 приказани су термодинамички процеси кроз које пролази радни флуид у дијаграму : притисак-енталпија, П-х дијаграм. Ова врста дијаграма се најчешће користи за циклусе хлађења и климатизације, али се врло добро уклапа с геотермалним бинарним циклусима.



Слика 12 - Притисак-енталпија дијаграм за бинарни процес

4.1 Анализа турбине

Трансформација топлотне енергије паре у механичку енергију врши се у турбини. Пара окреће лопатице ротора турбине чиме се окреће и само вратило на крају са ротором електромотора. Анализа је иста као и код класиче парне турбине.



Слика 13 - Турбина и генератор бинарног система

На основу рада при адијабатском процесу за отворен систем уз претпоставке о занемаривим утицајима потенцијалне и кинетичке енергије, заједно с постојаним, адијабатским радом, снага се налази на следећи начин:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{wf}\eta_t(h_1 - h_{2s})$$

Где је η_t степен добротe који говори о томе у коликој мери адијабатска проемна одступа од изентропске. Вредност степена добротe увек има вредност мању од 1.

4.2 Анализа кондензатора

Количина топлоте која се пренесе са радног флуида на расхладни медијум, воду у овом случају (или ваздух) представљена је следећим изразом:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3)$$

Однос између протока радног флуида и расхладне воде је:

$$\dot{m}_{cw}(h_y - h_x) = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3) \text{ или}$$

$$\dot{m}_{cw}\bar{c}(T_y - T_x) = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3)$$

Уз претпоставку да расхладна вода има константну специфичну топлоту за мали температурни опсег од улаза до излаза.

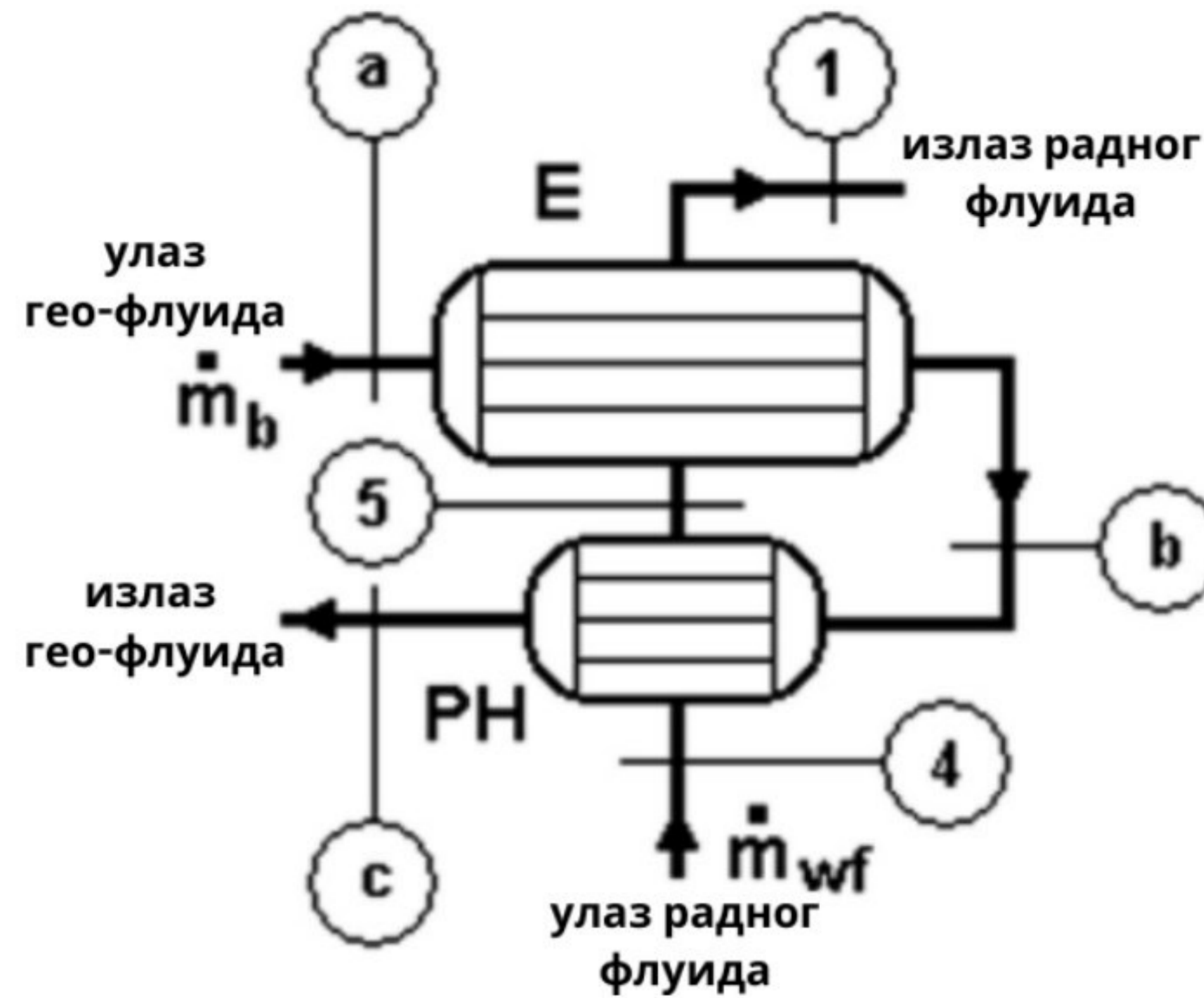
4.3 Анализа доводне пумпе

Користећи исте претпоставке као и за друге компоненте, снага испоручена радном флуиду из доводне пумпе је:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf}(h_4 - h_3) = \dot{m}_{wf}(h_{4s} - h_3)/\eta_p$$

гдје је η_p степен добротe пумпе.

4.4 Анализа размењивача топлоте



Слика 14 - Размењивач топлоте: предгрејач и испаривач

Претпостављамо да су измењивачи топлоте добро изоловани тако да се сав пренос топлоте одвија између геотермалног и радног флуида. У складу са досадашњим општим претпоставкама, такође претпостављено је да је ток стабилан и да су разлике у улазној и излазној потенцијалној енергији и кинетичкој енергији занемарљиве. Тумачећи ово као термодинамички систем, главна једначина је:

$$\dot{m}_b(h_a - h_c) = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_4)$$

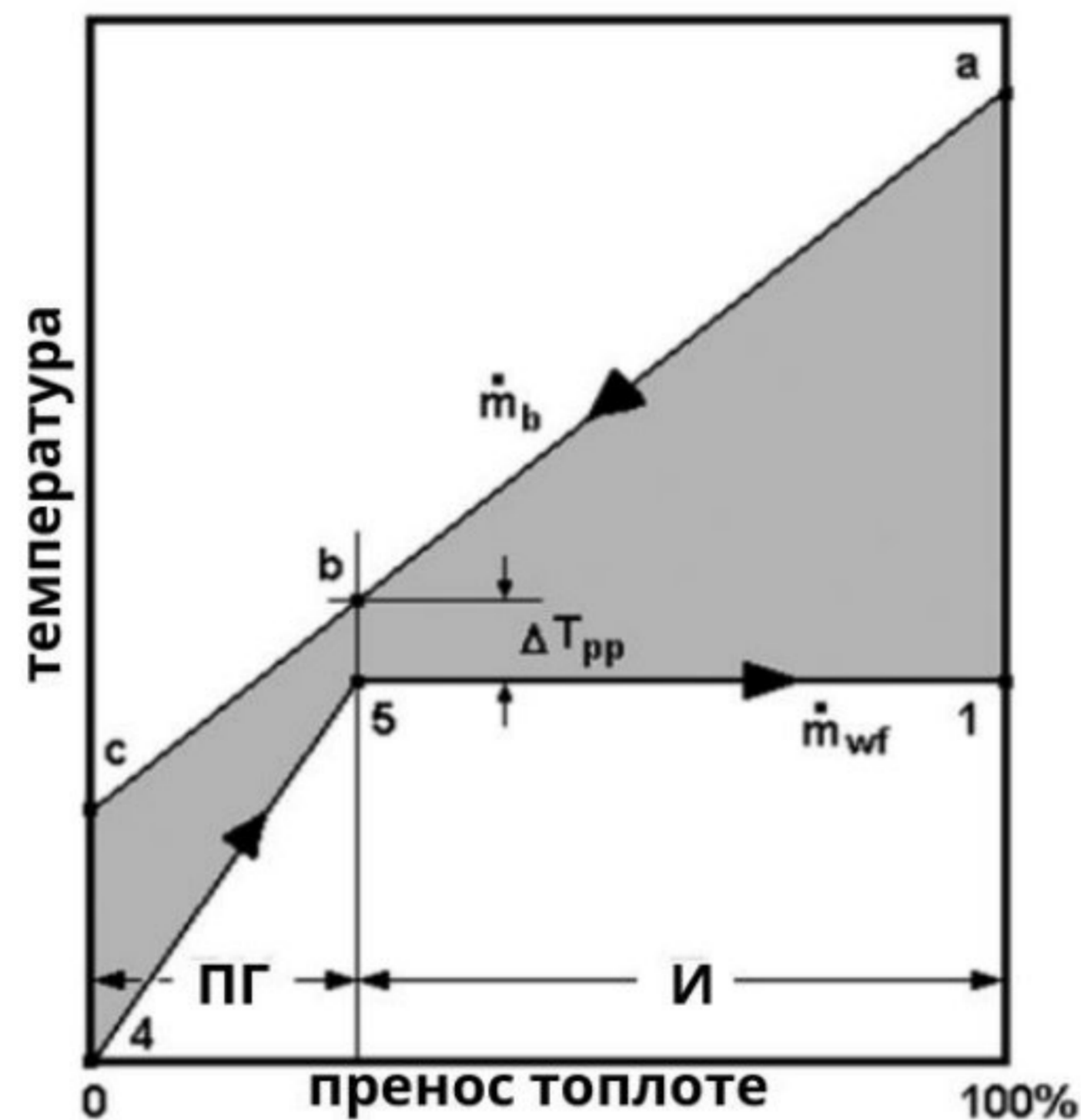
Ако геотермални флуид има мало растворених гасова и чврстих материја, лева страна једначине се може апроксимирати просечном специфичном топлотом слане воде \bar{c}_b пута пад температуре:

$$\dot{m}_b \bar{c}_b (T_a - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_4)$$

Следећа једначина се може користити за проналажење потребне брзине протока геотермалног флуида за дати скуп параметара циклуса:

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{wf} \frac{h_1 - h_4}{\bar{c}_b (T_a - T_c)}$$

Избор појединачних измењивача топлоте захтева од нас да испитамо још један термодинамички дијаграм: температура-пренос топлоте или Т-к дијаграм. На апсциси је укупна количина топлоте пренета од геотермалног до радног флуида. Може се изразити у процентима или у топлотним јединицама (рецимо кЈ/кг вф).



Слика 15 - Температура- пренос топлоте дијаграм за предгрејач и испаривач

ПГ предгрејач обезбеђује топлоту за довођење радног флуида до тачке кључања, стање 5. Испаравање се дешава од 5 до 1 дуж изотерме чистог радног флуида. Место у измењивачу топлоте где геотермални и радни флуид доживљавају минималну температурну разлику назива се тачка стезања (пинч поинт), а вредност ове разлике означава температурну разлику тачке стезања, ΔT_{pp} .

Тачке стања 4, 5 и 1 треба да буду познате из спецификација циклуса: стање 4 је компримована течност, излаз из напојне пумпе; стање 5 је засићена течност на притиску котла; а стање 1 је засићена пара, исто као и улазно стање турбине. Због тога се два измењивача топлоте могу засебно анализирати на следећи начин:

$$\text{Предгрејач: } \dot{m}_b \bar{c}_b (T_b - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_5 - h_4)$$

$$\text{Испаривач: } \dot{m}_b \bar{c}_b (T_a - T_b) = \dot{m}_{wf} (h_a - h_5)$$

Улазна температура геотермалног флуида је увек позната. Температурна разлика тачке стезања је генерално позната из спецификација; ово омогућава да се T_b пронађе из познате вредности за T_5 . Иако је теоретски могуће да дође до тачке стезања на хладном крају предгрејача, то се практично никад не дешава.

Површина преноса топлоте испаривача између два флуида може се одредити из основног односа преноса топлоте:

$$\dot{Q}_E = \bar{U}A_E LMTD|_E |$$

где је \bar{U} укупан коефицијент пролаза топлоте, $LMTD$ је логаритамска средња температурна разлика, која се за испаривач налази помоћу једначине:

$$LMTD|_E = \frac{(T_a - T_1) - (T_b - T_5)}{\ln \left[\frac{T_a - T_1}{T_b - T_5} \right]}$$

Укупан коефицијент пролаза топлоте \bar{U} треба одредити експериментом са одговарајућим флуидима који се користе у постројењу.

Пошто измењивачи топлоте могу бити конструисани у различитим геометријским распоредима (нпр. шкољка и цев, плоча, паралелни ток, итд), постоје фактори корекције који се морају користити са горњим једначинама, у зависности од конфигурације.

4.5 Избор радног флуида

Иако постоји много избора доступних за радне флуиде, такође постоје и многа ограничења за тај избор која се односе на термодинамичка својства течности, као и на питања здравља, безбедности и животне средине.

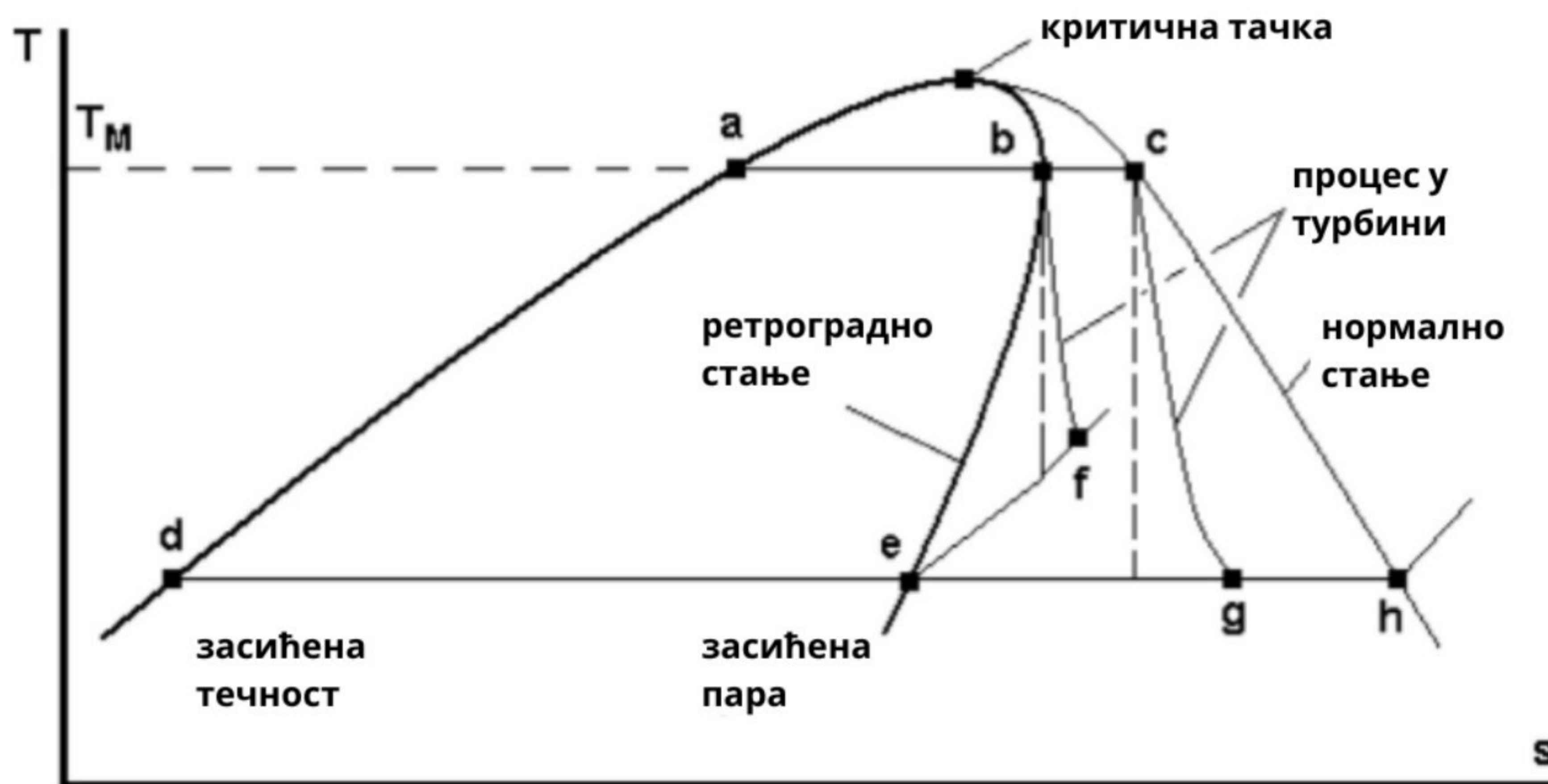
Табела испод наводи неке потенцијалне флуиде и њихова релевантна термодинамичка својства; за поређење је укључена чиста вода [9]. Јасно је да остали наведени флуиди имају критичне температуре и притиске далеко ниже од воде. Штавише, пошто су критични притисци релативно ниски, могуће је размотрити суперкритичне циклусе за угљоводонике. Као што ћемо ускоро видети, ово омогућава боље подударане између криве хлађења слане воде и линије кључања загревања радног флуида, смањујући термодинамичке губитке у измењивачима топлоте.

Флуид	Формула	T_c °C	T_c °F	P_c MPa	P_c lbf/in ²	$P_s@$ 300K MPa	$P_s@$ 400K MPa
Пропан	C ₃ H ₈	96.95	206.5	4.236	614.4	0.9935	NA
<i>i</i> -Бутан	<i>i</i> – C ₄ H ₁₀	135.92	276.7	3.685	534.4	0.3727	3.204
<i>n</i> -Бутан	C ₄ H ₁₀	150.8	303.4	3.718	539.2	0.2559	2.488
<i>i</i> -Пентан	<i>i</i> – C ₅ H ₁₂	187.8	370.1	3.409	494.4	0.09759	1.238
<i>n</i> -Пентан	C ₅ H ₁₂	193.9	380.9	3.240	469.9	0.07376	1.036
Амониак	NH ₃	133.65	272.57	11.627	1686.3	1.061	10.3
Вода	H ₂ O	374.14	705.45	22.089	3203.6	0.003536	0.24559

Табела 2 - Термодинамичка својства неких од радних флуида коришћених у бинарном циклусу

Бинарне мешавине ових течности су такође проучаване за употребу у геотермалним бинарним постројењима. Смеше испаравају и кондензују се на различитим температурама, за разлику од чистих течности које мењају фазу на константној температури.

Још једна важна карактеристика кандидатских бинарних течности је облик криве засићене паре посматране у координатама температура-ентропија; (слика испод). Крива за воду (приказана као танка линија) свуда има негативан нагиб, али одређени угљоводоници и расхладни флуиди показују позитиван нагиб за делове линије засићења. То јест, постоји локални минимум ентропије на некој ниској температури, T_m , и максимум локалне ентропије на вишој температури, T_M .



Слика 16 - Нормално и ретроградно стање радног флуида на Т-С дијаграму

Ретроградне течности укључују нормалан бутан и изобутан и нормалан пентан и изопентан.

4.5.1 Брзина флуида и величина турбине

Величина турбине одређује њену цену, а њена величина се може проценити из њене излазне површине. Масени проток кроз излаз турбине може се изразити као производ густине радног флуида, површине попречног пресека и брзине протока:

$$\dot{m} = \rho A v$$

Пошто је проток масе такође дат изразом:

$$\dot{m} = \dot{W}_t / w_t = \dot{W} / (h_1 - h_2)$$

Излазна површина се може наћи помоћу:

$$A = \frac{\dot{W}_t}{h_1 - h_2} \frac{v_2}{K a_2}$$

где је густина замењена њеном реципрочном вредношћу, специфичну запремину v , а брзину флуида са $K a_2$ где је K фракција, а a_2 је брзина звука у флуиду на излазу из турбине. Према дефиницији, брзина звука у компресибилном медију је дата са:

$$a = \left[\frac{dP}{d\rho} \right]_{s = \text{const}}^{1/2}$$

Брзина звука може се приближно одредити из табела својстава и графикана коришћењем коначних разлика:

$$a \approx \left[\frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right]_{s = \text{const}}^{1/2} = \left[\frac{\Delta P}{\Delta(1/v)} \right]_{s = \text{const}}^{1/2}$$

Сада је могуће упоредити радне флуиде користећи исте излазне снаге и исти део брзине звука на издувним гасовима турбина да бисмо испитали њихове релативне површине попречног пресека, а тиме и релативне величине њихових турбина. Испоставило се да амонијак има најмању величину турбине за одабрано поређење и згодно је резултате приказати као умножак референтне површине у случају амонијака.

Флуид	Формула	Моларна маса	Рел. излазна површина ^b
Амонијак	NH ₃	17.03	1.0(1.0)
Пропан	C ₃ H ₈	44.09	2.3(1.9)
<i>i</i> -Бутан	<i>i</i> – C ₄ H ₁₀	58.12	4.1(4.9)
<i>n</i> -Бутан	C ₄ H ₁₀	58.12	5.5(6.3)
<i>i</i> -Пентан	<i>i</i> – C ₅ H ₁₂	72.15	12.2(NA)
<i>n</i> -Пентан	C ₅ H ₁₂	72.15	14.6(NA)

Табела 3 - Поређење величине турбине при раду са неколико различитих радних флуида

4.5.2 Еколошка, безбедносна и здравствена својства

Битан фактор при избору радног флуида јесу и еколошка, безбедносна и здравствена својства потенцијалних радних течности. То укључује запаљивост, токсичност, потенцијал оштећења озона (ODP) и потенцијал глобалног загревања (GWP). Табела 4 сумира ова својства за течности до сада разматране, плус два хлорофлуороугљеника који су некада сматрани кандидатима за радну течност.

Флуид	Формула	Токсичан	Запаљив	ODP	GWP
P-12	$\text{CCl}_2 \text{F}_2$	Не	Не	1.0	4500
P-114	$\text{C}_2\text{Cl}_2 \text{F}_4$	Не	Не	0.7	5850
Пропан	C_3H_8	Ниско	Веома	0	3
<i>i</i> -Бутан	<i>i</i> – C_4H_{10}	Ниско	Веома	0	3
<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	Ниско	Веома	0	3
<i>i</i> -Пентан	<i>i</i> – C_5H_{12}	Ниско	Веома	0	3
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	Ниско	Веома	0	3
P-32	$\text{CH}_2 \text{F}_2$	Ниско	Ниско	0	675
P-134а	$\text{C}_2\text{H}_2 \text{F}_4$	Веома ниско	Не	0	1300
P-245фа	$\text{C}_3\text{H}_3 \text{F}_5$	Веома ниско	Не	0	1020
Угљен-диоксид	CO_2	Не	Не	0	1.0
Амонијак	NH_3	Веома	Ниско	0	0
Вода	H_2O	Не	Не	0	-

Табела 4 - Безбедносна, еколошка и здравствена својства за разматране флуиде

ODP је нормализован на 1,0 за расхладна средства P-11 и P-12 која су најгора у овом погледу. GWP је нормализован на 1,0 за угљен-диоксид. Због њиховог веома високог ODP и GWP, и P-12 и P-114 су забрањени за употребу

Допринос угљоводоника глобалном загревању долази углавном преко угљен-диоксида, који је нуспроизвод њиховог распадања. Сви кандидати за угљоводоничне течности су очигледно запаљиви и захтевају одговарајућу опрему за заштиту од пожара на лицу места.

4.6 Напредни бинарни циклус

Основна бинарна постројења имају ниску топлотну ефикасност углавном због мале температурне разлике између топлотног извора и топлотног понора. Термодинамички идеалан циклус који ради између извора топлоте на температури T_i и понора на температури T_p је Карнотов циклус који се састоји од изотермног процеса додавања топлоте на T_i , праћеног изентропским процесом експанзије, изотермним процесом одбацивања топлоте на T_p , и процесом изентропске компресије за враћање радног флуида у почетно стање.

Карнотова ефикасност је највећа могућа ефикасност за било који циклус који ради између ове две температуре и дата је као:

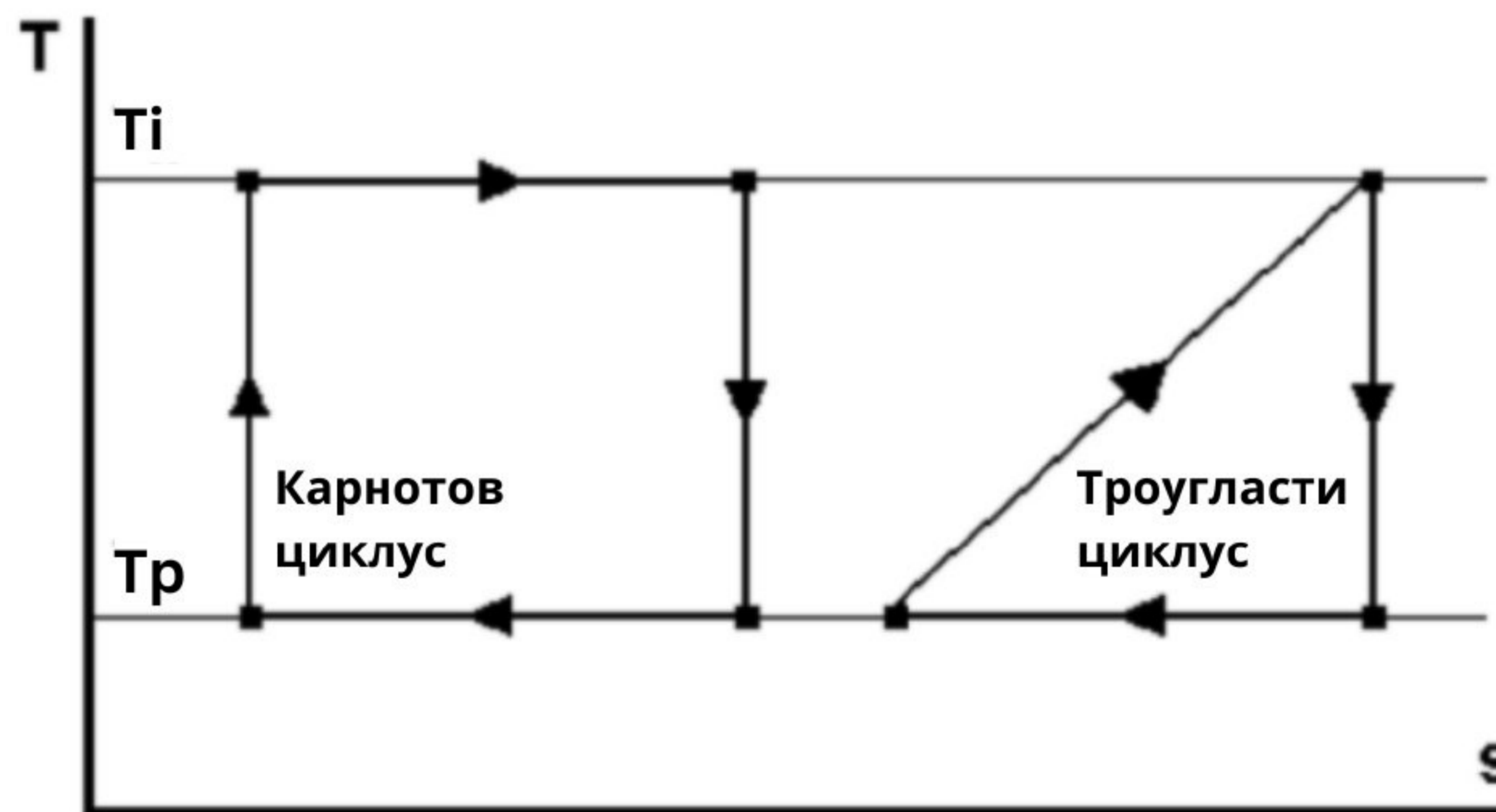
$$\eta_{CC} = \eta_{max} = 1 - \frac{T_p}{T_i}$$

За бинарно постројење које користи геотермални флуид на 150°C (423,15 K), при топлоти понора на 40°C (313,15 K), максимална идеална Карнотова учинковитост је 26%.

Међутим, геотермални флуид није изотермални извор топлоте, већ се заправо хлади док преноси топлоту на радни флуид. Стога је реалистичнији идеални циклус за геотермално бинарно постројење троугласти циклус који се састоји од процеса додавања топлоте изобарског на улазну температуру слане воде T_i , након чега следи изентропска експанзија и процес изотермног одбацивања топлоте на T_p да би се циклус завршио. Ефикасност троугластог циклуса представљена је са:

$$\eta_{TRI} = \frac{T_i - T_p}{T_i + T_p}$$

За исте температуре коришћене у горњем примеру, троугласти циклус даје ефикасност од 15%. Ова два идеална циклуса приказана су у координатама температура-ентропија на графику испод.



Слика 17 - Два идеална термодинамичка система

Препознајући инхерентно ниску топлотну ефикасност основних бинарних постројења, постоји неколико варијација основног циклуса чији је циљ постизање веће ефикасности. Када циклус има ефикасност од рецимо 10%, побољшање од само једног процентног поена може направити разлику између економски одрживог пројекта и оног који није.

5. Закључак

Најважнија предност бинарних циклуса је у приступачном коришћењу термалне енергије. Користећи радни флуид са нижом тачком кључања у односу на топлотни извор, омогућава се ефикасније искоришћавање термалне енергије чиме се повећава укупни степен искористивости електране. Ова карактеристика је посебно важна у геотермалним локалитетима са нижим температурама термалних извора.

Такође, треба нагласити и еколошке бенефите примене бинарних циклуса. Смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште, као и нижа потрошња воде у процесу производње електричне енергије, чине ове електране еколошки прихватљивијим избором у поређењу са класичним геотермалним електранама. Свакако постоје и бројни радни флуиди који су разрађени заједно са својим штетним дејствима.

Размотрени су Карнотов и Троугласти циклус који диктирају максималну могућу ефикасност било ког термалног процеса, бинарни циклуси показују висок степен компатибилности са овим теоретским оквиром. Кроз оптимизацију термалних процеса, бинарни циклуси настоје се приближити Карнотовој ефикасности, што је кључни корак ка постизању веће енергетске ефикасности.

У закључку, ово истраживање потврђује значај и потенцијал бинарних циклуса у експлоатацији геотермалне енергије. Њихова технолошка иновативност, еколошка чине их кључним актерима у транзицији ка одрживом енергетском систему. Имплементација ових технологија захтева даља истраживања, али обећава светлију и одрживију енергетску будућност.

6. Литература

[1] Лингбао Ванг, Хуасхан Ли, Хианбиао Бу, Мулти-објективе оптимизацион оф Бинару Фласхинг Цуцле (БФЦ) дривен бу геотхермал енергу, 18 Новембар 2019

[2] Аустин Андерсон, Бехназ Резаие, *Геотхермал тецхнологи: Трендс анд потенциал роле ин а сустаинабле футуре*, Април 2019.

[3] Алисон Холм, Леслие Блодгетт, Дан Јеннејохн анд Карл Гавелл, *Геотхермал Енергу: Интернационал Маркет Упдате*, Мај 2010.

[4] Еинар Тјөрви Елиассон, Сверрир Тхорхаллссон, Бенедикт Стеингримссон, *ГЕОТХЕРМАЛ ПОВЕР ПЛАНТС*, 2011.

[5] Дејан Миленић, Ана Врањеш, *Истраживање и валоризација субгеотермалних енергетских ресурса*, Београд 2015.

[6] Brief history of geothermal energy, објављено 18.11.2016.

URL: <https://www.eniscuola.net/en/2016/11/18/brief-history-of-geothermal-energy/>

[7] Ronald DiPippo, *Geothermal Power Plants*, Elsevier, Cambridge, MA, 08.04.2011.

[8] Canadian Geographic, *Global Energy Demand*, Октобар 2018.

[9] *Geotermalna energija*, 2023,

URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Geotermalna_energija

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента ПЕТАР (ЗОРАН) ДРАГАШ

Број индекса Р 65/14

Студијски програм ИНЖИЊЕРСТВО НАФТЕ И ГАСА

Наслов рада БИНАРНИ ЦИКЛУС ЗА ПРОИЗВОДЊУ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Ментор проф. МАРИЈА ШИВКОВИЋ

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Бинарни циклус за производњу електричне енергије

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (заокружити једну од две опције):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора 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)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, _____

Потпис ментора

Потпис студента

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента ПЕТАР ДРАГАШ

Број индекса Р65/14

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

Бинарни циклус за производњу електричне енергије

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис студента
