

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Обновљиви извори енергије 1

Број индекса: 360/2011

Дарко Д. Алексић

**Могућност примене геотермалне енергије за
производњу електричне енергије на примеру
Врањске Бање**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вања Шуштершич - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- Да осврт на порекло геотермалне енергије и пренос топлоте,
- Да поделу геотермалних извора и дефиницију термалних и термо-минералних вода,
- Да осврт на потенцијал геотермалне енергије, историјски развој и примену у Србији,
- Да поделу начина примене и коришћења геотермалне енергије,
- Да поделу геотермалних електрана,
- Да пример бинарне геотермалне електране у Врањској Бањи,
- Да економску анализу,
- Да опис еколошких аспеката искоришћавања геотермалне енергије.

Препоручена литература:

[1] Ruggero Bertani: "Performance of Generating Plan 2001 – Renewable Energy Plant", Annex 6: Figures and Facts about Geothermal Energy.

[2] Куревија Т., Голуб М.: „Искориштавање геотермалних лежишта“, Рударско-геолошко нафтни факултет, Завод за нафтно инжењерство, 2008.

[3] Шуштершич В., Бабић М.: „Геотермална енергија – енергија природних и вештачких извора топле воде“, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац 2009.

[4] International Energy Agency,: “Technology Roadmap – Geothermal Heat and Power”, 2011.

[5] Ronald DiPippo,: “Geothermal Power Plants – Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact”, Butterworth-Heinemann, 2edition, 2007.

Крагујевац, 27.02.2013.

ментор:

Др Вања Шуштершич

РЕЗИМЕ

Геотермална енергија је енергија која потиче из природне топлоте земље. Температура Земље је променљива, па се геотермална енергија може употребити у широком спектру температура, од собне температуре до и преко 300°C. Геотермална енергија се може користити и за производњу електричне енергије и директно користити у зависности од температуре и хемијског састава геотермалног флуида. Геотермални флуиди који имају високу температуру користе се за производњу електричне енергије док они са средњом и ниском температуром се углавном користе директно. Да би коришћење ресурса било што ефикасније, геотермална енергија се користи за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије. Будући да је геотермална енергија обновљива, у будућности ће се све више користити као извор енергије на Земљи а то ће смањити употребу фосилних горива, и самим тим и глобално загревање.

У Србији се користи само геотермална енергија из геотермалних минералних вода, углавном на традиционалан начин, највише у бањским и спортско-рекреативним центрима. Коришћење геотермалне енергије за грејање и друге енергетске сврхе је у почетној фази и веома скромно у односу на потенцијал геотермалних ресурса.

Кључне речи: Геотермална енергија, производња електричне енергије, директна употреба, обновљив, глобално загревање.

ABSTRACT

Geothermal energy is energy derived from the natural heat of the earth. The earth's temperature varies widely, and geothermal energy is usable for a wide range of temperatures from room temperature to well over 300°C. Geothermal energy can be used for both electricity generation and direct uses depending on the temperature and chemistry of the resources. High to medium resources are used for electricity generation while medium to low resources are mainly used for direct application. For efficient utilization of resources, geothermal energy is being utilized for combined heat and power. Since geothermal energy is renewable, it will be the future source of energy on earth. This will reduce uses of fossil fuels and hence address global warming.

In Serbia, geothermal energy from geothermal and mineral water only is used mostly in the traditional way, most of the spas, sports and recreation centers. The use of geothermal energy for heating and other energy production is at an early stage and very modest compared to the potential of geothermal resources.

Key words: Geothermal energy, electricity generation, direct uses, renewable, global warming.

САДРЖАЈ

УВОД.....	4
1. ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА.....	5
1.1. СТРУКТУРА ЗЕМЉЕ.....	6
1.2. ПРЕНОС ТОПЛОТЕ.....	7
1.3. ГЕОТЕРМАЛНИ ИЗВОРИ.....	9
1.4. ДЕФИНИЦИЈА ТЕРМАЛНИХ И ТЕРМО-МИНЕРАЛНИХ ВОДА.....	11
1.5. ГЕОТЕРМАЛНИ ПОТЕНЦИЈАЛ.....	12
1.6. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ПРИМЕНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	15
1.7. ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА У СРБИЈИ.....	16
2. НАЧИН ПРИМЕНЕ И КОРИШЋЕЊА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	20
2.1. ПРИМЕНА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПРОИЗВОДЊИ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	22
2.1.1. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОРИШЋЕЊЕМ СУВЕ ПАРЕ.....	23
2.1.1.1. Термодинамичке зависности процеса са сувом паром.....	25
2.1.2. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ НА ПРИНЦИПУ БРЗОГ ИСПАРАВАЊА.....	27
2.1.2.1. Термодинамичке зависности процеса брзог испаравања.....	28
2.1.3. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ СА БИНАРНИМ ЦИКЛУСОМ.....	35
2.1.3.1. Термодинамичке зависности бинарног циклуса.....	36

2.1.3.2. Избор радног флуида бинарног циклуса.....	43
2.1.3.3. Калина циклус.....	48
2.1.4. НОВА РЕШЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	51
3. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА.....	52
3.1. ДЕТАЉНА ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА.....	55
3.1.1. ИНВЕСТИЦИОНИ ТРОШКОВИ.....	55
3.1.1.1. Истраживачка фаза.....	55
3.1.1.2. Фаза потврђивања.....	56
3.1.1.3. Фаза развоја.....	56
3.1.2. ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗГРАДЊА ЕЛЕКТРАНЕ.....	57
3.1.2.1 Утицај карактеристика лежишта на избор технологија и трошкове електране.....	57
3.1.2.2. Утицај карактеристика локације на избор технологија.....	57
3.1.2.3. Изградња преносне мреже.....	58
3.1.2.4. Капитални трошкови.....	58
3.1.2.5. Остали трошкови везани уз развој електране.....	58
4. ПРИМЕР БИНАРНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕЛЕКТРАНЕ У ВРАЊСКОЈ БАЊИ.....	59
4.1. ТЕРМОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА БИНАРНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕЛЕКТРАНЕ.....	61
5. ЕКОЛОШКИ АСПЕКТИ ИСКОРИШЋАВАЊА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	72
5.1. КОРИШЋЕЊЕ ЗЕМЉИШТА.....	72
5.2. ЕМИСИЈА ГАСОВА И ПАРА.....	73
5.3. ЕМИСИЈА ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ.....	74
5.4. УПУМПАВАЊЕ ГЕОТЕРМАЛНОГ ФЛУИДА.....	75
5.5. НИВО БУКЕ.....	75
6. ЗАКЉУЧАК.....	76
ЛИТЕРАТУРА.....	77

УВОД

Схватање да се енергија вади само у облику угља, нафте и гаса и да се производи у термоелектранама и хидроцентралама је доминантни разлог због којег најприсутнија и најдоступнија геотермална енергија остаје скривена и неискоришћена. Становништво Србије је током дугог периода држано у својеврсној заблуди да се под појмом геотермална енергија подразумевају извори у којима је температура воде већа од 45°C. Међутим, под геотермалном енергијом подразумева се енергија која може да се преузме из воде, земљишта и стена чија температура прелази 10°C.

Технолошки развој је још седамдесетих година омогућио ефикасно коришћење нискотемпературне геотермалне енергије посредством топлотних пумпи. У том периоду се и у тадашњој Југославији, коришћењем домаће опреме прилично великих снага, радило на повећању енергетске ефикасности и снижавању трошкова грејања у нашим бањама. Садашњи, а и стари проблем Србије је што енергетски сектор воде људи који за циљ имају само милионе тона угља које треба ископати. Појам нискотемпературне енергије не постоји у садашњој Стратегији развоја енергетике Србије [1]. Геотермална енергија у класичном смислу (топли извори и бушотине) помиње се у смислу декларативног залагања за развој потенцијала Србије у том сектору, али без конкретних мера и решења.

Насупрот горе наведеном, изненађујуће велики значај се придаје коришћењу енергије ветра кога на добрим локацијама има нешто више од шест месеци годишње, као и енергији Сунца, која је теоретски присутна максимално пола дана. Биомаса такође није универзално доступна: потребно ју је сакупити и ускладиштити тамо где је има и када је има. Међутим у нашим условима, преко 50% произведене електричне енергије троши се у зградама за становање, првенствено за загревање простора и санитарне воде, за шта се ефикасно може користити геотермална енергија. У том случају, већи део наших производних електричних капацитета може се усмерити ка извозу електричне енергије.

1. ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА

Испод Земљине површине налазе се огромне залихе топлотне енергије - геотермална енергија. Назив геотермална долази од грчких речи *geo*, што значи земља и *therme*, што значи топлота. Потенцијал геотермалне енергије је огроман, има је 50 000 пута више од укупне енергије која се може добити из нафте и гаса широм света.

Геотермална енергија је топлотна енергија која се ствара у Земљиној кори спорим распадањем радиоактивних елемената, хемијским реакцијама или трењем при кретању тектонских маса. Количина такве енергије је толико велика да се може сматрати скоро неисцрпном, па се према томе геотермална енергија сматра обновљивим извором енергије.

Геотермална енергија се најчешће појављује у форми вулкана, извора вруће воде и гејзира. У неким земљама се геотермална енергија користи већ хиљадама година у облику бања односно рекреацијско-лековитог купања. Међутим, развој науке није се ограничио само на подручје лековитог искоришћавања геотермалне енергије већ је искоришћавање геотермалне енергије усмерио и према процесу добијања електричне енергије те грејању домаћинства и индустријских постројења. Светски геотермални потенцијал је велики, готово 35 милијарди пута већи него што износе данашње потребе за енергијом, али тек се врло мали део тога може исплативо искоришћавати, свега до дубине 5 000 m.



Слика 1: Геотермални извор

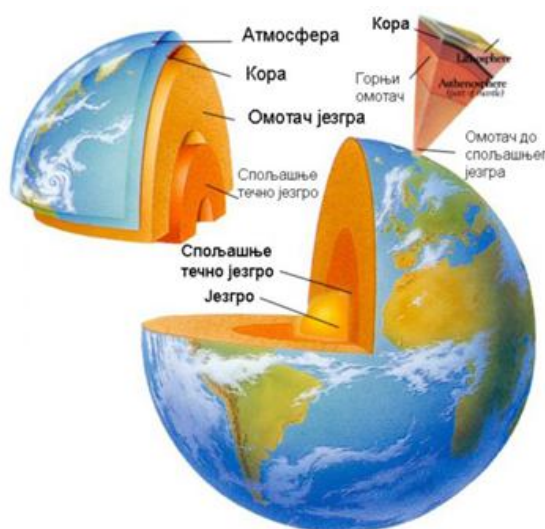
1.1. СТРУКТУРА ЗЕМЉЕ

У геолошким наукама преовладава мишљење да је Земља стара око 4,6 милијарди година што је утврђено одређивањем времена полураспада урана и торијума. Време полураспада U^{238} је $4,51 \cdot 10^9$ година, а Th^{232} је $1,39 \cdot 10^{10}$ година.

Атмосферски услови значајно су се променили од како је настао живот, што ствара еколошку равнотежу која модификује услове на површини Земље. Око 71% Земљине површине је покривено водом и Земља је једина планета Сунчевог система где вода може да опстане у течном стању. Осталих 29% површине се састоји из континената и острва. Земљина спољна површина је издељена на неколико сегмената, тектонских плоча које постепено мигрирају током периода од више милиона година.

Земља, по хемијском саставу, највећим делом сачињена је од гвожђа (32,1%), кисеоника (30,1%), силицијума (15,1%), магнезијума (13,9%), сумпора (2,9%), никла (1,8%), калцијума (1,5%) и алуминијума (1,4%); док преосталих 1,2% чине остали елементи у траговима. Пре сегрегације маса, верује се да су кору примарно чинили гвожђе (88,8%), са мањим количинама никла (5,8%), сумпора (4,5%), док су мање од 1% чинили остали хемијски елементи.

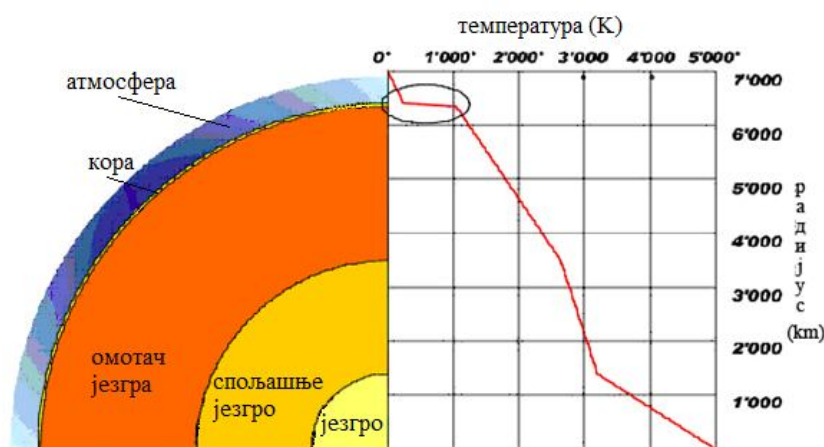
Спољашња крута кора Земље дубока је од 5 до 50 километара и састављана је од стена. Испод коре налази се омотач и он се протеже до дубине од 2 900 километара, а сачињен је од спојева богатих гвожђем и магнезијумом. Испод спољашње круте коре налазе се два слоја језгра - течни слој и чврсти слој у самом језгру. Полупречник Земље је отприлике 6 378 километара (сл. 2).



Слика 2: Пресек земље

1.2. ПРЕНОС ТОПЛОТЕ

Спуштањем кроз спољни слој Земље, тј. кору температура расте отприлике 17 до 30°C по километру дубине. Испод коре налази се омотач који је састављен од делимично растопљених стена и температура тог омотача је између 650 и 1 250°C. У самом језгру Земље температуре би по неким проценама могле бити између 4 000 и 7 000°C (сл. 3).

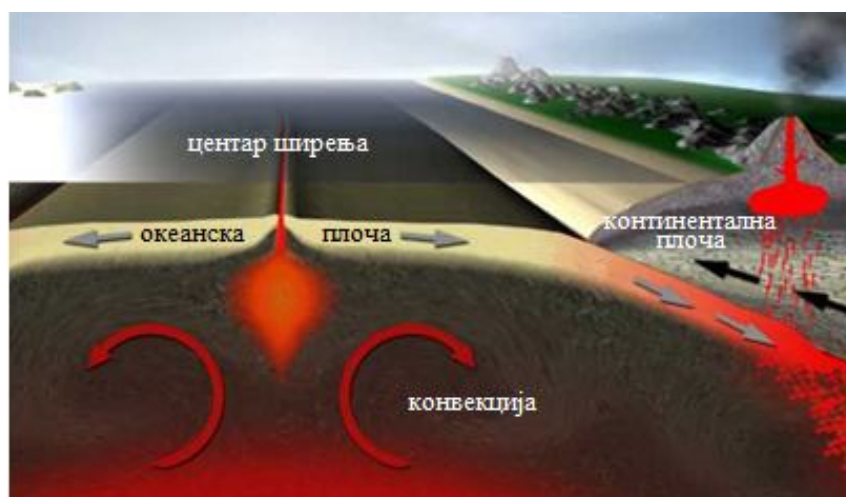


Слика 3: Промена температуре земље

Будући да топлота увек прелази са топлијих делова на хладније, а с обзиром на то да су код земљишта присутне три компоненте: чврста (органска и неорганска), течна (вода) и гасовита (ваздух), топлота из унутрашњости Земље преноси се према површини на три начина:

- кондукцијом кроз литосферу,
- конвекцијом кроз омотач, и
- зрачењем.

Пренос топлоте главни је покретач тектонских плоча (сл. 4). На местима где се спајају тектонске плоче може доћи до пропуштања магме у горње слојеве и та магма се тада хлади и ствара нови слој земљине коре. Кад магма дође до површине може створити вулкане, али већином остаје испод површине формирајући огромне базене и ту почиње да се хлади, а тај процес траје од 5 000 година до милион година. Подручја испод којих се налазе овакви базени магме имају висок температурни градијент, тј. температура расте врло брзо повећањем дубине и таква подручја изузетно су погодна за искорићавање геотермалне енергије.



Слика 4: Процес покретања тектонских плоча

Просечни проток топлоте из Земље је отприлике 58 mW/m^2 . Топлотни флуks карактеристичан за стене на европском континенту износи у просеку 62 mW/m^2 . Садржана топлота у невероватним количинама складиштеним у кори Земље је процењена на $12,6 \cdot 10^{24} \text{ MJ}$. У смислу енергије то је еквивалентно са $3,5 \cdot 10^{24} \text{ kWh} = 3,5 \cdot 10^{21} \text{ MWh}$. Ослобађање ове топлоте током једне године (нон стоп 24h) било би еквивалентно инсталисаној снази од $4 \cdot 10^{17} \text{ MW}$. У табели 1 дат је приказ средњих вредности геотермалног флуksа за поједине области.

Табела 1: Зависност средње вредности геотермалног флуksа у појединим областима [2]

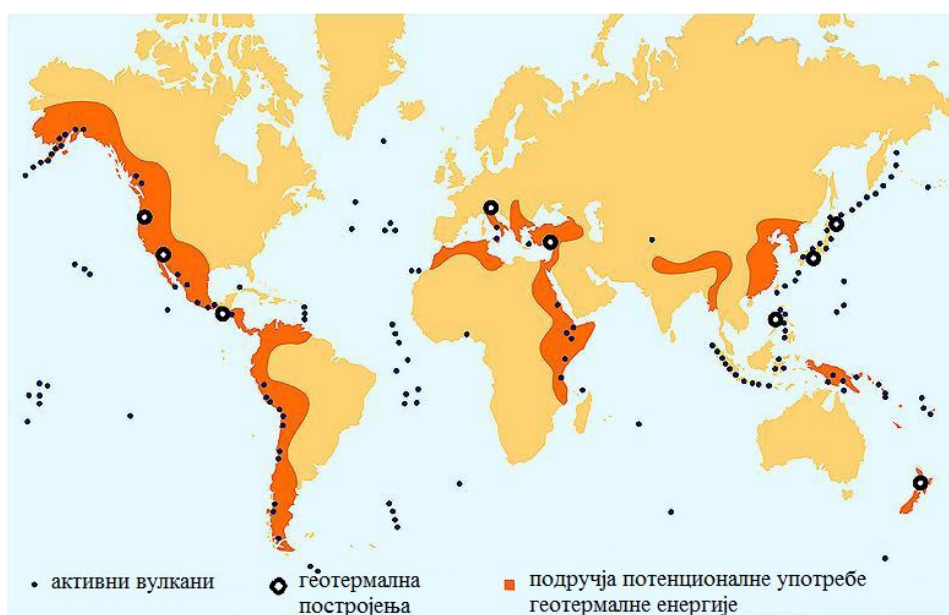
Област	Средња вредност геотермалног флуksа F_{gt} [mW/m ²] или [kW/km ²]	Број мерења
Континент		
Африка	36-61	15
Америка	25-150	85
Аустралија	35-160	65
Азија	22-155	60
Европа	26-140	60
Океани		
Атлантски	3,4-250	250
Индијски	5,9-220	250
Пацифик	2,9-340	600
Арктички	33-62	20
Геотермалне области		
Larderello (I)	450	
Oora Kei Korake (NZ)	4200	
Matsukawa (J)	630	

Такође, снага кондукцијског топлотног тока из Земљине унутрашњости процењује се на $42 \cdot 10^{12}$ W. Од тога броја:

- $8 \cdot 10^{12}$ W долази из Земљине коре (заузима само 2% укупне запремине Земље али је богата радиоактивним изотопима),
- $32,3 \cdot 10^{12}$ W долази из омотача који заузима 82% запремине Земље, и
- $1,7 \cdot 10^{12}$ W долази из Земљине језгра која заузима 16% запремине Земље и не садржи радиоактивне изотопе.

1.3. ГЕОТЕРМАЛНИ ИЗВОРИ

Под појмом геотермални извори подразумевају се извори геотермалног медија из подземних лежишта која могу бити без довода воде са површине или са природним или вештачким доводом воде са површине која тада пролази кроз подземна лежишта. Подручја која имају највећи број геотермалних извора у исто време су и она која су геолошки још врло активна, тј имају активне вулкане или у којима често долази до потреса (сл. 5). То су подручја око Тихог океана тзв. циркумпацифички ватрени круг (западни делови САД и Канаде, Јапан и источни Сибир), средњеатлантски гребен (Исланд и Азорска острва), планински ланци као што су Алпи и Хималаји, источна Африка, средња Азија као и нека тихоокеанска острва.



Слика 5: Подручја геотермалних постројења и активних вулкана

Подела геотермалних извора може се извршити на више начина и то:

- према степену истражености и „доказаности“ извора,
- према врсти геотермалних лежишта,
- према температури медија (вреле воде или паре).

Према степену истражености лежишта, познавању хемијског састава и физичких својстава медија (воде или паре), параметрима потребним за њихово утврђивање и могућностима за искоришћење, геотермални извори се деле на:

1. утврђене:

- билансне (које су исплативе за искоришћење до сада познатим техничким средствима),
- ванбилансне (које још увек нису исплативе или се не могу експлоатисати постојећим техничким средствима).

2. потенцијалне.

Категоризација геотермалних извора према врсти геотермалних лежишта се дели с обзиром на начин уласка медија у лежиште и изласку из њега на оне:

- са природним уласком и изласком (врело или извор воде),
- са природним улазом и вештачким излазом воде, кроз бушотину (артерски извор),
- са вештачким улазом и излазом воде (експлоатација оваквог типа лежишта инвестицијски је веома захтевна.

Потребно је уложити велика средства у бушотине и системе за сабирање и поновно утискивање геотермалне воде. Због углавном високе температуре и могуће повећане минерализације и садржаја радиоактивних састојака, из еколошких разлога потребно је овакву воду користити у затвореном систему (поновно утискивати назад у лежиште).

С друге стране, обзиром на термодинамичка и хидролошка својства деле се на:

- хидро-геотермалне изворе вруће воде,
- хидро-геотермалне изворе суве водене паре,
- хидро-геотермалне изворе вреле воде у великим дубинама,
- петротермичка изворе - вреле и суве стене на великим дубинама.

Извори топле или вруће воде, тзв. гејзири најчешћи су и најпрепознатљивији начин доласка загрејане воде из дубине на површину Земље. Потичу од вруће воде или паре која се налази заробљена у разломљеном и шупљикавом (порозном) стењу на мањим или средњим дубинама (од 100 до 4 500 m). При томе је медиј највећим делом у течной фази, а тек мањим делом у облику паре (као мехурићи). Када је температура довољно висока ($>170^{\circ}\text{C}$), вода се при изласку на површину претвара у пару која се може користити за погон парне турбине, а када су температуре ниже увек се користи секундарни преносник топлоте (тзв. бинарне геотермалне електране). Иначе, извори вруће воде за сада представљају једини геотермални извор који се у свету комерцијално искоришћава.

Извори суве водене паре на свету су ретки, али се сматрају најједноставнијим и најисплативијим за искоришћавање јер се природна сува водена пара може директно користити за погон парне турбине.

Лежишта воде и гасова под високим притиском налазе се на великим дубинама (од 3 000 до 6 000 m). Вода је при томе умерене температуре (између 90 и 200°C) и садржи отопљени метан. Захваљујући високим притисцима било би могуће искористити механичку, топлотну, па и хемијску енергију, али уз данашње технологије то се још увек не сматра исплативим.

Вруће и суво стење, односно **магма** налазе се у непропусним слојевима на великим дубинама и има високу температуру, између 700 и 1 200°C. За њихово искоришћавање била би потребна сложена технологија (довољно дубоке бушотине), што још увек није исплативо ни технолошки разрађено, а за сада постоји тек неколико испитних постројења (нпр. у Лос Аламосу у САД-у и Великој Британији).

Према температури геотермалног медија (воде или паре, односно њихових смеша), геотермални извори могу бити:

- нискотемпературни (с горњом границом температуре између 90 и 150°C),
- средњетемпературни (у подручју температура од најмање 90 до највише 225°C),
- високотемпературни (с доњом границом температуре између 150 и 225°C).

Велики део извора вруће воде или паре има ниске температуре (испод 150°C), па се таква вода не користи за производњу електричне енергије, већ за грејање или сличне намене. Осим тога, транспорт вруће воде или паре на велике раздаљине је скуп и везан са великим губицима, па се геотермални извори енергије морају користити локално (грејање просторија и стакленика, неки технолошки процеси у индустрији) [3].

1.4. ДЕФИНИЦИЈА ТЕРМАЛНИХ И ТЕРМО-МИНЕРАЛНИХ ВОДА

Термалне, минералне и термоминералне воде се релативно ређе појављују у односу на обичну воду, па се зато често и називају „ретке воде“ [4]. Термалне воде имају повећану температуру, а минералне воде имају повећан садржај растворених минерала (преко 1 g/l), док се воде са минерализацијом преко 50 g/l називају расолима. Према температури, минералне воде се деле на: хладне и топле (термалне). Топле (термалне) воде могу бити термо-минералне или чисто термалне. Температуре термалних и термо-минералних вода крећу се од 15°C до преко 100°C.

Подела минералних вода се врши на основу садржаја појединих елемената и то на: гвожђевите - садрже растворене соли гвожђа; алкалне или киселе – које садрже растворен натријум карбонат (Na_2CO_3); горке - садрже растворене соли магнезијум сулфата (MgSO_4); сумпоровите - садрже растворен сумпор водоник; радиоактивне - у којима се налазе у незнатним количинама растворене соли радиоактивних елемената (радијума, радона).

Термалне воде су распрострањене како у геосинклиналним тако и у платформним условима. За платформне области карактеристично је појављивање термалних вода, обично високо минерализованих или расолних, које често имају карактер минералних индустријских вода, а распрострањене су у дубљим деловима артеских хоризоната.

У оквиру геосинклиналних области, термалне воде најчешће су везане за поједине разломе у чврстим стенским масама. Области савременог вулканизма карактеришу високо термалне угљо-кисело-азотне воде, које су на већим дубинама прегрејане и преко 300°C . У природним условима, појављују се на површини терена у виду гејзира.

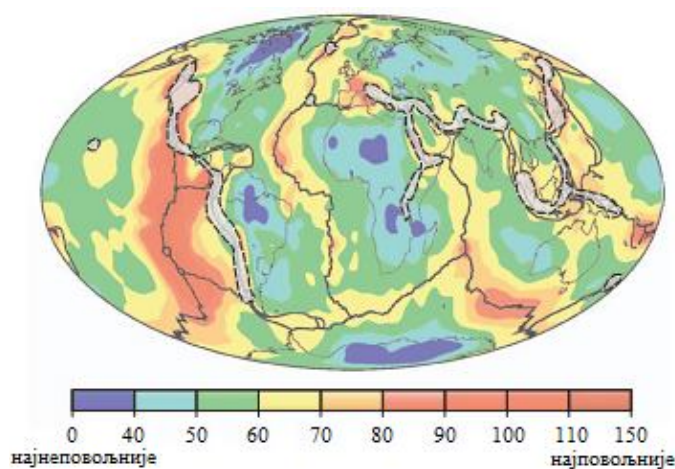
Температура подземних вода зависи од геотектонских услова који владају у литосфери. Познато је да се у горњим деловима литосфере на 1 km дубине температура у просеку повећава за $32,9^\circ\text{C}$, односно да се на дубини од 20 km могу очекивати температуре $550\text{--}600^\circ\text{C}$. Геотермални услови у различитим областима на земљи, варирају у широким границама. Највеће вредности геотермалног градијента карактеристичне су за области савремене вулканске активности, а најниже за области старих кристаластих штитова. У областима платформи изграђених од седиментних и вулcano-седиментних твorenина, геотермални градијенти су по величини блиски средње планетарним.

1.5. ГЕОТЕРМАЛНИ ПОТЕНЦИЈАЛ

Главни узрок формирања налазишта термалних вода је висок геотермални терестички топлотни ток због танке Земљине коре и топлотно-изолаторска функција глиновитих неогених седимената, који у хидрогеотермалним системима имају улогу повратног изолатора.

Целокупна геотермална енергија Земље могла би се проценити на $12,6 \cdot 10^{24}$ MJ, а коре $5,4 \cdot 10^{21}$ MJ [5]. Светски геотермални потенцијал је велики, скоро 35 милијарди пута већи него што износе данашње потребе за енергијом, али се врло мали део тога може успешно искористити и то до дубине од 5 000 m.

Најконзервативнија процена светских ресурса геотермалне енергије износи 5 000 EJ¹, од чега се сматра 10% потенцијално искористивим за 100 година. Уз претпоставку да је 75% економски искористиво и да је трећина високо температурни извор добија се потенцијал од 670 EJ годишње за директну примену и 1,2 EJ годишње за производњу електричне енергије (уз фактор оптерећења од 82% што је 46 GWe снаге) [6]. Далеко оптимистичније процене полазе од исте процене геотермалних ресурса, али без претпоставке о исцрпљивању. Уз сличне остале претпоставке, без умањивања од 25% за економску неискористивост, добија се више од 125 пута већа процена за производњу електричне енергије и директно коришћење.

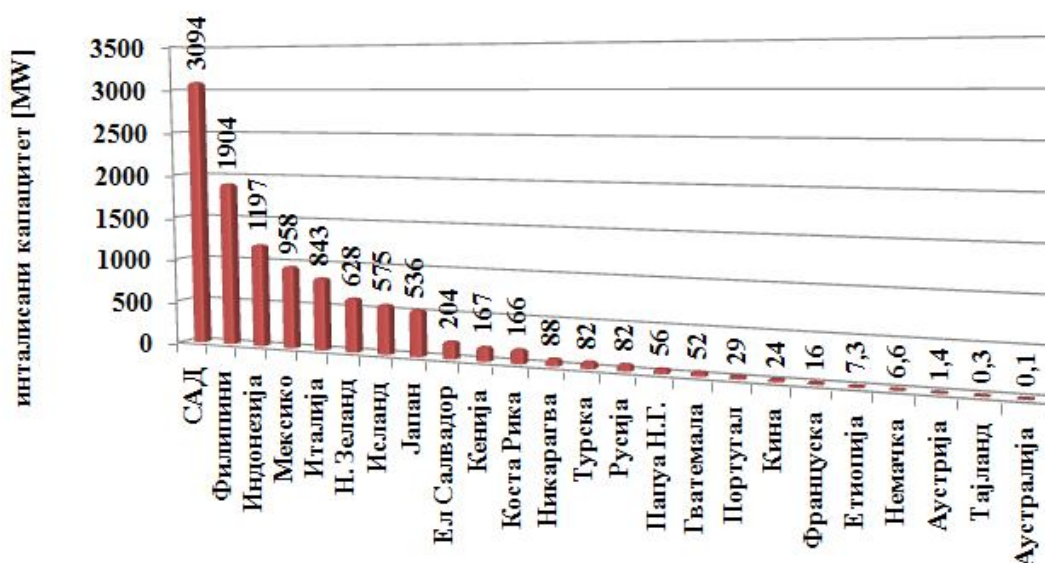


Слика 7: Мапа светских резервоара геотермалних ресурса, топлотних токова и границе тектонских плоча [7]

Геотермална енергија у Европи тренутно заузима мали удео укупне енергије добијене из обновљивих извора енергије. Иако је производња електричне енергије исплатива и конкурентна конвенционалним термоелектранама, ризици везани за улагања у геотермална лежишта и даље представљају ограничавајући фактор па је инсталисана снага око 1,4 GWe, док је на глобалном нивоу ситуација нешто другачија те је укупно инсталисано око 10,7 GWe капацитета за производњу електричне енергије до 2009 год., из које се генерише око 67,2 TWh_e годишње. Укупна инсталисана снага геотермалне топлоте (искључујући топлотне пумпе) износи 15 347 MWt у 2009, са годишњом производњом топлоте од 223 PJ² [7].

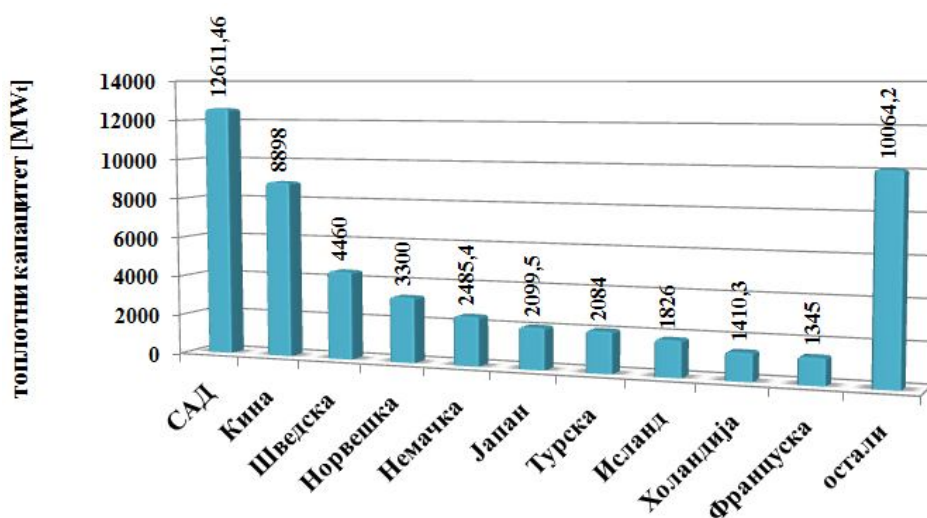
1 - EJ (exajoule) = 10¹⁸J

2 - PJ (petajoule) = 10¹⁵J

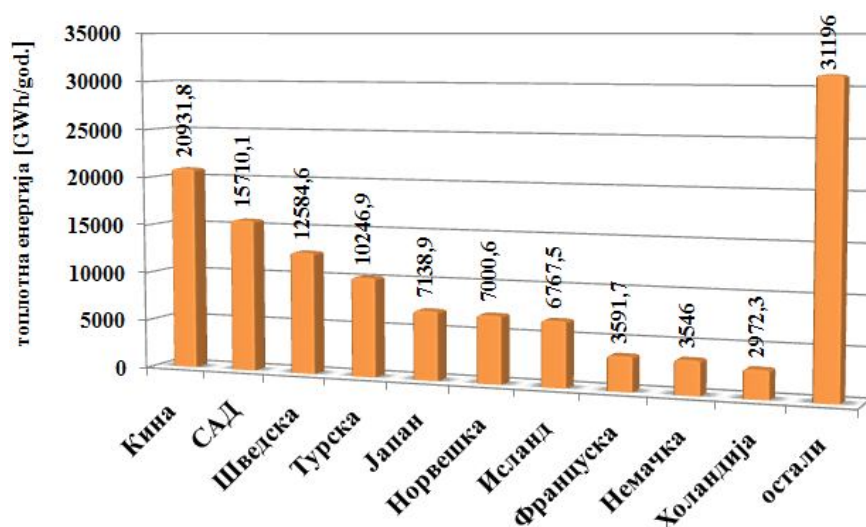


Слика 6: Инсталисани капацитети за производњу електричне енергије [7]

Коришћење топлотне енергије геотермалних лежишта има благи пораст, а највећим делом се користи за грејање и балнеологију. У последњој деценији коришћење плитких геотермалних ресурса употребом топлотних пумпи има експоненцијални раст па је инсталисани топлотни капацитет за директно коришћење топлотне енергије достигао ниво од 50,7 GW_t . Сликаом 7 приказано је десет земаља са највећим инсталисаним капацитетом (укупно 40 518,8 GW_t) и остале земље (укупно 10 064,2 GW_t), од којих се производи 121,7 $\text{TWh}/\text{god.}$. Сликаом 8 је приказана количина произведене топлотне енергије у првих десет земаља по производњи (укупно 90 490,4 $\text{GWh}/\text{god.}$), и у осталим земљама (укупно 31 196 $\text{GWh}/\text{god.}$) [8].



Слика 7: Укупни инсталисани капацитет у свету 50,7 GW_t



Слика 8: Укупно произведена количина топлоте у свету 121,7 TWh/god.

Ресурси геотермалних вода, који се у свету последњих година убрзано развијају и користе, највише су у експлоатацији у најнапреднијим земљама Европе и Америке. Искуства показују да је најрационалније равномерно коришћење геотермалних бушотина током целе године.

1.6. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ПРИМЕНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Познато је да су људи од давнина, као што су Римљани, Кинези и Индијанци, користили геотермалне изворе на више начина: у здравствене сврхе, за кување, грејање простора. Један од првих познатих начина примене геотермалних извора користио се још пре више од 10 000 година у индијанском насељу Палео (Paleo) са 9 геотермалних топлих извора, док је коришћење геотермалне енергије за производњу електричне енергије релативно новијег датума.

У званичним документима као почеци коришћења топлоте Земље за генерисање електричне енергије помиње се мало италијанско место Ландарело (Landarelo) и 1904. година (сл. 9). Те године започело је експериментисање са употребом геотермалне енергије за производњу електричне енергије, при чему је пара употребљена за покретање мале турбине која је напајала пет сијалица. Већ 1911. године почела је градња прве геотермалне електране која је завршена 1913., а називна снага јој је била 250 kW. То је

била једина геотермална електрана у свету готово пола века. Принцип рада ове електране био је веома једноставан: хладна вода упумпавала се на вруће гранитне стене које су се налазе близу површине, а на површину је излазила врућа водена пара са температуром изнад 200°C под високим притиском, која се користила за покретање генератора. И поред тога што су сва постројења у Ландарелу уништена у Другом светском рату, касније је ново постројење поново изграђено и проширено, те се оно користи и дан данас. Данас у том подручју постоји 14 термоелектрана укупне снаге око 400 MW. До 1975. године инсталисана снага постројења износила је око 1 400 MW (0,08% инсталисане снаге свих термоелектрана 1975. године), са годишњом производњом електричне енергије од око 8 700 GWh (0,1% светске производње електричне енергије 1975. године).

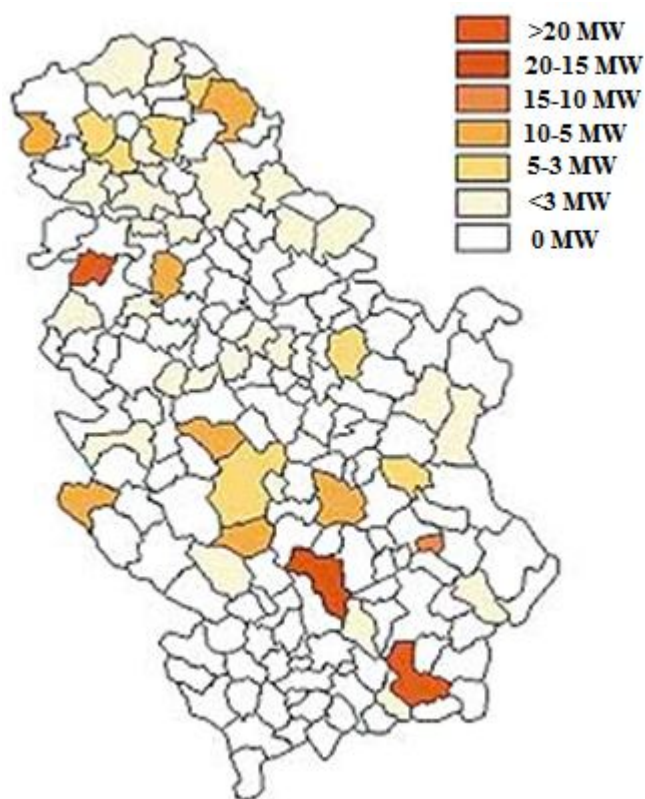
Иако је геотермална енергија обновљиви извор енергије, ипак се притисак паре у Ландарелу смањио за 30% од 1950. године.



Слика 9: Прво геотермално постројење, 1904. Године, Лардарело, Италија

1.7. ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА У СРБИЈИ

Геотермална енергија у Србији се симболично користи, само са 86 MW, иако по геотермалном потенцијалу спада у богатије земље. Њено коришћење и експлоатација морају постати интензивнији јер на то приморавају следећи фактори: тензије нафтно-енергетске неравнотеже, неминовна транзиција на тржишну економију, стални пораст дефицита фосилних и нуклеарних горива, погоршавање еколошке ситуације и пораст трошкова за заштиту околине. Највећи значај за Србију имаће директно коришћење геотермалне енергије за грејање и топлификацију руралних и урбаних насеља и развој аграра и туризма.



Слика 10: Укупна снага геотермалних извора у Србији [6]

Геотермалне карактеристике територије Србије су веома интересантне. То је последица повољног геолошког састава терена и повољних хидролошких и геотермалних карактеристика терена. Густина геотермалног тока је главни параметар на основу којег се процењује геотермали потенцијал неког подручја. Он представља количину геотермалне топлоте која сваког секунда кроз површину од 1 m^2 долази из Земљине унутрашњости до њене површине. На највећем делу територије Србије густина геотермалног топлотног тока је већа од његове просечне вредности за континентални део Европе, која износи око 60 mW/m^2 . Највеће вредности од преко 100 mW/m^2 су у Панонском басену, централном делу јужне Србије и централној Србији. На територији Србије ван Панонског басена налази се 160 природних извора геотермалних вода са температуром већом од

15°C . Највећу температуру од њих имају воде извора у Врањској Бањи (96°C), затим у Јошаничкој Бањи (78°C), Сијеринској Бањи (72°C) итд. Укупна издашност свих природних геотермалних извора је око $4\,000 \text{ l/s}$. Пема садашњим сазнањима на територији Србије постоји 60 налазишта геотермалних вода са температуром већом од 15°C до дубине од $3\,000 \text{ m}$.

Укупна количина топлоте која се налази акумулирана у налазиштима геотермалних вода у Србији до дубине од 3 km , око два пута је већа од еквивалентне топлотне енергије која би се могла добити сагоревањем свих врста угљева из свих њихових налазишта у Србији. Издашност 62 вештачка геотермална извора, тј. геотермалне бушотине, на подручју Војводине је око 550 l/s , а топлотна снага око 50 MW , док на осталом делу Србије из 48 бушотина 108 MW . На територији Србије поред повољних могућности за експлоатацију топлотне енергије и осталих геотермалних ресурса из геотермалних вода, постоје и повољне могућности за експлоатацију геотермалне енергије из „сувих“ стена, тј. стена које не садрже слободну подземну воду. У том случају вода се упумпава у подземне топле стене где се загрева. Испумпавањем тако загрејане воде остварен је пренос енергије из топлих стена. Сматра се да експлоатација енергије из овог ресурса неће почети у догледно време, јер треба узети у обзир да се овај ресурс тренутно минимално користи, и то превасходно - природна изворишта топле и лековите воде [6].

У Србији се користи само геотермална енергија из геотермалних-минералних вода, углавном на традиционалан начин, највише у балнеолошке и спортско-рекреативне сврхе. Коришћење геотермалне енергије за грејање и друге енергетске сврхе је у почетној фази и веома скромно у односу на потенцијал геотермалних ресурса. У Војводини се енергетско коришћење геотермалних вода врши почев од 1981. године. За те сврхе служе 23 бушотине. Воде из две бушотине користе се за производњу поврћа у стакленицима. Три бушотине користе се у сточарству за грејање фарми за узгој свиња, две у фабрикама коже и текстила у производном процесу, три за загревање пословних просторија, а воде из тринаест бушотина користе се у бањским и спортско-рекреативним и туристичким центрима. Укупна топлотна снага свих ових бушотина је 24 MW. Ван Панонског басена, односно ван Војводине, геотермалне воде се користе за грејање на неколико локалитета. Ово коришћење за те сврхе је започело пре четрдесет година у Врањској Бањи. Ту се геотермалном водом данас загрева стакленик за производњу цвећа, живинарска фарма, једна индустријска текстилна хала и просторије бањског рехабилитационог центра. Велики хотелски и рехабилитациони центар са пливачким базеном загревали су се у Куршумлијској бањи. У Нишкој Бањи изграђен је систем за грејање хотелско-туристичког и рехабилитационог центра са топлотним пумпама снаге 5 MW, који користи „отпадне“ термалне воде температуре 25°C, који је највећи у Јужној Европи. На исти начин, тј. са топлотним пумпама, користе се геотермалне воде са температуром од 30°C у Пролом Бањи. Укупна инсталисана снага на свим локацијама где се врши директно коришћење геотермалних - минералних вода је око 74 MW, а са топлотним пумпама још 12 MW. Према садашњем стању познавања геотермалних ресурса, најбогатији а самим тим и најзначајнији хидрогеотермални ресурси налазе се на подручју Мачве, затим на подручју Врањске Бање и Јошаничке Бање.

Према резултатима истраживања, за интензивно коришћење термалних вода највеће су могућности на подручјима Посавине, Срема и Мачве. Нарочито су повољне могућности у Мачви, јер је дубина резервоара 400-600 m, а температура 80°C. Само на бази експлоатације термалних вода у Мачви могућа би била топлификација већег броја градова, са укупно 150 000. Србија је, у погледу енергије, увозно оријентисана земља. На подручју Мачве, из Земљине утробе, са свега 500 метара дубине, налази се вода температуре од 35 до 78°C, док се у свету воде толике температуре откривају са дубине од два километра.

Најважнији извори у Војводини и по капацитету највећи корисници енергије хидротермалних бушотина су бање „Јунаковић“ код Апатина и „Кањижа“. У Кањижи се користи око 150 000 m³ односно 110 000 m³ термалних вода годишње. То су углавном целогодишњи корисници који термалну воду користе сезонски за загревања објеката. Следећа по значају су група корисника у Бечеју: ОСЦ „Младост“, ДЗ „Предраг Хаднађев“ и хотел „Бела лађа“ са око 100 000 m³ термалних вода годишње код којих је сезонско коришћење ипак доминантно.

У категорији сличних корисника су још базени у Темерину, Врбасу и на Палићу. Следећа група, искључиво сезонских корисника енергије хидротермалних вода, је из

области пољопривредне производње. Најзначајнији су свињогојске фарме: ДП „Козара“ из Банатског Великог Села, ДП „Мокрин“ из Мокрина, а до пре пар година и „Јединство“ из Кикинде које је, као и ДП „Елан“ из Србобрана за загревање пластеника престало да је користи. Посебно су погодни корисници из индустрије као што су ДД „Кулски штофови“ и Фабрика коже „Етерна“ из Куле, јер је реч о целогодишњем коришћењу за технолошке потребе.

Табела 2: Начин коришћења хидрогеотермалне енергије у Србији [10].

локација	начин коришћења	издашност, [kg/s]	температура, [°C]		искоришћена енергија, [TJ/god.]
Кањижа 1	Д/Б	5,0	41	26	9,89
Кањижа 2	Д/Б	14,0	65	26	72,02
Кула 1	Б	9,5	50	25	46,16
Кула 2	И	8,3	53	25	30,65
Кула 4	И	8,5	51	26	28,03
Б. Петровац 1	Г	16,7	46	25	46,26
Б. Петровац 2	А	7,8	45	24	21,60
Пригревица	Д/Б	21,0	54	25	80,33
Србобран	Г	11,7	63	24	60,18
Кикинда 1	Д	6,2	50	27	18,81
Кикинда 2	Ф	15,2	51	26	50,12
Мокрин	Ф	10,5	51	26	34,62
Врбас	Б	4,3	51	23	13,26
Темерин	Б	20,0	41	25	39,57
Б. П. Село	Ф	10,0	43	26	34,29
Бечеј	Д	19,4	65	24	104,91
Врањска Бања	И/Ф/Д/Б/Г	77,0	96	50	467,20
Сијаринска бања	Д/Б	7,4	76	25	49,78
Јошаничка Бања	Д/Б	17,0	78	40	85,21
Луковска бања	Д/Б	12,0	67	35	50,65
Куршумлија	Д/Б	20,0	68	25	113,43
Младеновац	Б	19,0	53	25	70,17
Паланка	Б	13,0	56	25	53,16
Н. Пазар	Б	10,0	52	28	31,65
Матаруге	Б	47,0	43	24	117,79
Рибарска Бања	Д/Б	37,0	44	25	92,73
Пећка бања	Б	4,0	36	25	5,80
Илиџа (Пећ)	Б	17,5	48	26	50,78
Бујановачка бања	Д/Б	7,0	43	24	17,54
Гамзиград	Д/Б	10,0	42	24	23,74
Овчар бања	Д/Б	50,0	38	27	72,54
Врњачка Бања	Б	5,0	36	25	7,25
Нишка Бања	Д/Б	60,0	37	25	94,97
Прибојска бања	Б	70,0	36	30	55,40
Клокот	Б	15,0	34	25	17,80
Ковиљача	Б	130,0	30	24	102,88
Брестовачка бања	Б	3,0	40	30	3,96
Рајчиновића бања	Б	8,0	36	28	8,44
Буковичка бања	Б	15,0	34	28	11,87
Пролом бања	Б	15,0	31	24	13,84
Г. Трепча	Б	20,0	30	24	15,82
Дебрц 1	Д	15,0	53	48	9,89
УКУПНО					2335
Начин коришћења: И – индустрија, А – сушење пољопривредних производа, Ф – узгој риба, свиња и живине, Д – грејање станова, Б – рекреација и балнеологија, Г – стакленици.					

2. НАЧИН ПРИМЕНЕ И КОРИШЋЕЊА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Производња електричне енергије је најважнији начин искоришћавања високо температурних геотермалних извора ($>150^{\circ}\text{C}$), док се ниско и средње температурни геотермални извори најчешће користе директно или се примењују топлотне пумпе, што је приказано табелом 3.

Табела 3: Начин примене геотермалне енергије у функцији температуре радног флуида

начин примене	температура
Топлотне пумпе	$4-38^{\circ}\text{C}$
Директна примена	$38-150^{\circ}\text{C}$
Производња електричне енергије	$>150^{\circ}\text{C}$

Најекономичнији и најједноставнији начин производње електричне енергије је свакако из лежишта суве водене паре. Водена пара под притиском из геотермалног извора доводи се на лопатице обичне парне турбине, а иза ње се испушта ваздух. Код високотемпературних геотермалних лежишта, у којима је врућа вода доминантан флуид ($>150^{\circ}\text{C}$), врућа вода на површини испарава и, након одвајања течне фазе у сепаратору, пушта се на лопатице турбине за покретање електричног генератора. Уколико је температура воде довољно висока, вода може испарити у још једном кораку, па је поновно могуће производити електричну енергију (процес двоструког испаравања). Ако је температура геотермалног флуида средња ($100-150^{\circ}\text{C}$), топлота из флуида се користи за испаравање другог, секундарног лако испаривог радног флуида, који покреће лопатице турбине - бинарни процес.

Кад је у питању директна употреба геотермалне енергије најчешћи облици примене су:

- грејање и хлађење простора,
- примена топлотних пумпи (подижу топлоту ниско температурним геотермалним водама),
- употреба у стакленичкој производњи воћа и поврћа,

- грејање базена и примена у балнеологији,
- индустријска употреба и процеси сушења,
- аквакултура (грејање базена за узгој рибе).

Као најбоља слика употребе геотермалне енергије у функцији температуре геотермалног флуида користи се Линдалов дијаграм, (према В. Lindal-у, исландском инжењеру који је први предложио одговарајуће температуре за поједине процесе искоришћавања геотермалних вода 1985. године) који је приказан сликом 11.



Слика 11: Линдалов температурни дијаграм коришћења геотермалне енергије

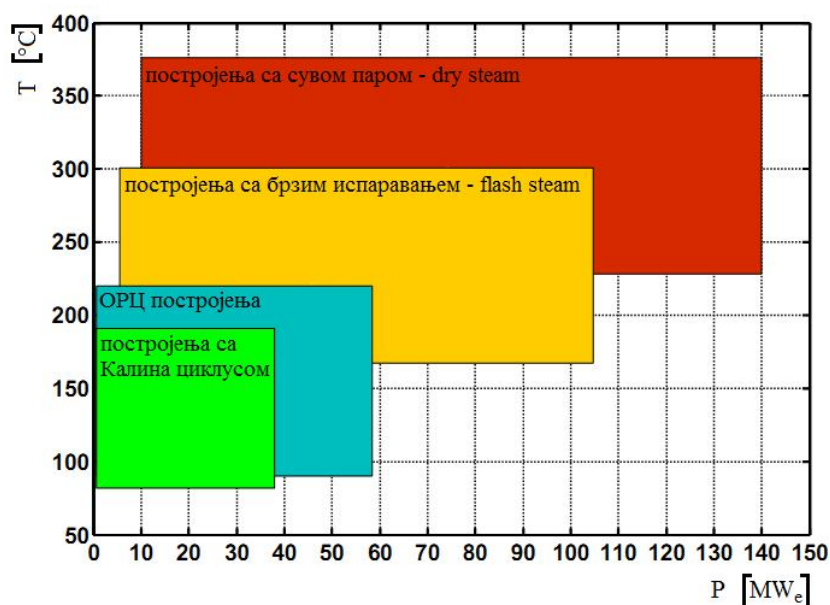
2.1. ПРИМЕНА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПРОИЗВОДЊИ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Електране које раде на принципу искоришћења геотермалне енергије смештају се изнад самог извора енергије. Предности коришћења геотермалне енергије су вишеструке. Као прво, нема транспорта горива до електрана нити транспорта пепела до места за одлагање (као код коришћења чврстих горива). Друго, не постоји потреба за изградњом цевовода, што је случај код електрана које користе гас као погонско гориво. Такође, нема потребе за изградњом скувих саобраћајница које би биле потребне за транспорт течних горива. Код геотермалних електрана нема ни загађења вода, јер технолошки процес не загађује воду која се користи за хлађење. Електране на бази геотермалне енергије не сагоревају фосилна горива за производњу електричне енергије тако да је њихов ниво емисије штетних гасова веома низак. Геотермалне паре и вреле воде природно не садрже веће концентрације сумпорводоника и других гасова, као ни хемикалије које могу бити штетне по човекову околину. Ако их и садрже онда су они искоришћени за производњу тржишних производа као што је на пример течно ђубриво (ако садржи фосфор, биће искоришћено за прављење вештачког ђубрива нпр.). Ове електране ослобађају око 1% угљендиоксида који се ствара у термоелектранама истог капацитета које сагоревају фосилна горива (угаљ, земни гас, нафта). Геотермалне електране, с друге стране, емитују свега 1-3% сумпорних компоненти у односу на електране које сагоревају угаљ или нафту.

Постоје три врсте геотермалних електрана које се деле према температури и притиску резервоара из којег користе енергију, а то су.

- постројења за добијање електричне енергије коришћењем суве паре,
- постројења за добијање електричне енергије на принципу брзог испаравања (једноструким и двоструким), и
- постројења за добијање електричне енергије бинарним циклусом

Који ће тип постројења бити инсталиран зависи од врсте лежишта. Слика 12 приказује подручја примене основних типова геотермалних електрана зависно од јединичне снаге и температуре лежишта.

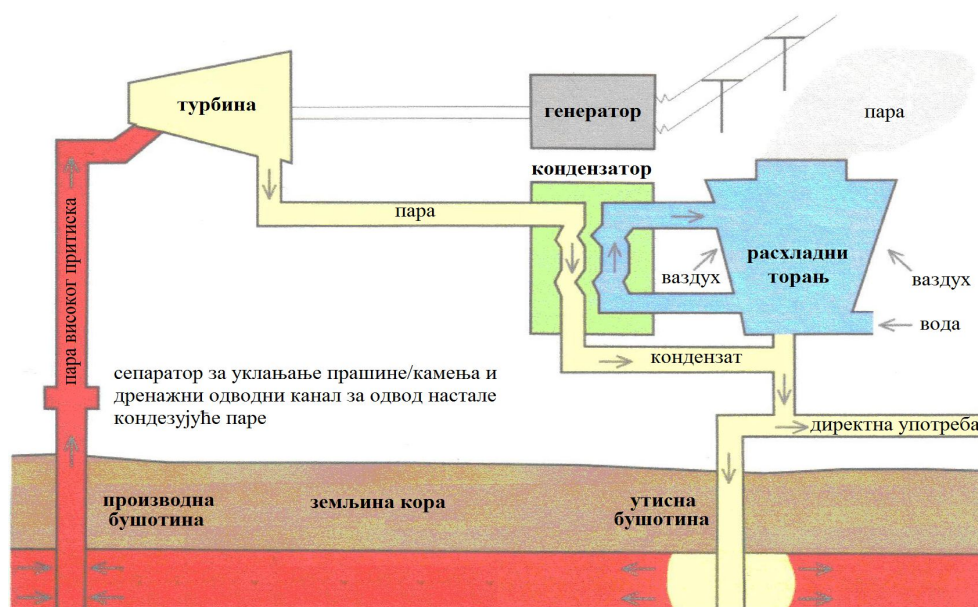


Слика 12: Подручја примене основних типова геотермалних електрана [11]

2.1.1. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОРИШЋЕЊЕМ СУВЕ ПАРЕ

У прву врсту убрајају се оне електране код којих се врела вода тренутно претвара у пару када се ослободи притиска који влада у резервоару, тј. при притиску који је нижи од притиска резервоара. Снага паре се користи за погон турбине која, пак, покреће генератор. Након проласка кроз турбину пара се кондензује и вода се враћа у резервоар преко утисне бушотине да би се поново загрејала, па овај систем представља један затворени циклус (сл. 13).

Ефикасност претварања енергије код оваквих постројења је веома мала и износи око 30%. Ипак, пошто се вода загрева геотермалном активношћу (што је супротно сагоревању горива), тај податак није од пресудног значаја у поређењу са производним постројењима која користе конвенционална фосилна горива. На ефикасност и економичност ових постројења утиче и присуство некондензованих гасова као што су: угљен-диоксид и водоник-сулфат. Притисак ових гасова смањује ефикасност турбина, а поред тога, и уклањање ових гасова повећава експлоатационе трошкове.



Слика 13: Принцип рада електрана на суву пару
(тзв. *Dry steam Power Plant*)

Постројења која раде на суву пару су најједноставнија и имају најекономичнију технологију и стога су широко распрострањена. Ова технологија је добро развијена и доступна на тржишту у опсегу од 35 MW до 120 MW. САД и Италија имају највеће геотермалне ресурсе суве паре, али ови ресурси се такође могу наћи у Индонезији, Јапану и Мексику.

У Калифорнији, поље гејзира је поље суве паре. То је највећи извор геотермалне енергије на свету са инстали-саним капацитетом од око 1 100 MW. Постоји још једна велика електрана у Колораду (сл. 14), која користи овакав систем. Количина произведене електричне енергије из тог постројења још увек је довољна да снабде електричном енергијом град величине Сан Франциска. Уобичајена температура паре на излазу из бушотине код оваквих циклуса је преко 235 °C.



Слика 14: Геотермална електрана са сувом паром
- Колорадо

2.1.1.1. Термодинамичке зависности процеса са сувом паром

Термодинамички процес који се одвија у овом постројењу графички је приказан T - s дијаграмом на слици 15. Пошто је на излазу из бушотине радни флуид у стању засићене паре (или незнатно прегрејане паре), почетна тачка (тачка 1) налази се на линији засићења. Ако је пара прегрејана, тачка 1 незнатно се помера удесно. У процесу експанзије од 1-2 турбина генерише нешто мање снаге од идеалне, при изентропском процесу 1-2s. У кондензатору (2-3) топлота се предаје расхладној води и одлази у околину.



Слика 15: T - s дијаграм електрана са сувом паром

Специфични рад који производи турбина по јединици масе паре дат је следећим изразом:

$$W_t = h_1 - h_2 \quad (2.1)$$

Претпостављајући да је процес у турбини адијабатски и занемарујући промене кинетичке и потенцијалне енергије при уласку и изласку флуида из турбине. Максимални могући рад био би остварен уколико би турбина радила адијабатски тј. при константној ентропији.

Изентропски степен корисности турбине представља однос стварног рада и изентропског рада:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (2.2)$$

Снага коју развија турбина је дата следећим изразом:

$$P_t = \dot{m}_s \cdot W_t \cdot \dot{m}_s \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_s \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_t \quad (2.3)$$

Бруто снага коју развија генератор биће једнака:

$$P_e = P_t \cdot \eta_g \quad (2.4)$$

Нето снага представља бруто снагу умањену за сва паразитска оптерећења укључујући и снагу неопходну за погон пумпе кондензата, снагу вентилатора у расхладном торњу и расвету.

Степен сувоће x , у смеси која се формира након испаравања директно утуче на степен корисности турбине.

Применом Баумановог правила [12] при прорачуну степена корисности турбине при њеном раду у условима влажне паре η_{tvp} , важи следећа релација:

$$\eta_{tvp} = \eta_{tsp} \cdot \left[\frac{1 + x_2}{2} \right] \quad (2.5)$$

при чему се најчешће узима да је степен корисности турбине у условима рада са сувом паром $\eta_{tsp} = 85\%$.

Термодинамички параметри у тачки 2 дефинишу се решавањем једначине (2.2). Користећи својства течности у тачки 2s, (идеални излаз из турбине), из познате вредности ентропије и притиска у тачки 2s израчунава се вредност идеалне енталпије:

$$h_{2s} = h_3 + [h_g - h_3] \cdot \left[\frac{s_1 - s_3}{s_g - s_3} \right] \quad (2.6)$$

Када се Бауманово правило искористи у прорачуну, добија се енталпија на излазу из турбине при реалним условима:

$$h_2 = \frac{h_1 - A \cdot \left[1 - \frac{h_3}{h_g - h_3} \right]}{1 + \frac{A}{h_g - h_3}} \quad (2.7)$$

где је фактор A дефинисан као:

$$A = 0,425 \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (2.8)$$

У овим једначинама усвојена је претпоставка да је пара на улазу у турбину засићена. Ако је на улазу у турбину прегрејана пара (као што се често дешава), неопходан је сложенији прорачун.

Специфични рад турбине при сувој експанзији W_{tsp} , дефинисан је изразом:

$$W_{tsp} = h_1 - h_4 \quad (2.9)$$

док за „влажну експанзију“ W_{tvp} важи:

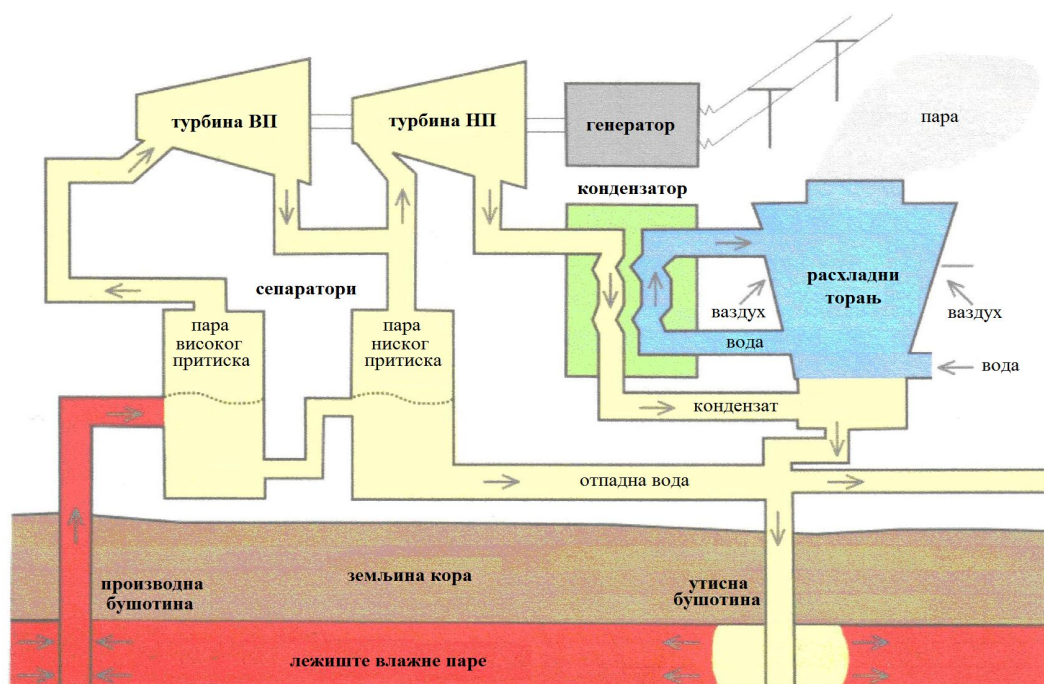
$$W_{tvp} = h_1 - h_2 \quad (2.10)$$

Степен корисности оваквог постројења се дефинише као:

$$\eta = \frac{Q_d - |Q_o|}{Q_d} \quad (2.11)$$

2.1.2. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ НА ПРИНЦИПУ БРЗОГ ИСПАРАВАЊА

Другу врсту електрана чине оне које користе резервоаре са сувом воденом паром или паром са веома мало воде. Код тих електрана пара из резервоара након проласка кроз сепаратор крутих честица директно улази у турбину генератора. Сепаратор спречава оштећења турбине која могу настати ударом честица о делове турбине, а које су ношене млазом паре из резервоара (сл. 16). Ово је тзв. „*flash steam*“ процес, процес брзог испаравања. Температура геотермалног флуида најчешће је у распону од 150-300°C. Најчешће се сусрећу два типа оваквих електрана: једностепене и двостепене.



Слика 16: Двостепени циклус брзог испаравања за производњу електричне енергије

Технологија једноступеног циклуса брзог испаравања („*single flash steam*”) користи се када је хидротермални извор у течном облику и то је најчешћи тип геотермалног постројења.

Флуид се убризгава у резервоар који се налази на много нижем притиску него флуид, што изазива брзо испаравање (*flash*). Пара покреће турбину која је везана за генератор као и код постројења која раде са сувом паром. Овде се јавља проблем испаравања геотермалног флуида унутар бушотине, па се стога, у циљу спречавања испаравања радног флуида бушотина држи под високим притиском. Већина геотермалних флуида не испарава, па се овај флуид поново враћа у утисне бушотине или се користи за директно загревање.

2.1.2.1. Термодинамичке зависности процеса брзог испаравања

Дијаграм на коме се најбоље види термодинамички процес геофлуида је приказан у $T-s$ дијаграму (сл. 17). Процес почиње када је геофлуид под притиском (тачка 1), и у непосредној близини криве засићења. Процес брзог испаравања је моделиран као процес са константном енталпијом тј. као изенталпски процес јер се дешава стално, спонтано, суштински адијабатски, без извршеног рада. Такође, можемо занемарити било какву про-

мену кинетичке и потенцијалне енергије јер течност брзо испарава, па важи следећа зависност:

$$h_1 = h_2 \quad (2.12)$$

Процес одвајања паре и течности моделира се као процес под сталним притиском, тј. као изобарски процес. Степен сувоће x , у смеси која се формира након испаравања (стање 2), може се наћи из следеће зависности:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (2.13)$$

Специфични рад који производи турбина по јединици масе дат је следећом релацијом:

$$W_t = h_4 - h_5 \quad (2.14)$$

уз претпоставку да нема губитка топлоте на излазу из турбине и занемарујући промене кинетичке и потенцијалне енергије флуида на улазу и излазу из турбине. Максимални могући рад био би генерисан ако би турбина радила адијабатски и реверзибилно, тј. са константном ентропијом. Тај процес приказан на слици 17. при чему крива од тачке 4 до 5s представља идеалан процес.



Слика 17: T - s дијаграм „single flash steam“ циклуса

Изентропска ефикасност турбине η_t , дефинише се као однос стварног рада и изентропског рада:

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \quad (2.15)$$

Снага турбине је:

$$P_t = \dot{m}_{sp} \cdot W_t = x_2 \cdot \dot{m}_{total} \cdot W_t \quad (2.16)$$

Ова једначина представља бруто развијену механичку снагу турбине. Бруто електрична снага коју развија генератор биће једнака:

$$P_e = \eta_g \cdot P_t \quad (2.17)$$

При израчунавању изентропске ефикасности турбине η_t мора се узети у обзир и количина влаге која је присутна у току процеса експанзије, тј. што је већа количина влаге, то је нижа ефикасност. Овај ефекат се квантификује помоћу тзв. Баумановог правила [12], који каже да 1% просечне влаге узрокује пад ефикасности турбине за око 1%. Будући да геотермална турбина углавном функционише у влажним областима, морамо да рачунамо на пад ефикасности.

Усвајањем Баумановог правила, проналазимо изентропску ефикасност турбине за рад са влажном паром:

$$\eta_{tvp} = \eta_{tsp} \cdot \left[\frac{x_4 + x_5}{2} \right] \quad (2.18)$$

где се најчешће усваја да је $\eta_{tsp} = 0,85 \%$

$$h_{5s} = h_6 + [h_7 - h_6] \cdot \left[\frac{s_4 - s_6}{s_7 - s_6} \right] \quad (2.19)$$

Када се Бауманово правило искористи и израз (2.18) замени у израз (2.19), добија се енталпија на излазу из турбине при реалним условима:

$$h_5 = \frac{h_4 - A \cdot \left[1 - \frac{h_6}{h_7 - h_6} \right]}{1 + \frac{A}{h_7 - h_6}} \quad (2.20)$$

где је фактор A дефинисан као:

$$A = 0,425 \cdot (h_4 - h_{5s}) \quad (2.21)$$

Једначина (2.21) се заснива на претпоставци да је сувоћа паре на улазу у турбину, x_4 , једнака јединици, тј, да је пара засићена. Ако је на улазу влажна пара, (као што је то случај у двоструким “flash” системима), онда једначина (2.20) мора бити модификована и имаће облик:

$$h_5 = \frac{h_4 - A \cdot \left[x_4 - \frac{h_6}{h_7 - h_6} \right]}{1 + \frac{A}{h_7 - h_6}} \quad \text{за } x_4 < 1 \quad (2.22)$$

Технологија двостепеног брзог испаравања (“*double flash steam*”) користи се када температура топле воде издвојене у једностепеном постројењу није довољно висока да би тај систем био примењен. Примена овог система повећава инвестиционе трошкове за 15-25% у односу на једноструки тип постројења, због додатних инсталација. Овакав систем примењен је први пут у свету у Јапану (Hatchobaru 110 000 kW, слика 18).



Слика 18: Геотермално постројење Hatchobaru - Јапан (110 000 kW)



Слика 19: T - s дијаграм двостепеног циклуса у постројењима са две турбине

На слици 19 је приказан T - s дијаграм за двостепени „flash“ процес, који се одвија од тачке 1-2 и од 3-6. Ова два процеса анализирана су на исти начин као и поступак код једностепених („single flash“) процеса. Сваки степен је праћен процесом одвајања паре, дефинисаног влажношћу x . Следеће једначине описују тај процес:

$$h_1 = h_2 \quad (2.23)$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (2.24)$$

$$h_3 = h_6 \quad (2.25)$$

$$x_6 = \frac{h_3 - h_7}{h_8 - h_7} \quad (2.26)$$

Однос масених протока паре (p) и течности (t) за ниско и високо притисни део може се наћи из следећих релација:

$$\dot{m}_{vpp} = x_2 \cdot \dot{m}_{total} = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (2.27)$$

$$\dot{m}_{vpt} = (1 - x_2) \cdot \dot{m}_{total} = \dot{m}_3 = \dot{m}_6 \quad (2.28)$$

$$\dot{m}_{npp} = (1 - x_2) \cdot \dot{m}_{total} \cdot x_6 = \dot{m}_8 \quad (2.29)$$

$$\dot{m}_{npt} = (1 - x_2) \cdot (1 - x_6) \cdot \dot{m}_{total} = \dot{m}_7 \quad (2.30)$$

Ови масени протоци користиће се за израчунавање снаге коју генерише двостепена турбина при експанзији, количине отпадне течности и топлоте која се избацује кроз кондензатор и кроз расхладне торњеве.

Претпоставићемо да се користи двостепена турбина. Ако би радиле две појединачне турбине, анализа која би се спровела за сваку од њих била би иста као код једноступених „flash“ постројења.

Високопритисни део турбине мора бити анализиран према методологији која је коришћена за једноступену турбину, наиме:

$$W_{vpt} = h_4 - h_5 \quad (2.31)$$

$$\eta_{vpt} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \quad (2.32)$$

$$P_{vpt} = \dot{m}_{vpp} \cdot W_{vpt} = x_2 \cdot \dot{m}_{total} \cdot W_{vpt} \quad (2.33)$$

Стварни термодинамички параметри радног флуида на излазу из високопритисног дела турбине мора бити одређен помоћу Баумановог правила [12], и енталпија радног флуида на тој локацији износи:

$$h_5 = \frac{h_4 - A \cdot \left[1 - \frac{h_6}{h_7 - h_6} \right]}{1 + \frac{A}{h_7 - h_6}} \quad (2.34)$$

где је фактор A дефинисан као:

$$A = 0,425 \cdot (h_4 - h_{5s}) \quad (2.35)$$

При анализирању рада овог постројења, морамо повећати масени проток кроз турбину, јер се пари ниског притиска из сепаратора придружује делимично експандирана пара високог притиска (тачка 5). У тачки 5 (сл. 19) пара делимично експандира, док је у тачки 8 пара ниског притиска (засићена пара). На улазу у нископритисну турбину налази се мешавина паре (тачка 9). На основу првог закона термодинамике и закона о очувању масе добијамо две релације за случај двофазне мешавине:

$$\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_8 \cdot h_8 = (\dot{m}_5 + \dot{m}_8) \cdot h_9 \quad (2.36)$$

$$h_9 = \frac{x_2 \cdot h_5 + (1 - x_2) x_6 \cdot h_8}{x_2 + (1 - x_2) x_6} \quad (2.37)$$

Нископритисна турбина може бити анализирана на следећи начин:

$$W_{npt} = h_9 - h_{10} \quad (2.38)$$

$$P_{npt} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10}) \cdot (\dot{m}_5 + \dot{m}_8) \cdot (h_9 - h_{10}) \quad (2.39)$$

$$h_{10} = \frac{h_9 - A \cdot \left[x_9 - \frac{h_{11}}{h_{12} - h_{11}} \right]}{1 + \frac{A}{h_{12} - h_{11}}} \quad (2.40)$$

где је фактор A дефинисан као:

$$A = 0,425 \cdot (h_9 - h_{10s}) \quad (2.41)$$

$$h_{10s} = h_{11} + (h_{12} - h_{11}) \cdot \left[\frac{s_9 - s_{11}}{s_{12} - s_{11}} \right] \quad (2.42)$$

$$\eta_{npt} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10s}} \quad (2.43)$$

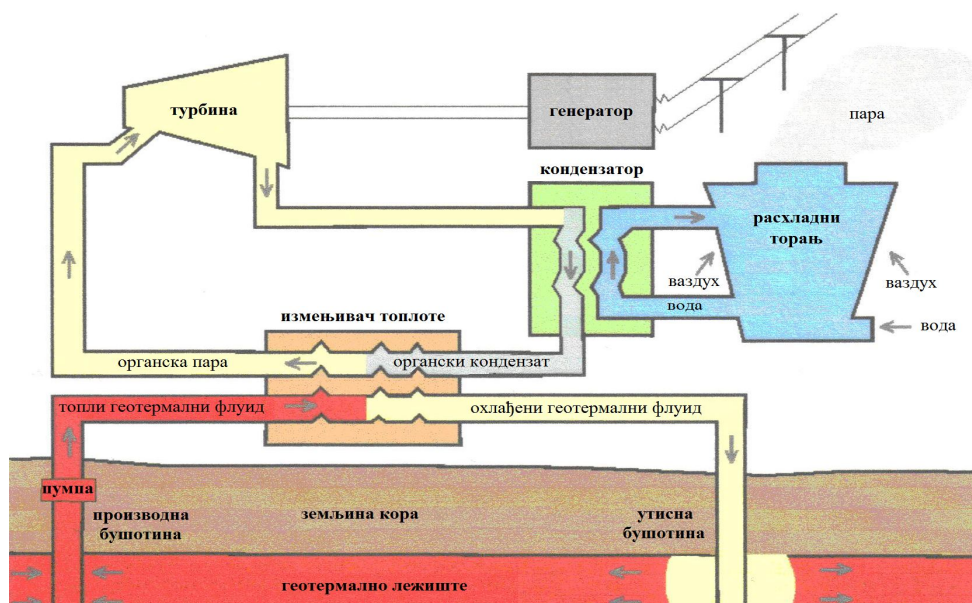
Укупна генерисана снага представља збир снага обе турбине:

$$P_t = P_{npt} + P_{vpt} \quad (2.44)$$

$$P_e = \eta_g \cdot P_t \quad (2.45)$$

2.1.3. ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ БИНАРНИМ ЦИКЛУСОМ

Трећу групу представљају електране које раде на бинарном систему. Оне користе врућу воду нижих температура (100-150°C). Топлотна енергија геотермалне воде користи се за загревање других течности које имају ниже температуре кључања као што су изопентан, изобутан, течни угљендиоксид или раствор амонијака у води. Топла вода у измењивачима топлоте своју топлоту предаје тзв. радном флуиду који прелази у пару и шири се. Та пара затим покреће турбину и генератор. Системи који раде на бинарном циклусу биће у блиској будућности најзаступљенији у геотермалним електранама пошто користе геотермалне воде нижих температура. Резервоара геотермалних вода нижих температура има далеко више него што има резервоара на вишим температурама. Електране које користе бинарни циклус раде у затвореном систему, што значи да нема емисије штетних гасова у атмосферу и након проласка кроз измењивач топлоте вода се враћа натраг у резервоар (сл. 20).



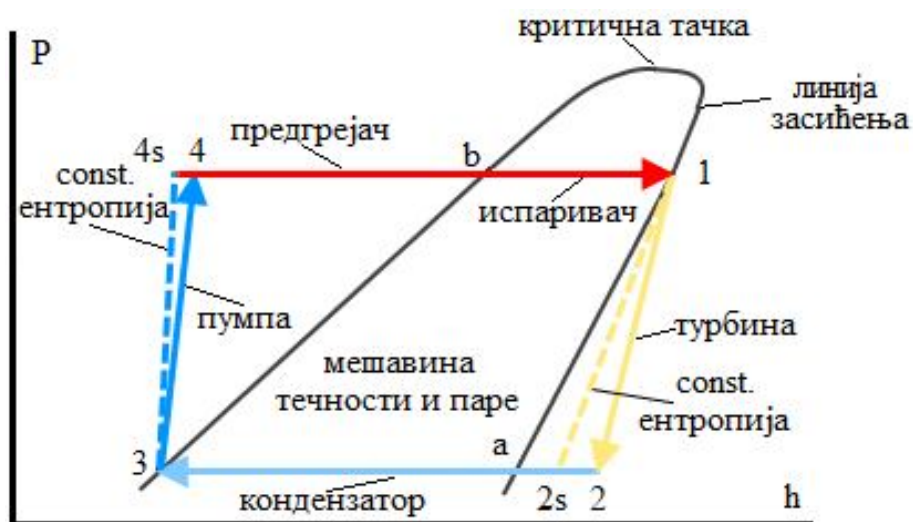
Слика 20: Бинарни циклус за производњу електричне енергије



Слика 21: Постројење са бинарним циклусом Wairakei- Нови Зеланд

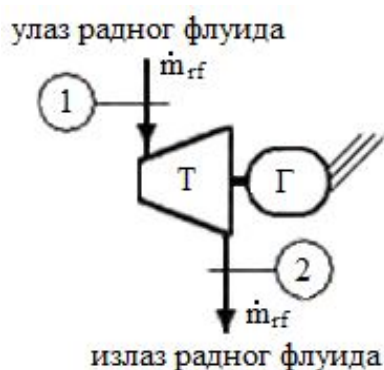
2.1.3.1. Термодинамичке зависности бинарног циклуса

Анализа термодинамичког циклуса код бинарног процеса је прилично једноставна (сл. 22). Почевши од турбине извршено је посебно анализирање свих сегмената постројења (конденз пумпе, кондезатора и измењивача топлоте – предгрејача и испаривача).



Слика 22: Дијаграм p - h за постројење са бинарним циклусом

Анализа турбине



Слика 23: Турбина-генератор у бинарном циклусу

Уз уобичајене претпоставке и занемаривања потенцијалне и кинетичке енергије за адијабатски рад важи следећа релација:

$$P_t = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{rf} \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (2.46)$$

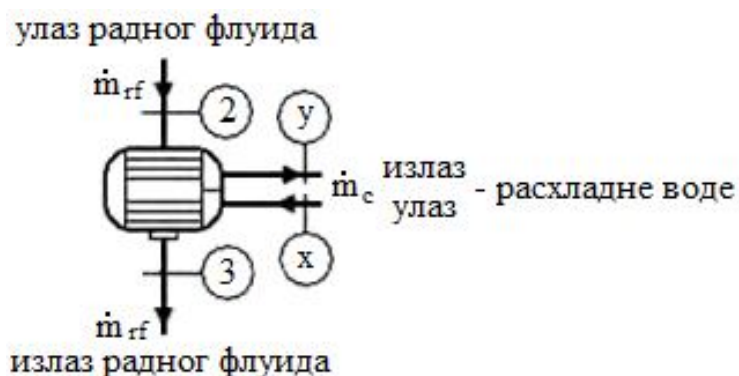
где је:

η_t - позната изентрописка ефикасност турбине,

$\dot{m}_{rf}$ - масени проток радног флуида.

За дати радни флуид, термодинамичке зависности се могу веома лако наћи из табела или корелација за све параметре који су изабрани. Жељена снага турбине на излазу тада ће дефинисати потребан масени проток радног флуида.

Анализа кондезатора



Слика 24: Водом хлађени кондезатор

Количина топлоте коју односи расхладни флуид дефинисана је на следећи начин:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{rf} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2.47)$$

Однос између масеног протока радног флуида и расхладне течности дат је изразом:

$$\dot{m}_c \cdot (h_y - h_x) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2.48)$$

или,

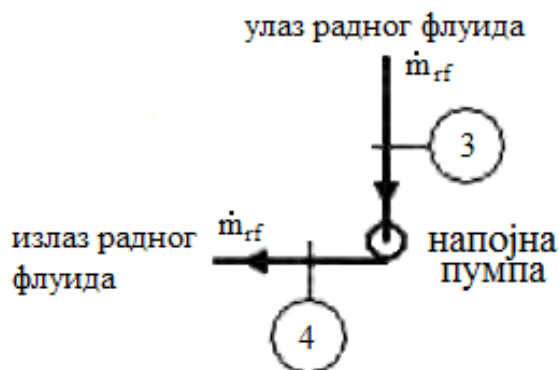
$$\dot{m}_c \cdot \bar{c} \cdot (T_y - T_x) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2.49)$$

где је:

$\bar{c}$ – средња специфична топлота расхладне течности

$\dot{m}_c$ – масени проток расхладне течности

Анализа конденз пумпе



Слика 25: Напојна пумпа

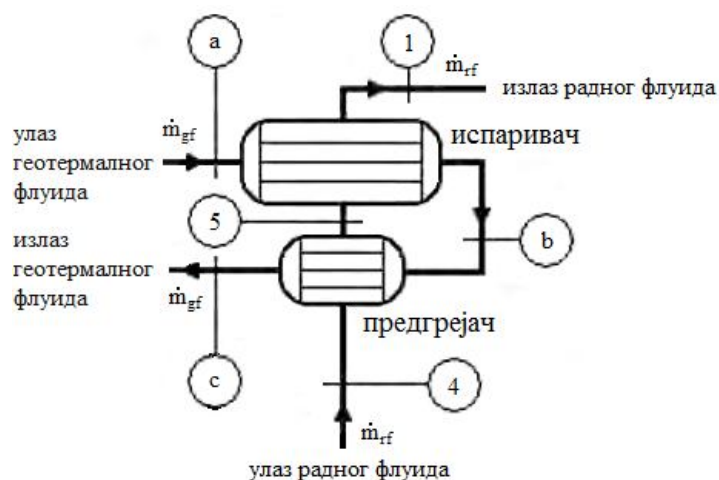
Коришћењем истих зависности као код осталих компоненти, снага конденз пумпе може се дефинисати као:

$$P_{np} = \dot{m}_{rf} \cdot (h_4 - h_3) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_{4s} - h_3) / \eta_{np} \quad (2.50)$$

где је:

η_{np} – изентропска ефикасност напојне пумпе

Анализа измењивача топлоте – предгрејача и испаривача



Слика 26: Измењивачи топлоте - предгрејач и испаривач

За анализирање измењивача топлоте, потребно је претпоставити да се сва топлота преноси са геотермалног флуида на радни флуид, затим да је ток стационаран и да су разлике између потенцијалне и кинетичке енергије на улазу и излазу у измењивач топлоте занемариве. Разматрајући цео термодинамички систем, основна једначина има изглед:

$$\dot{m}_{gf} \cdot (h_a - h_c) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_4) \quad (2.51)$$

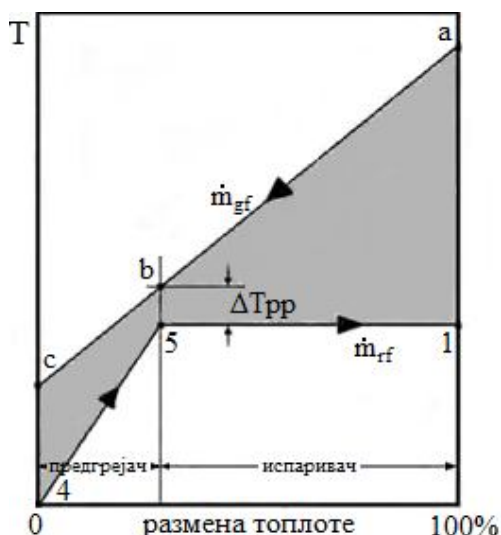
За геотермални флуид који садржи гасове и чврсте честице, лева страна једначине може се заменити средњом специфичном топлотом геотермалног флуида $\bar{c}_{gf}$.

$$\dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_a - T_c) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_4) \quad (2.52)$$

Проток геотермалног флуида за познате параметре бинарног циклуса може се одредити помоћу једначине:

$$\dot{m}_{gf} = \dot{m}_{rf} \cdot \frac{(h_1 - h_4)}{\bar{c}_{gf} \cdot (T_a - T_c)} \quad (2.53)$$

Да би дефинисали измјењивач топлоте мора се знати однос температуре геотермалног флуида и пренешене топлоте који је приказан у $T-q$ дијаграму (сл. 27). На апсциси је дата укупна количина топлоте која се пренесе са геотермалног флуида на радни флуид, приказана процентуално или јединицом kJ/kg радног флуида [12].



Слика 27: Дијаграм размене топлоте у предгрејачу и испаривачу [12]

Предгрејач PH осигурава топлоту за довођење радног флуида у тачку кључања. Испаравање у случају чистог радног флуида се остварује од 5-1 дуж изотерме. Место у измењивачу топлоте где је температурна разлика између геотермалног флуида и радног медија најмања назива се критична тачка (*eng. pinch point*), а вредност те разлике се означава као температурна разлика у критичној тачки, ΔT_{pp} .

Стања у тачкама 4, 5 и 1 су позната из циклуса: стање 4 је компримована течност (на излазу из напојне пумпе), стање 5 је засићена течност при притиску испаривача, и стање 1 је сувозасићена пара (на улазу у турбину).

Ако предгрејач и испаривач анализирамо одвојено, добијамо изразе:

$$\text{предгрејач:} \quad \dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_b - T_c) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_5 - h_4) \quad (2.54)$$

$$\text{испаривач:} \quad \dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_a - T_b) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_5) \quad (2.55)$$

Улазна температура геотермалног флуида T_a је увек позната. Температурна разлика у критичној тачки је позната из спецификације произвођача опреме и на основу тога можемо одредити температуру геотермалног флуида T_b , која има приближну темпе-

ратуру радног флуида T_5 чија је вредност позната. Иако је у теорији критична тачка очекивана на хладном крају предгрејача, то се у пракси никада не догађа.

Површина испаривача којом се врши пренос топлоте између два флуида, A_E , може се одредити помоћу израза:

$$\dot{Q}_E = \bar{U}A_E LMTD|_E \quad (2.56)$$

где су:

$\bar{U}$ - коефицијент укупног прелаза топлоте који се одређује експериментално

$LMTD|_E$ - средња температурна логаритамска ралика која се рачуна изразом:

$$LMTD|_E = \frac{(T_a - T_1) - (T_b - T_5)}{\ln \left[\frac{T_a - T_1}{T_b - T_5} \right]} \quad (2.57)$$

где су:

T_a - температура геотермалног флуида на улазу у испаривач,

T_b - температура геотермалног флуида у критичној тачки,

T_1 - температура радног флуида на излазу из испаривача,

T_5 - температура радног флуида у критичној тачки.

Количина топлоте која се измени у испаривачу дата је једначином:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_a - T_b) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_5) \quad (2.58)$$

На основу релација за испаривач добијамо одговарајуће изразе за прорачун површине предгрејача A_{PH} :

$$\dot{Q}_{PH} = \bar{U}A_{PH} LMTD|_{PH} \quad (2.59)$$

где су:

$\bar{U}$ - коефицијент укупног прелаза топлоте који се одређује експериментално

$LMTD|_{PH}$ - средња температурна логаритамска ралика која се рачуна изразом:

$$LMTD|_{PH} = \frac{(T_b - T_5) - (T_c - T_4)}{\ln \left[\frac{T_b - T_5}{T_c - T_4} \right]} \quad (2.60)$$

где су:

T_b - температура геотермалне расолине у критичној тачки,

T_c - температура геотермалне расолине на излазу из предгрејача,

T_5 - температура радног флуида у критичној тачки,

T_4 - температура радног флуида на улазу у предгрејач.

Количина топлоте која се измени у предгрејачу дат је једначином:

$$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_b - T_c) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_5 - h_4) \quad (2.61)$$

Табелом 4 су дате вредности коефицијента укупног прелаза топлоте $\bar{U}$ између два флуида који се одређује експериментално.

Табела 4: Приказ вредности коефицијента укупног прелаза топлоте између два флуида [12].

флуиди		коефицијент укупног прелаза топлоте $\bar{U}$
1	2	[W/m ² K]
Амонијак (кондензат)	вода	850 - 1400
Пропан или бутан	вода	700 - 765
Расхладно средство (кондензат)	вода	450 - 850
Расхладно средство (пара)	геотермални флуид	170 - 850
Расхладно средство (пара)	вода	170 - 850
Водена пара	гасови	30 - 285
Водена пара	вода	1000 - 3400
Водена пара (кондензат)	вода	1000 - 6000
Вода	ваздух	25 - 50
Вода	геотермални флуид	570 - 1135
Вода	вода	1020 - 1140

Анализа корисности бинарног циклуса

Након што је извршена анализа основних елемената, сада можемо дати коначну термодинамичку анализу бинарног циклуса. На основу првог закона термодинамике термодинамички степен корисности има израз:

$$\eta_{th} = \frac{P_{neto}}{\dot{Q}} = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad (2.62)$$

2.1.3.2. Избор радног флуида бинарног циклуса

Геотермалне електране с бинарним циклусом су, по термодинамичком принципу, најближе термоелектранама на фосилна горива или нуклеарним електранама код којих радни флуид изводи стварни затворени циклус. Радни флуид, одабран према повољним термодинамичким својствима, прима топлоту од геотермалног флуида, испарава, експандира у турбини, кондензује се, те се враћа у испаривач помоћу напојне пуме.

Избор радног флуида има велики утицај у раду бинарног постројења. Постоји велики број радних флуида који се користе у бинарним постројењима али и многа ограничења при избору која се односе на термодинамичка својства, утицај на здравље, безбедност и животну средину.

Термодинамичка својства

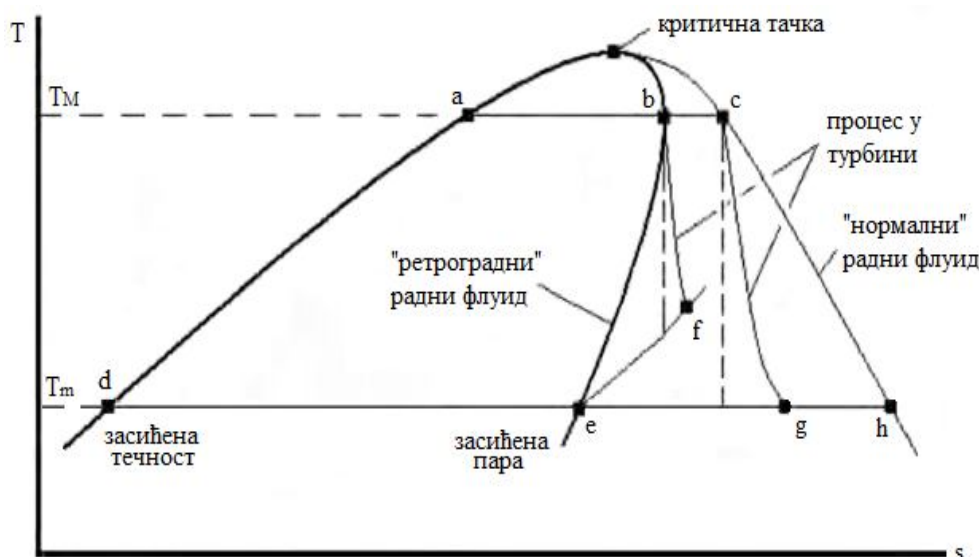
У табели 5 дат је приказ основних термодинамичких карактеристика неких радних флуида, где је ради поређења дата и вода [13]. Из табеле се јасно види да угљоводоници имају критичне температуре и притиске далеко ниже од вредности воде, што им даје предност при избору као радном флуиду код бинарног процеса јер се они користе углавном код нискотемпературних извора. Избор угљоводоника као радног флуида омогућава боље поклапање криве хлађења геотермалне воде и линије грејања-кључања радног флуида, смањујући термодинамичке губитке у измењивачу топлоте.

Такође су проучаване мешавине ових течности за употребу у геотермалним бинарним постројењима. Конкретно, термодинамичка својства 90 % изобутана ($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$) и 10 % изопентана ($i\text{-C}_5\text{H}_{12}$) су одређена од стране Националног бироа за стандарде (претходник NIST) у Вашингтону [14], када је ова мешавина изабрана као радни флуид за демонстрационо бинарно постројење Хебер 1980 год. Мешавина ова два флуида испарава и кондензује се на променљивој температури за разлику од чистих течности које мењају фазу при константној температури.

Табела 5: Термодинамичка својства неких радних флуида бинарних постројења [12].

радни флуид	формула	критична температура T_c [°C]	критичан притисак P_c [MPa]	притисак ентропије при 300 K P_s [MPa]	притисак ентропије при 400 K P_s [MPa]
Propan	C_3H_8	96,95	4,236	0,9935	n.a.
i-butan	i- C_4H_{10}	135,92	3,685	0,3727	3,204
n-butan	C_4H_{10}	150,8	3,718	0,2559	2,488
i-pentan	i- C_5H_{12}	187,8	3,409	0,09759	1,238
n-pentan	C_5H_{12}	193,9	3,240	0,07376	1,036
амонијак	NH_3	133,65	11,627	1,061	10,3
вода	H_2O	374,14	22,089	0,003536	0,24559

Друга важна карактеристика која се узима у обзир при одабиру мешавине радног флуида јесте облик криве засићене паре која је дата у T-s дијаграму приказаном на слици 28. Ова крива за воду (приказана као танка линија) има свуда негативан нагиб док поједини угљоводоници и расхладне течности имају позитиван нагиб линије засићења. То значи да постоји локални минимум ентропије при неким ниским температурама T_m , и локални максимум ентропије на високим температурама T_M . „Ретроградне“ течности укључују бутан (n-butan), изобутан (i-butan), пентан (n-pentan) и изопентан (iso-pentan). Ови флуиди испољавају ретроградно понашање на температурама које су дате табелом 6.



Слика 28: T-s дијаграм разлике криве засићене паре „нормалног“ и „ретроградног“ радног флуида

Пошто је температура T_m нижа од било које температуре која се сусреће у бинарним геотермалним постројењима, узима се да ове течности имају линију засићене паре као што је приказано на слици 28.

Табела 6: Температуре на којима угљоводоници испољавају ретроградно понашање [12].

радни флуид	формула	температура	
		T_m	T_M
i-butan	i-C ₄ H ₁₀	-3	117
n-butan	C ₄ H ₁₀	-3	127
i-pentan	i-C ₅ H ₁₂	-3	177
n-pentan	C ₅ H ₁₂	-3	177

У једну руку, флуиди као што је вода захтевају значајно прегревање, тзв. „проширење“ изобаре $a-b-c$ респективно, да би се избегла влажност на излазу из турбине, тачка g . С друге стране, ретроградне течности врше експанзију у турбини од стања засићене паре до прегрејане паре, процес $b-f$. Тиме је показано [15] да је могуће покретање надкритичног циклуса у коме вредности параметара паре на улазу у турбину леже иза критичне тачке, а линија експанзије лежи унутар влажног подручја процеса прелазећи у подручје прегрејане паре чиме се повећава ефикасност.

Брзина звука и величина турбине

Према првој апроксимацији, величина турбине одређује њену цену. Масени проток на излазу из турбине може се изразити као производ густине радног флуида, попречног пресека и брзине протока:

$$\dot{m}_{rf} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.63)$$

Масени проток такође може бити изражен као:

$$\dot{m}_{rf} = \frac{P_t}{W_t} = \frac{P_t}{(h_1 - h_2)} \quad (2.64)$$

Површина излаза из турбине може се наћи из једначине:

$$A = \frac{P_t}{(h_1 - h_2)} \cdot \frac{v_2}{Ka_2} \quad (2.65)$$

где је:

P_t - снага турбине,

h_1 - енталпија на улазу у турбину,

h_2 - енталпија на излазу из турбине,

v_2 - специфична запремина,

Ka_2 - Брзина радног флуида, где K представља коефицијент који узима у обзир масу делића радног флуида и a_2 брзину звука радног флуида на излазу из турбине. Према дефиницији, брзина звука стишљивог медија се рачуна као:

$$a = \left[\frac{dP}{d\rho} \right]_{s=const.}^{1/2} \quad (2.66)$$

Брзина звука се може одредити (приближити) из таблица и графика коришћењем коначних разлика:

$$a = \left[\frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right]_{s=const.}^{1/2} = \left[\frac{\Delta P}{\Delta \left(\frac{1}{v} \right)} \right]_{s=const.}^{1/2} \quad (2.67)$$

Упоредјујући радне флуиде који имају исту брзину звука на излазу из турбине за турбине исте снаге, а према односу попречног пресека турбине на излазу, добијамо да се за амонијак користи турбина најмање величине у односу на радне флуиде који се упоређују.

Табелом 7 приказани су резултати користећи напред наведени приступ. Сличну анализу су спровели Милора и Тестер [16], користећи различиту методологију укључујући Законе држава у којима се користи, и њихови резултати су табеларно приказани ради упоређивања.

Табела 7: Поређење величине турбине за радне флуиде⁽¹⁾

радни флуид	формула	моларна маса	релативна излазна површина ⁽²⁾
амонијак	NH ₃	17,03	1,0 (1,0)
propan	C ₃ H ₈	44,09	2,3 (1,9)
i-butan	i-C ₄ H ₁₀	58,12	4,1 (4,9)
n-butan	C ₄ H ₁₀	58,12	5,5 (6,3)
i-pentan	i-C ₅ H ₁₂	72,15	12,2 (-)
n-pentan	C ₅ H ₁₂	72,15	14,6 (-)

(1) Температура на улазу у турбину = 400 К, засићене, осим прегрејане паре амонијака и пропана;
 (2) Температура кондензације = 320 К. Бројеви у заградама су резултати истраживања Милора и Тестера

Здравље, безбедност и питање животне средине

Коначно, заштита животне средине, безбедност и здравље морају се узети у обзир при одабиру радног флуида. Ово подразумева запаљивост, токсичност, потенцијално оштећење озонског омотача (енг. *ozone depletion potential* - *ODP*) и потенцијално глобално загревање (енг. *global warming potential* - *GWP*). Табелом 8 приказане су особине радних флуида који су дати табелом 4, али су додата два хлорофлуороугљеника као могући радни флуиди.

Табела 8: Својства радних флуида и њихов утицај на животну средину и здравље

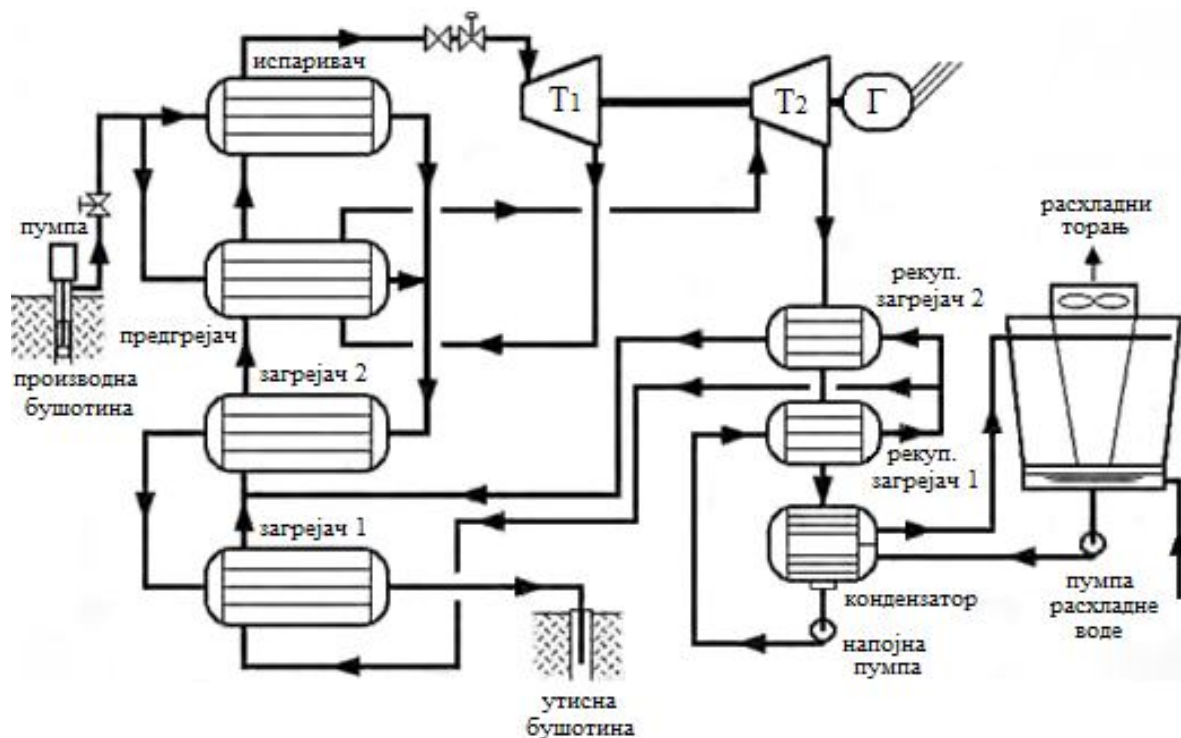
радни флуид	формула	токсичност	запаљивост	ODP	GWP
R-12	CCl ₂ F ₂	не	не	1,0	4,500
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	не	не	0,7	5,850
propan	C ₃ H ₈	ниска	веома висока	0	3
i-butan	i-C ₄ H ₁₀	ниска	веома висока	0	3
n-butan	C ₄ H ₁₀	ниска	веома висока	0	3
i-pentan	i-C ₅ H ₁₂	ниска	веома висока	0	3
n-pentan	C ₅ H ₁₂	ниска	веома висока	0	3
амонијак	NH ₃	токсичан	нижа	0	0
вода	H ₂ O	не	не	0	-

Потенционално оштећење озонског омотача (*ODP*), је нормално 1,0 за расхладне радне флуиде R-11 и R-12 који су најгори у том погледу. Потенционално глобално загревање (*GWP*), је нормално 1,0 за угљен диоксид. Захваљујући веома високим *ODP* и *GWP* употреба R-12 и R-114 је забрањена амандманом из Копенхагена (1994) на протокол из Монреаља (потписан 1987, ступио на снагу 1989. године). Јединствено бинарно постројење у Паратунки у Русији инсталисано 1967. године користило је R-12 као радни флуид.

Допринос угљоводоника глобалном загревању остварује се кроз угљен диоксид који је нуспродукт распадања угљоводоника. Сви угљоводоници су изузетно запаљиви и захтевају одговарајућу противпожарну заштиту која није уобичајена за остала постројења.

2.1.3.3. Калина бинарни циклус

Мешавина воде и амонијака се користила од раније у апсорпционим расхладним циклусима, али је руски инжењер А. Калин патентирао 1980. године ову мешавину као радни флуид и у циклусу производње електричне енергије. Шематски приказ типичног Калина циклуса, KLC - 12, дат је на слици 29.

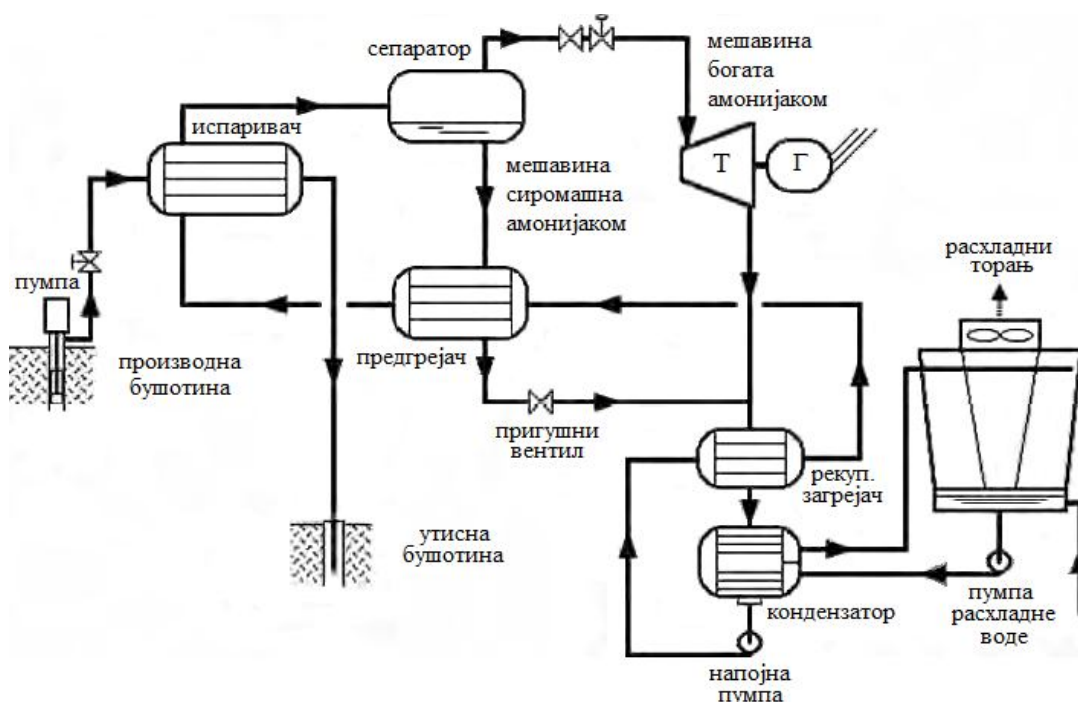


Слика 29: Типичан Калина циклус KLC - 12

Постоји неколико верзија Калина циклуса а најсложеније постројење има дестилациону колону која се користи за добијање мешавине различитог односа. Разлике у односу на класичан бинарни циклус су следеће:

- Радни флуид је мешавина воде (H_2O) и амонијака (NH_3),
- Променљиве температуре испаравања и кондензације,
- Циклус укључује размену топлоте радног флуида на излазу из турбине и радног флуида из кондензатора у рекуперативном загрејачу,
- Однос мешавине радног флуида у неким верзијама циклуса може бити променљив.

На основу горе наведеног, Калина циклус има побољшане термодинамичке карактеристике измењивача топлоте што је постигнуто смањењем губитка при размени топлоте због разлика температуре. Измењивачи су конструисани тако да се остварује бољи контакт геотермалног флуида и радног флуида на хладном крају процеса размене топлоте где су побошања очувања ексергије највреднија.



Слика 30: Калина циклус са променљивим саставом радног флуида вода-амонијак

Предгрејач је потребан зато што мешавина воде и амонијака има нормалну линију zasiћења па долази до експанзије мешавине влажне паре у турбини. Блим и Мајнс [17], су показали да Калина циклус, дат сликом 29, има 25% више размене топлоте.

Предност коришћења рекуперативног загрејача је у смањењу количине топлоте која долази у кондензатор односно расхладни торањ. Мањи инвестициони трошкови за мањи кондензатор и расхладни торањ надокнадиће се ценом рекуперативног предгрејача а у дужем временском периоду већа ефикасност резултираће смањењем трошкова производње.

Сепаратор омогућава да сувозасићена пара богата амонијаком одлази у турбину док слаб раствор, течност богата водом одлази у предгрејач. Након тога се пригушује вентилом до притиска који има радни флуид на излазу из турбине, да би се извршило мешање са богатим раствором, због успостављања примарног односа мешавине воде и амонијака. Мешавина се одводи у рекуперативни загрејач где се се потпуно кондензује.

Могући недостаци Калина циклуса су исти за све циклусе који теже високој ефикасности, а то је одржавање мале температурне разлике у размењивачу топлоте. Поред овога, у току рада електране Хусавик на Исланду, уочени су недостаци који се јављају искључиво због коришћења Калина циклуса, а то су:

1. Амонијак је штетан по здравље људи и животну околину,
2. Експанзија у турбини с мешавином амонијака и воде одвија се у подручју влажне паре, па је на тај начин присутна интензивна ерозија лопатица капљицама,
3. Мешавина амонијака и воде није компатибилна с уљем, па се код турбине не може користити унутрашње улежиштење што компликује конструкцију,
4. Пошто је мешавина амонијака и воде корозијски јако агресивна постоји потреба за скупим нерђајућим челицима јер у противном је присутна интензивна корозија што може довести и до великих пропуштања у околину штетног радног флуида,
5. Употребом мешавине амонијака и воде постоји опасности од кавитације у конденз пумпама.

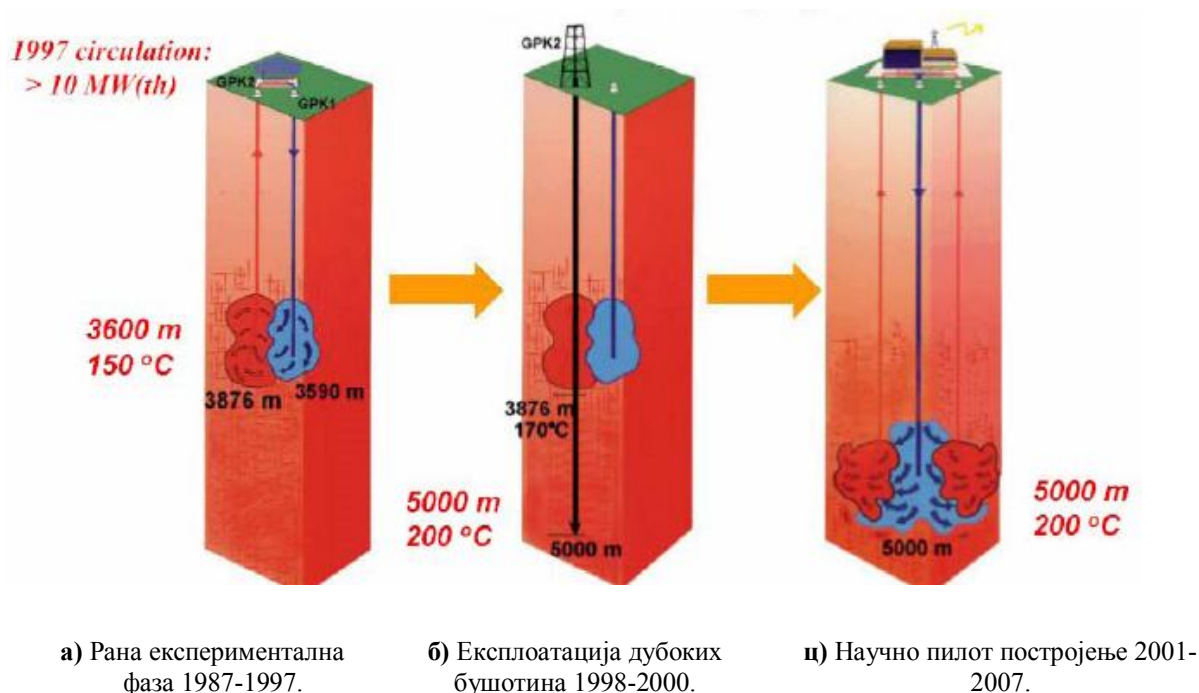


Слика 31: Бинарна геотермална електрана са Калина циклусом
Húsavík снаге 2 MW на Исланду

2.1.4. НОВА РЕШЕЊА ЗА ДОБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Једно од новијих решења је и концепт за коришћење геотермалне енергије применом „*hot dry rock*“ технологије. Основни задатак је да се направи вештачки геотермални резервоар бушењем два дубока бунара у стени, а потом се формира систем за размену топлоте хидрауличком или експлозивном фрактуром тј. да се оствари вештачко прављење пукотина („*Fracturing*“) на великој дубини чиме се ствара површина на којој ће се вршити размена топлоте. Вода се под високим притиском упумпава у стене тј. Формирани резервоар који загрева воду на око 200°C, а затим се пумпама доводи кроз бушотину до постројења где се даље одвија процес претварања топлотне енергије у електричну неким од претходно поменутих начина.

На слици 32. дат је шематски приказ једног оваквог Европског тест - постројења у Soultz sous Forêts- у (40 km северно од Стразбура).

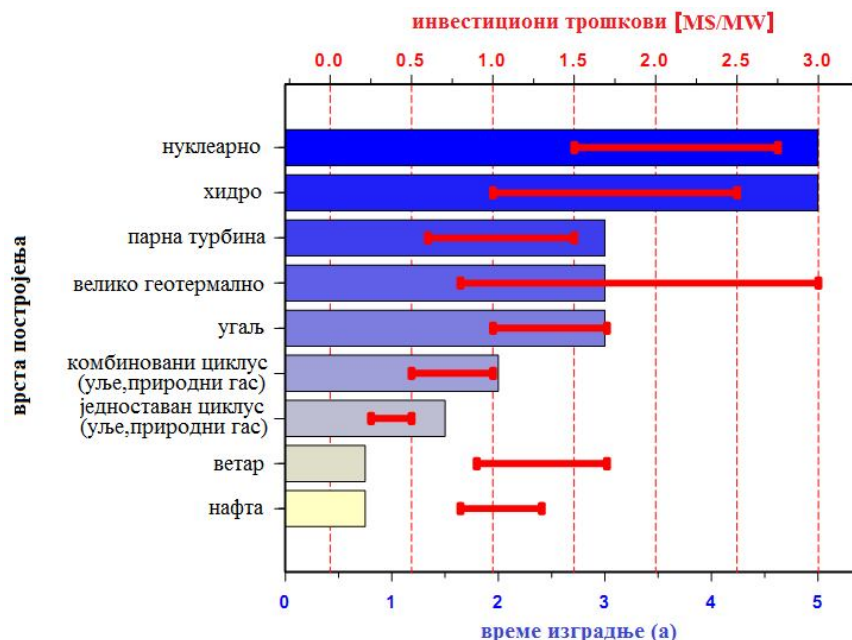


Слика 32: „Hot dry rock“ постројења у Soultz sous Forêts - у

Највећи проценат инсталираних капацитета данас у свету је са „flash“ технологијом (64%). Следеће су електране на суву пару (28%), и на крају су постројења са бинарним системом (8%).

3. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА

При изградњи геотермалне електране потребна су релативно велика улагања али су са друге стране трошкови одржавања јако мали. Инвестициона улагања су велика првенствено због скупе израде бушотина, за чију израду је према проценама потребно издвојити око 20% од целокупне инвестиције, и проналажења нових геотермалних извора која су условљена инвестиционим ризиком почетних истраживања и доказивања карактеристика лежишта. Међутим, када се електрана изгради трошкови значајно опадају јер је ресурс стално доступан а и производња електричне енергије је стимулисана од стране државе [18]. Трошкови одржавања су одраз степена искоришћења капацитета, величине улагања и облика енергије која се производи на геотермалном лежишту. У случају електрана на фосилна горива инвестицијски трошак је мањи, али су трошкови погона и горива већи у односу на геотермалне електране. Углавном је за развој нових геотермалних поља потребно време од три године, што је и даље мање од просечног времена за изградњу једне електране која користи конвенционална горива.



Слика 33: Кључ у руке инвестиција у USD (црвено) и просечно време потребно за изградњу електране (плаво) прма врсти енергије [11].

У подручјима где су на располагању хидротермални ресурси високе температуре, у многим случајевима геотермално постројење је конкурентно новоизграђеном конвенционалном постројењу. Бинарна постројења могу према трошковима бити конкурента у неким случајевима, али трошкови се разликују у зависности од величине постројења, температуре ресурса и географског положаја. Трошкови ЕГС (eng. Enhanced geothermal System – побољшани геотермални систем) још увек не могу бити одређени прецизно јер је искуство ограничено само на основу изведеног пилот постројење при чему економска страна није имала важност.

Инвестициони трошкови

Трошкови развоја геотермалне електране значајно зависе од широког спектра услова, укључујући температуру и притисак ресурса, дубину резервоара и пропустљивост, хемију флуида, локацију, тржиште бушења, величину развоја, број и врсту постројења (сува пара, „флеш“, бинарна или хибрид), и да ли је пројекат гринфилд локација или проширење постојећег постројења. На трошкове развоја такође утичу цене роба, као што су цене нафте, челика и цемента. У 2008. години инвестициони трошкови гринфилд геотермалне електране кретали су се од 2 000 до 4 000 USD/kW_e за „флеш“ постројења и 2 400 до 5 900 USD/kW_e за бинарна. Највећи инвестициони трошкови за мала бинарна постројења (неколико MW_e), су у Европи. Улагања у ЕГС је немогуће проценити јер су у експерименталној фази [7].

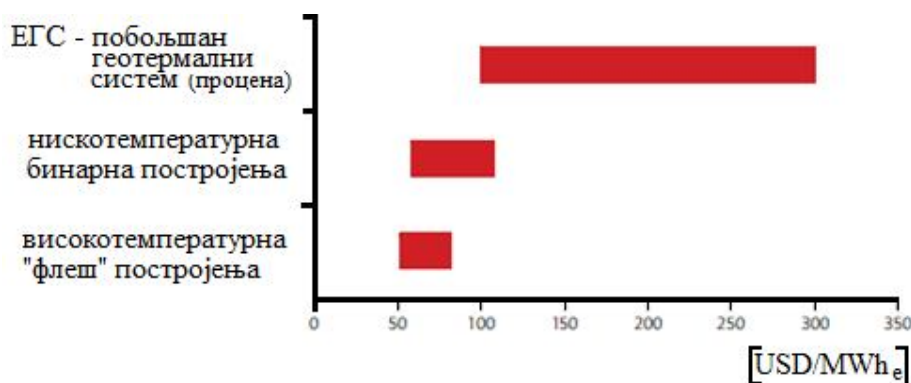
Трошкови експлоатације и одржавања

Трошкови експлоатације и одржавања геотермалних електране су ограничени јер не захтевају гориво. Типични трошкови зависе од локације и величине објекта, врсте и броја постројења, и коришћења даљинског управљања системом, и крећу се од 9 USD /MW_e (велика флеш, бинарна постројења на Новом Зеланду) до 25 USD/MW_e (мала бинарна постројења у САД), без трошкова израде нове бушотине. Одржавање бушотина се сматра као део трошкова рада и одржавања, што је и уобичајено за геотермална постројења. Просечни трошкови у свету се процењују на 19 до 24 USD/MW_e , док су трошкови на Новом Зеланду и нижи, од USD 10/MW_e до 14 USD/MW_e [7].

Трошкови производње

У просеку, трошкови производње електричне енергије геотермалним „блиц“ постројењем високе температуре рачуна се да су у распону од 50 до 80 USD/MW_e . Трошкови производње геотермалним бинарним постројењем варира у просеку од 60 до 110 USD/MW_e . Трошкови производње фабриком нове генерације на Новом Зеланду су веома конкурентни чак и без субвенција, и крећу се од 50 до 70 USD/MW_e када су познате високе температуре ресурса. Нека бинарна постројења имају значајно веће

Трошкове, па нова гринфилд постројења могу имати трошкове чак и 120 USD/MWh_e у САД и 200 USD/MWh_e у Европи, за мала постројења и ниже температуре ресурса. Процењени трошкови производње ЕГС развоја су у распону од 100 USD/MWh_e (за 300°C ресурса на 4 km дубине) до 190 USD/MWh_e (150°C ресурс на 5 km) у Сједињеним Америчким Државама, а у Европи процене су од 250 USD/MWh_e до 300 USD/MWh_e [7].



Слика 34: Трошкови производње електричне енергије од геотермалне [7].

На висину инвестиционих трошкова утицај има и квалитет извора, односно температура, пропустљивости и садржај гасова. Према поменутиим факторима имамо: високо, средње и ниско квалитетни извор.

Висококвалитетни извор је извор температуре веће од 250°C с високом пропустљивошћу и ниским садржајем гасова. Средње квалитетни извор је извор геотермалне воде са температуром између 150-250°C, са средњом пропустљивошћу и релативно ниским садржајем гасова. Нискоквалитетни извор је извор температуре мање од 150°C. Инвестициони трошкови су мањи што је електрана веће снаге, исто тако што је температура извора већа то су инвестициони трошкови већи. Зато се код истраживања геотермалних лежишта ако је температура мала, ради већи број бушотина да би се повећала снага геотермалне електране и смањили инвестициони трошкови.

Поред већ поменутих трошкова који чине део директних инвестиционих трошкова, постоје и индиректни инвестициони трошкови. Они зависе од положаја електране, од власништва земљишта и од искористивости бушотине. Постоје три типа електрана по висини индиректних трошкова, и то су:

-локација А, индиректни трошкови су 5-10% директног трошка, лежиште се налази у развијеној земљи, у близини великог града, постоји инфраструктура и људски кадар за рад,

- локација Б , индиректни трошкови су 10-30% директног трошка, лежиште се налази у неразвијеној земљи са добром инфраструктуром и постојећим људским кадром, у близини насељеног места, или у развијеној земљи на доста ненасељеном месту без инфраструктуре,

-локација Ц, индиректни трошкови су 30-60%, директног трошка, лежиште је на удаљеном месту у земљи у развоју, не постоји инфраструктурна повезаност и нема оспособљене радне снаге.

3.1. ДЕТАЉНА ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА

Укупни трошкови изградње геотермалне електране се састоје од две целине, и то: трошкова инвестиционих улагања, и трошкова експлоатације и одржавања електране. Трошкови инвестиционих улагања укључују закупљивање земљишта, све потребне дозволе, испитивања, потврду налажења геотермалне воде, експлоатацију. Инвестициони трошкови се разликују од налазишта до налазишта и у великој мери зависе од температуре извора, дубине бушотине, притиска бушотине, хемијског састава воде. Трошкови експлоатације и одржавања електране су сви трошкови које је потребно имати да би електрана могла нормално да ради, и такође зависе од карактеристика лежишта.

3.1.1. ИНВЕСТИЦИОНИ ТРОШКОВИ

Инвестициони трошкови могу достићи до 65% укупних трошкова геотермалне електране. Геотермално лежиште има неколико фаза које утичу на инвестиционе трошкове. Прва је да се тачно одреди где има геотермалне воде (фаза истраживања), друга фаза је потврда могућности производње енергије (фаза потврђивања) и трећа фаза је изградња електране и припадајућих структура (фаза развоја).

3.1.1.1. Истраживачка фаза (*exploration phase*)

Обухвата потрагу за локацијама геотермалних лежишта која могу омогућити довољну количину енергије за рад електране. Почиње са разним геолошким студијама геотермалног поља, а завршава кад се открије економски исплатива геотермална бушотина. Ова фаза се може се поделити на три дела:

Регионално претраживање (*regional reconnaissance*) - фокусирање на регију која има добар геотермални потенцијал. Укључује геотермалне студије, анализе геолошких података и геохемијска истраживања за још прецизније утврђивање потенцијала лежишта.

Подручна експлоатација (*disrict exploration*) - примењује се на мања подручја како би се још прецизније утврдили параметри геотермалног лежишта. Главни чиниоци овог дела пројекта су геофизичке студије и бушотине за израчунавање температурног градијента. У овој фази највећи издатак је бушење бушотина за проверу температуре и продуктивност капацитета, али то је једини начин на који можемо са сигурношћу утврдити исплативост геотермалног поља.

Процена перспективности лежишта (*prospect evaluation*) - тражи се место на геотермалном пољу које има најбоље температурне карактеристике и најбољи проток. Бушотине које се раде за време ове фазе имају око 25% изгледа да ће бити економски исплативе и да ће остати у употреби.

3.1.1.2. Фаза потврђивања (*confirmation phase*)

Фаза потврђивања садржи додатна бушења производних бушотина, и тестирања протока геотермалног флуида, све док се не утврди отприлике 25% потребних ресурса за производњу. Такође је укључено и бушење утисних бушотина или бушотина где ће се геотермални флуид одлагати након проласка кроз електрану. Сви трошкови зависе од брзине утврђивања потенцијала геотермалног поља и потврђивања његове искористивости. Сваки застој у бушењу или добијању дозвола може значајно повећати укупне трошкове ових почетних фаза.

3.1.1.3. Фаза развоја (*tehnical – technological site development*)

Ова фаза садржи све остале трошкове до почетка рада електране. Укључује дизајн електране, избор најприкладнијих технологија, бушење и тестирање све док нису испуњени сви захтеви дати пројектом, конструкцију електране, опремање електране и спајање електране на мрежу.

Бушење (*drilling*) - најважнији и најскупљи део израде геотермалне електране. На цену бушења утичу разни параметри попут дубине бушотине, формације стена, брзине бушења, пречник бушотине, време предвиђено за бушење и хемијски састав воде који одређује коју опрему смо смо користити.

Дозволе (*project permitting*) - као и свако градилиште и геотермално лежиште мора удовољавати многим конструкцијским и еколошким законима и дозволама.

Систем за скупљање флуида (*fluid gathering system*) - скуп цеви и вентила које обухватају и продукцијске и утисне бушотине. Цена овог дела електране зависи од дужине цеви, притиску геотермалног флуида и хемијском саставу флуида. Цене се одређују према сантиметру ширине и метру дужине цеви. На добијени износ укључују се цене вентила, инструмената и средстава за прикупљање података.

3.1.2. ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗГРАДЊА ЕЛЕКТРАНЕ

Пројектовање електране је врло сложен посао, јер се том приликом настоји да се што више смање трошкови конструисања, експлоатисања и одржавања електране. Пројекат одређује величину електране, најповољније материјале за израду и најповољнији одабир процеса који ће се користити за производњу електричне енергије.

3.1.2.1. Утицај карактеристика лежишта на избор технологија и трошкове електране

Температура лежишта је кључан фактор при прорачуну трошкова и одабиру опреме електране. Што је температура лежишта већа, ефикасност целог процеса је већа, а то значи значајно опадање трошкова. Упркос томе што је бинарна електрана сложенија и скупља за изградњу, пуно је јефтинија ако температура геотермалног флуида не прелази 180°C. Оптимална ефикасност је уједно и функција садржане енергије и притиска геотермалног флуида.

Хемијски састав геотермалног флуида је још један јако важан параметар при одабиру опреме. Овом приликом се углавном гледа на четири најважније ставке: фактор стварања каменца, корозивност, не кондензацијске гасове и део сумпорног хидроксида (H₂S). Сваки од ових фактора може додатно утицати на одабир опреме захтевајући неке додатне специфичне компоненте.

3.1.2.2. Утицај карактеристика локације на избор технологија

Најважније за овај део су временски и географски услови на локацији електране јер имамо два начина хлађења: водено и ваздушно хлађење. Од температуре на локацији и од доступности речних токова ће зависити који ће тип бити одабран. Водено хлађење се сматра јефтинијим за изградњу када постоји једноставан прилаз сталном воденом току. Код хлађења ваздухом највећи значај има температурна разлика и количина влаге у ваздуху. Зато се такво хлађење примењује само у сувим подручјима где немамо сталних водотокова, али тада треба узети у обзир да ће бити доста велике дневна варирања излазне снаге електране. Оперативни трошкови за ваздушно хлађење углавном се односе на паразитске трошкове снаге за снагу мотора који удувавају ваздух у кондензаторе. Ти трошкови су већи од трошкова проточних водених пумпи при воденом хлађењу. Међутим, код ваздушног хлађења је много једноставније одржавање јер водене пумпе треба редовно чистити од алги и накупљеног каменца. Због тога је јако тешко одредити колики су трошкови појединог система али се може рећи да је систем хлађења ваздухом током животног периода јефтинији од система хлађења водом.

3.1.2.3. Изградња преносне мреже

Код изградње електране углавном треба изградити и целу електричну мрежу која спаја електрану на постојећу мрежу. Трошкови зависе од дужине прикључне мреже и конфигурације терена. Укупна цена мреже зависи и од величине електране, 100 MW електрана ће имати 10 пута ниже трошкове преносне мреже него електрана од 10 MW.

3.1.2.4. Капитални трошкови (*economies of scale*)

Ова ставка може значајно повећати специфичне трошкове неких компоненти. Инвестициони трошкови електрана између 5 до 150 MWe могу се израчунати по формули:

$$CC = 2500 \cdot e^{-0,0025 \cdot (P-5)} \quad (3.1)$$

где је:

CC - капитални трошак,

P - снага електране.

Капитални трошкови се највише односи на радове који су важни за пројекат (копања, изградња прилазних путева, довод струје, довод телефонске линије) због тога што су углавном геотермалне локације на местима где инфраструктура није изграђена. Веће електране су много ефикасније термодинамички, а то произилази из много бољег дизајна и пројекта, а тиме су и у коначном сумирању јефтиније.

3.1.2.5. Остали трошкови везани уз развој електране

Остали трошкови могу проузроковати трошкове који су повезани са развојем и финансијама. Углавном су ти трошкови око 6-10% од укупних трошкова електране. Друга важна ставка осталих трошкова су финансијске накнаде потребне за скупљање капитала за финансирање пројекта и провизија. Уз то мора се водити рачуна да се амортизују и додатни непредвиђени трошкови који се могу попети до 10% укупних буџетских трошкова. Када се гледају трошкови, јефтиније је изнајмљивати земљу на којој је електрана него је купити, тако да се ти трошкови радије сврставају у трошкове експлоатације и одржавања, него у инвестиционе трошкове. Наравно да треба направити јасну границу између права коришћења површинске земље која се изнајмљује, и права на минерална добра и геотермални флуид испод површине. Трошкови радне снаге се процењују на 41% укупних трошкова пројекта, док се трошкови материјала процењују на 40%, а осталих 19% отпада на остале трошкове.

4. ПРИМЕР БИНАРНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕЛЕКТРАНЕ У ВРАЊСКОЈ БАЊИ

У Србији постоји мало средњетемпературних геотермалних извора помоћу којих је могућа производња електричне енергије. Једно од најперспективнијих локација се налази у Врањској Бањи. У близини геотермалних извора се налазе угашени вулкани Грот и Облик чије су последње ерупције биле пре више од пет милиона година. Преглед карактеристика свих извора на овом подручју је дат табелом 9.

Табела 9: Преглед карактеристика извора [19].

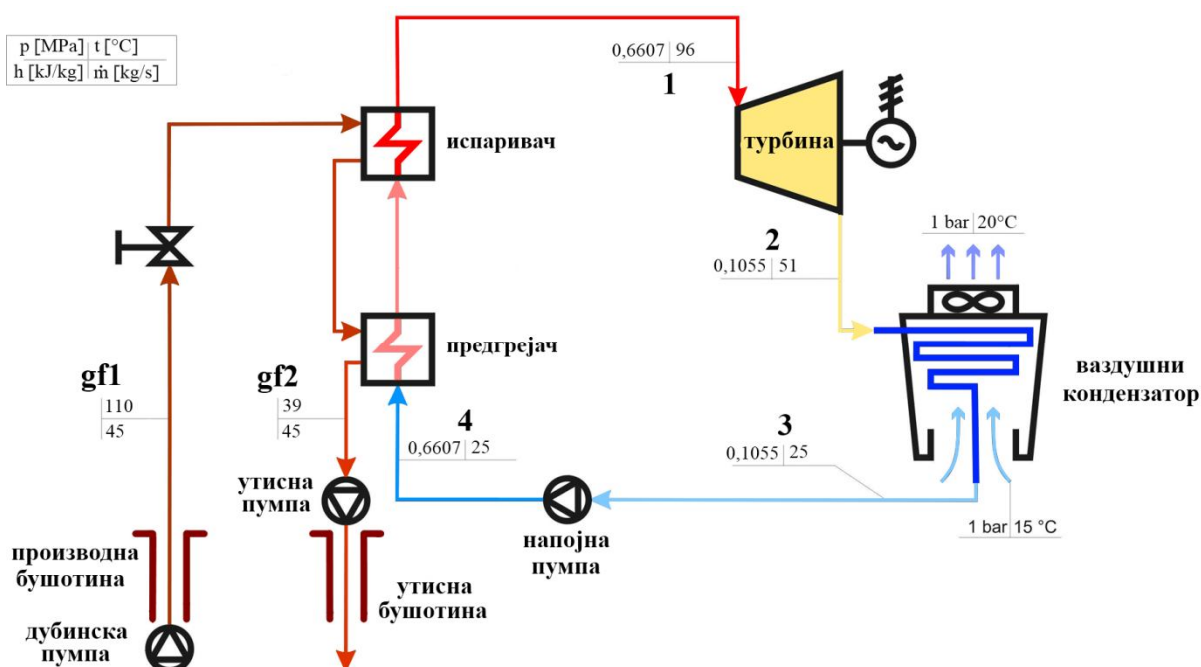
Б.бр.	Назив извора	Количина воде [l/s]	Дубина [m]	Температура [°C]
1.	Горњи извор	1,2	-	78
2.	Б1 Б	2,0	26	92
3.	А1	0,5	25	91
4.	ВГ2	26,0	1.063	110
5.	А3	2,1	20	91
6.	Б2	1,0	7	96
7.	Б1	1,5	12	87
8.	Сабирни канал	70,0	905	84
9.	А2	1,0	25	84
10.	ВГ3	21,0	1.603	98
УКУПНО		126,3	средња	96

Слика 35: Врањска Бања



Слика 36: Геотермални извор у Врањској Бањи

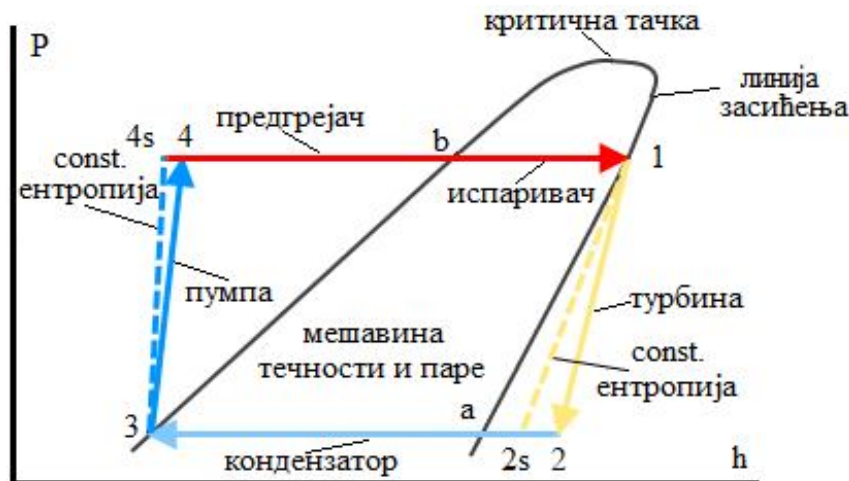
За проучавање могућности примене геотермалне електране у Врањској Бањи усвојено је да температура геотермалне воде (расолине) на производној бушотини износи $t_{gf1} = 110^{\circ}\text{C}$ (383 K), са протоком $\dot{Q} = 50\text{ l/s}$ који уз густину од око 900 kg/m^3 даје масени проток $\dot{m}_{gf} = 45\text{ kg/s}$. Геотермални флуид (расолина) предаје топлоту за потребе електране хладећи се до температуре $t_{gf2} = 39^{\circ}\text{C}$ (312 K). Преостала топлота геотермалног флуида (расолине) се враћа у утисну бушотину. Узимајући у обзир температуру геотермалне расолине, применљива је геотермална електрана с бинарним циклусом - органским Ранкиновим циклусом. Као радни флуид ОРЦ-а користиће се лако испариви угљоводоник, изопентан C_5H_{12} . Температура радног флуида у стању сувозасићене паре на улазу у турбину износи $t_{rf1} = 96^{\circ}\text{C}$ (369 K) док је максимални притисак $p_1 = 0,66074\text{ MPa}$. Експанзија паре у турбини у потпуности се обавља у прегрејаном подручју. Након експанзије у турбини температура радног флуида се снижава на $t_{rf2} = 51^{\circ}\text{C}$ (324 K) док је притисак пао на минимални $p_2 = 0,1055\text{ MPa}$. Пролазећи кроз ваздушни кондезатор долази до хлађења радног флуида чиме му се температура снижава на минималу $t_{rf3} = 25^{\circ}\text{C}$ (298 K) при чему притисак остаје исти. Претпоставља се да је унутрашња (изентропска) корисност турбине $\eta_t = 0,85$. За механички степен корисности турбине усваја се $\eta_{meh} = 0,97$, као и степен корисности генератора $\eta_g = 0,98$. Унутрашња (изентропска) корисност пумпе износи $\eta_{np} = 0,8$. Просечна вредност специфичне топлоте геотермалне расолине је $\bar{c}_{gf} = 4,224\text{ kJ/kgK}$. Термодинамичком анализом одредиће се термодинамички степен корисности циклуса η_{th} као и P_g која се добија на генератору.



Слика 37: Шема геотермалне електране и основни подаци по стањима радног флуида у ОРЦ-у

4.1. ТЕРМОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА БИНАРНЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕЛЕКТРАНЕ

Термодинамички циклус који изводи радни флуид приказан је на слици 38 у p - h дијаграму. Овај дијаграм се најчешће користи код расхладних и циклуса климатизације, али исто тако и за геотермалне бинарне циклусе. Са слике се може видети специфичност линије засићења лако испаривих радних флуида ОРЦ-а (пропана, изобутана, пентана, изопентана итд.), који имају тзв. ретроградну линију сувозасићене паре. То је предност овог циклуса јер се експанзија у турбини обавља у подручју прегрејане паре па нема струјања влажне паре кроз турбину која изазива ерозију турбинских лопатица, сепарације капљица, одвода кондензата и слично, што у многостављаје конструкцију турбине.

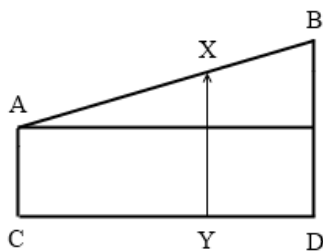


Слика 38: P - h дијаграм геотермалне електране с бинарним циклусом и лако испаривим органским радним флуидом

1. Стање на улазу у турбину

Изопентан, као одабрани радни флуид који је примио топлоту од геотермалног флуида преко предгрејача и испаривача, у стању је сувозасићене паре на температури $t_{rf1} = 96^{\circ}\text{C}$ (369 K) и на притиску $p_1 = 0,66074\text{ MPa}$.

Енталпија h_I



$$A = h_A = 435,17\text{ kJ/kg}$$

$$Y = p_1 = 0,66074\text{ MPa}$$

$$B = h_B = 450,77\text{ kJ/kg}$$

$$X = h_1 = ?$$

$$C = p_A = 0,53815\text{ MPa}$$

$$D = p_B = 0,67436\text{ MPa}$$

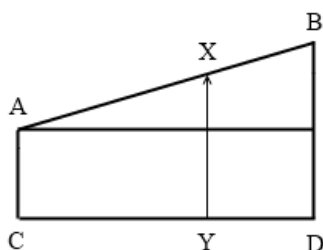
$$h_1 = (p_1 - p_A) \cdot \frac{h_B - h_A}{p_B - p_A} + h_A$$

$$h_1 = (0,66074 - 0,538152) \cdot \frac{450,77 - 435,17}{0,67436 - 0,53815} + 435,17$$

$$h_1 = 0,12259 \cdot \frac{15,6}{0,13621} + 435,17 = 0,12259 \cdot 114,52903 + 435,17$$

$$h_1 = 449,21\text{ kJ/kg}$$

Ентропија s_I



$$A = s_A = 1,2428\text{ kJ/kgK}$$

$$Y = p_1 = 0,66074\text{ MPa}$$

$$B = s_B = 1,2635\text{ kJ/kgK}$$

$$X = s_1 = ?$$

$$C = p_A = 0,53815\text{ MPa}$$

$$D = p_B = 0,67436\text{ MPa}$$

$$s_1 = (p_1 - p_A) \cdot \frac{s_B - s_A}{p_B - p_A} + s_A$$

$$s_1 = (0,66074 - 0,53815) \cdot \frac{1,2635 - 1,2428}{0,67436 - 0,53815} + 1,2428$$

$$s_1 = 0,12259 \cdot \frac{0,0207}{0,13621} + 1,2428 = 0,12259 \cdot 0,15197 + 1,2428$$

$$s_1 = 1,26143 \text{ kJ / kgK}$$

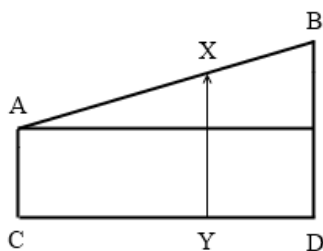
2. Стање на излазу из турбине (улаз у кондензатор)

Сувозасићена пара изопентана експандира пролазећи кроз турбину дајући механички рад који покреће генератор. Овом приликом температура се снижава на $t_{r2} = 51^\circ\text{C}$ ($T_{r2} = 324 \text{ K}$) док притисак опада на $p_2 = 0,1055 \text{ MPa}$.

Енталпија прегрејане паре изопентана у случају изентропске експанзије (идеалне) у турбини h_{2s} , одређује се према својствима из табеле 11 (за прегрејану пару изопентана) на притиску $p_2 = 0,1055 \text{ MPa}$ интерполацијом на основу вредности ентропије.

Енталпија h_{2s}

Пошто се у турбини одвија изентропска експанзија радног флуида $s_1 = s_2 = 1,26143 \text{ kJ/kgK}$.



$$A = h_A = 376,41 \text{ kJ/kg}$$

$$Y = s_2 = 1,26143 \text{ kJ/kgK}$$

$$B = h_B = 394,54 \text{ kJ/kg}$$

$$X = h_{2s} = ?$$

$$C = s_A = 1,2428 \text{ kJ/kgK}$$

$$D = s_B = 1,2986 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_{2s} = (s_2 - s_A) \cdot \frac{h_B - h_A}{s_B - s_A} + h_A$$

$$h_{2s} = (1,26143 - 1,2428) \cdot \frac{394,54 - 376,41}{1,2986 - 1,2428} + 376,41$$

$$h_{2s} = 0,01863 \cdot \frac{18,13}{0,0558} + 376,41 = 0,01863 \cdot 324,9104 + 376,41$$

$$h_{2s} = 382,46 \text{ kJ / kg}$$

Из степена корисности турбине произилази:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \Rightarrow h_2 = h_1 - \eta_t \cdot (h_1 - h_{2s})$$

$$h_2 = 449,21 - 0,85 \cdot (449,21 - 382,46)$$

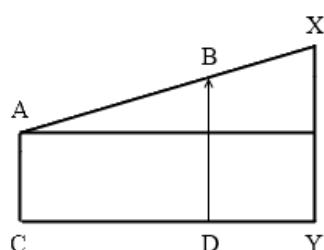
$$h_2 = 449,21 - 0,85 \cdot 66,75 = 449,21 - 56,7375$$

$$h_2 = 392,47 \text{ kJ / kg}$$

3. Стање на излазу из кондензатора (улаз у напојну пумпу)

Радни флуид улази у кондезатор у стању засићене паре. У кондезатору долази до хлађења радног флуида ваздухом (прелази у течну фазу) чиме се температура снижава на $t_{rf3} = 25^\circ\text{C}$ ($T = 298 \text{ K}$) при минималном притиску од $0,1055 \text{ MPa}$.

Енталпија радног флуида h_3 одређује се интерполацијом користећи табелу 10 стања засићеног изопентана.



$$A = h_A = -24,836 \text{ kJ/kg}$$

$$Y = p_1 = 0,1055 \text{ MPa}$$

$$B = h_B = -2,235 \text{ kJ/kg}$$

$$X = h_3 = ?$$

$$C = p_A = 0,06819 \text{ MPa}$$

$$D = p_B = 0,09795 \text{ MPa}$$

$$h_3 = h_B - (p_1 - p_B) \cdot \frac{h_A - h_B}{p_B - p_A}$$

$$h_3 = -2,235 - (0,1055 - 0,09795) \cdot \frac{-24,836 + 2,235}{0,09795 - 0,06819}$$

$$h_3 = -2,235 - 0,00755 \cdot \frac{-22,601}{0,02976} = -2,235 - 0,00755 \cdot (-759,4422)$$

$$h_3 = 3,499 \text{ kJ / kg}$$

4. Стање на излазу из напојне пумпе

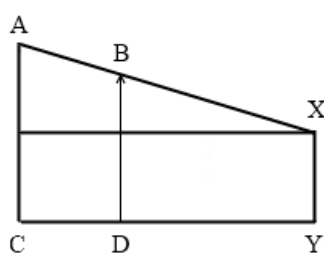
У напојној пумпи се притисак радног флуида повећава на почетни – максимални $p_1 = 0,66074 \text{ MPa}$ док је температура остала на минималној $t_{rf3} = 25^\circ\text{C} (298 \text{ K})$.

Као и код турбине, у напојној пумписе одвија изентроски процес, односно изентропска промена стања радног флуида. Енталпија изопентана, како у случају изентропске (идеалне) компресије у напојној пумпи h_{4s} тако и у реалној h_4 , одређује се према својствима из табеле 10 за дату температуру.

Изентропска енталпија радног флуида h_{4s} на излазу из напојне пумпе се одређује помоћу израза за степен корисности пумпе:

$$\eta_{np} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \Rightarrow h_{4s} = h_3 + \eta_{np} \cdot (h_4 - h_3) = h_3 + \eta_{np} \cdot v_{rf} \cdot (p_4 - p_3)$$

Специфична запремина радног флуида v_{rf} се одређује помоћу специфичне густине радног флуида ρ_{rf} . Специфична густина изопентана се такође одређује коришћењем табеле 10 и интерполацијом за притисак $p_1 = 0,1055 \text{ MPa}$.



$$A = \rho_A = 623,19 \text{ kg/m}^3$$

$$Y = p_1 = 0,1055 \text{ MPa}$$

$$B = \rho_B = 613,08 \text{ kg/m}^3$$

$$X = \rho_{rf} = ?$$

$$C = p_A = 0,06819 \text{ MPa}$$

$$D = p_B = 0,09795 \text{ MPa}$$

$$\rho_{rf} = \rho_A - (p_1 - p_B) \cdot \frac{\rho_A - \rho_B}{p_B - p_A}$$

$$\rho_{rf} = 623,19 - (0,1055 - 0,09795) \cdot \frac{623,19 - 613,08}{0,09795 - 0,06819} = 623,19 - 0,00755 \cdot \frac{10,11}{0,02976}$$

$$\rho_{rf} = 610,51471 \text{ kg/m}^3$$

Када се одреди густина изопентана одређује се његова специфична запремина, па је:

$$v_{rf} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{610,51471}$$

$$v_{rf} = 0,00164 m^3 / kg$$

Код процеса компресије радне течности у напојној пумпи због претпоставке да је радни флуид у течној фази нестишљив, добија се да је $v_{rf} = v_3 = v_4 = const$.

$$h_{4s} = h_3 + \eta_{np} \cdot v_{rf} \cdot (p_4 - p_3)$$

$$h_{4s} = 3,499 + 0,8 \cdot 0,00164 \cdot (0,6607 - 0,1055)$$

$$h_{4s} = 3,611 kJ / kg$$

Реална енталпија радног флуида h_4 на излазу из напојне пумпе се такође одређује помоћу израза за степен корисности пумпе:

$$\eta_{np} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \Rightarrow h_4 = h_3 + \frac{(h_{4s} - h_3)}{\eta_{np}}$$

$$h_4 = 3,499 + \frac{(3,611 - 3,499)}{0,8}$$

$$h_4 = 3,741 kJ / kg$$

Масени проток радног флуида

На основу познатих података за геотермални флуид (расолину) и вредности које су добијене анализом стања у кружном циклусу, одређује се масени проток радног флуида. Да би се то урадило потребно је одредити однос масених протока геотермалног и радног флуида који је дат изразом:

$$\dot{m}_{gf} \cdot (h_{gf1} - h_{gf2}) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_4)$$

или, преко средње специфичне топлоте и температуре геотермалног флуида:

$$\dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_{gf1} - T_{gf2}) = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_4)$$

Из датог односа добија се масени проток радног флуида:

$$\dot{m}_{rf} = \frac{\dot{m}_{gf} \cdot \bar{c}_{gf} \cdot (T_{gf1} - T_{gf2})}{(h_1 - h_4)}$$

$$\dot{m}_{rf} = \frac{45 \cdot 4,224 \cdot (383 - 312)}{(449,21 - 3,741)} = \frac{190,08 \cdot 71}{445,47}$$

$$\dot{m}_{rf} = 30,3 \text{ kg} / \text{s}$$

Снага турбине P_t

$$P_t = \dot{m}_{rf} \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_{2s})$$

$$P_t = 30,3 \cdot 0,85 \cdot (449,21 - 382,46) = 25,76 \cdot 66,75$$

$$P_t = 1719,5 \text{ kW} = 1,72 \text{ MW}$$

Снага напојне пумпе P_{np}

$$P_{np} = \dot{m}_{rf} \cdot (h_4 - h_3)$$

$$P_{np} = 30,3 \cdot (3,741 - 3,499) = 30,3 \cdot 0,242$$

$$P_{np} = 7,67 \text{ kW}$$

Ефективна снага турбине P_{ef}

$$P_{ef} = \eta_{meh} \cdot P_t = \eta_{meh} \cdot \dot{m}_{rf} \cdot W_t = \eta_{meh} \cdot \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_2) = \eta_{meh} \cdot \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_t$$

$$P_{ef} = \eta_{meh} \cdot P_t = 0,97 \cdot 1,72$$

$$P_{ef} = 1,67 \text{ MW}$$

Снага генератора P_g

$$P_g = \eta_g \cdot P_{ef}$$

$$P_g = 0,98 \cdot 1,67$$

$$P_g = 1,64 MW$$

Количина топлоте доведена геотермалним флуидом (расолином)

$$Q_{dov} = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$Q_{dov} = 30,3 \cdot (449,21 - 3,741) = 30,3 \cdot 445,469$$

$$Q_{dov} = 13497,71 kW = 13,497 MW$$

Количина топлоте коју је потребно одвести са радног флуида

$$Q_{odv} = \dot{m}_{rf} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$Q_{odv} = 30,3 \cdot (392,47 - 3,499) = 30,3 \cdot 388,97$$

$$Q_{odv} = 11785,79 kW = 11,785 MW$$

Термодинамички степен корисности η_{th}

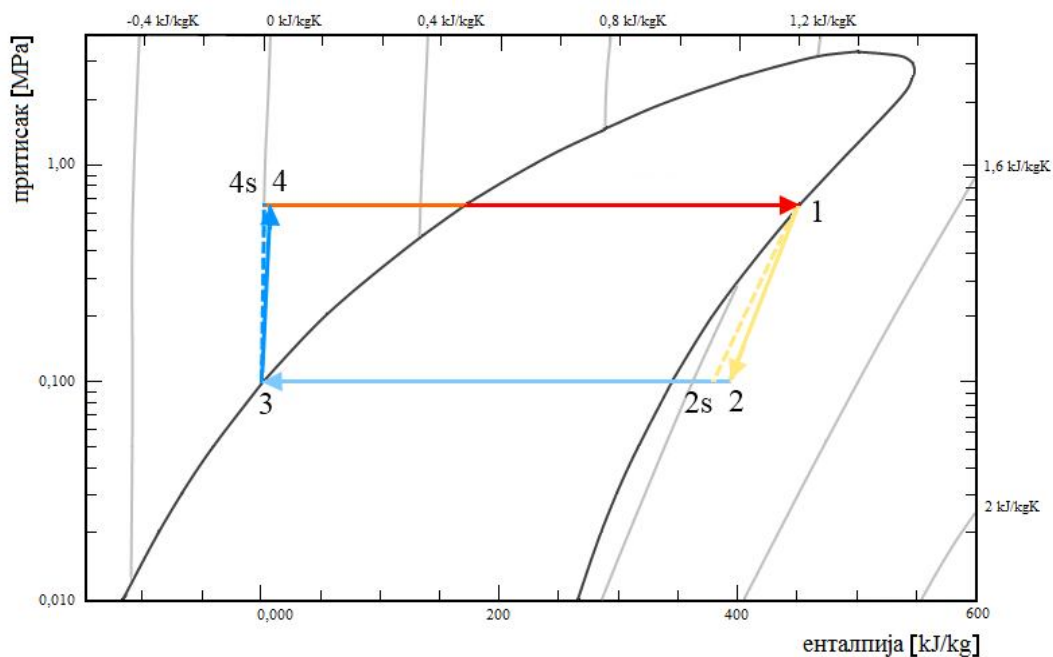
$$\eta_{th} = \frac{Q_{dov} - Q_{odv}}{Q_{dov}} = \frac{P_{kor}}{Q_{dov}} = \frac{P_t - P_{np}}{Q_{dov}}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_t - P_{np}}{Q_{dov}} = \frac{1719,5 - 7,67}{13497}$$

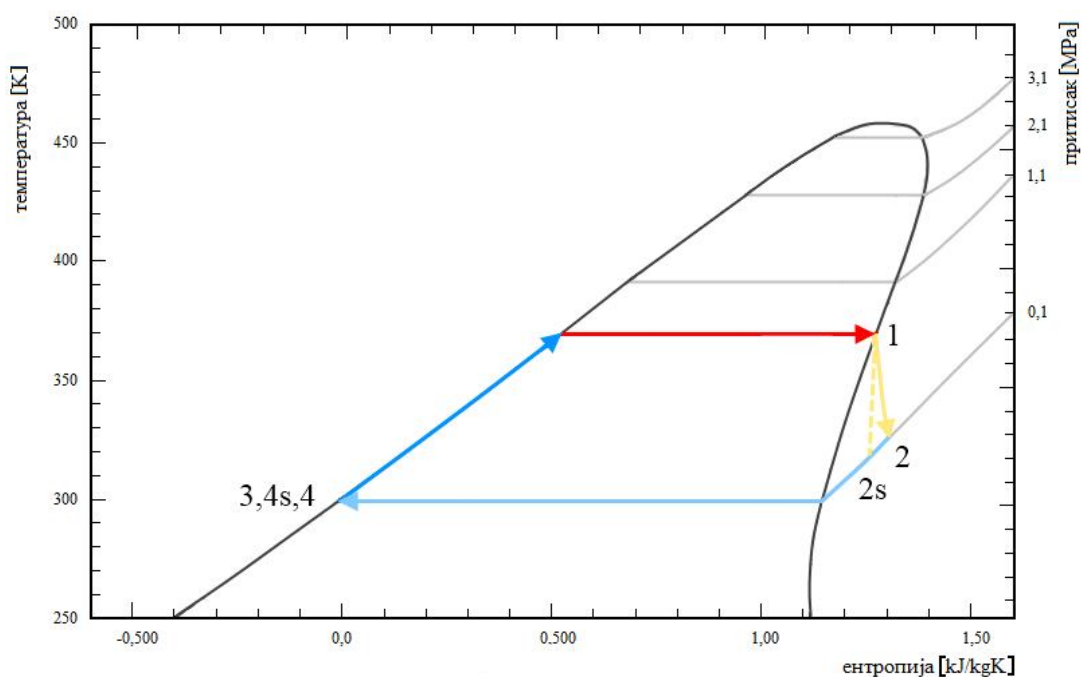
$$\eta_{th} = 0,12683 \approx 13\%$$

Дијаграми стања изопентана у кружном циклусу

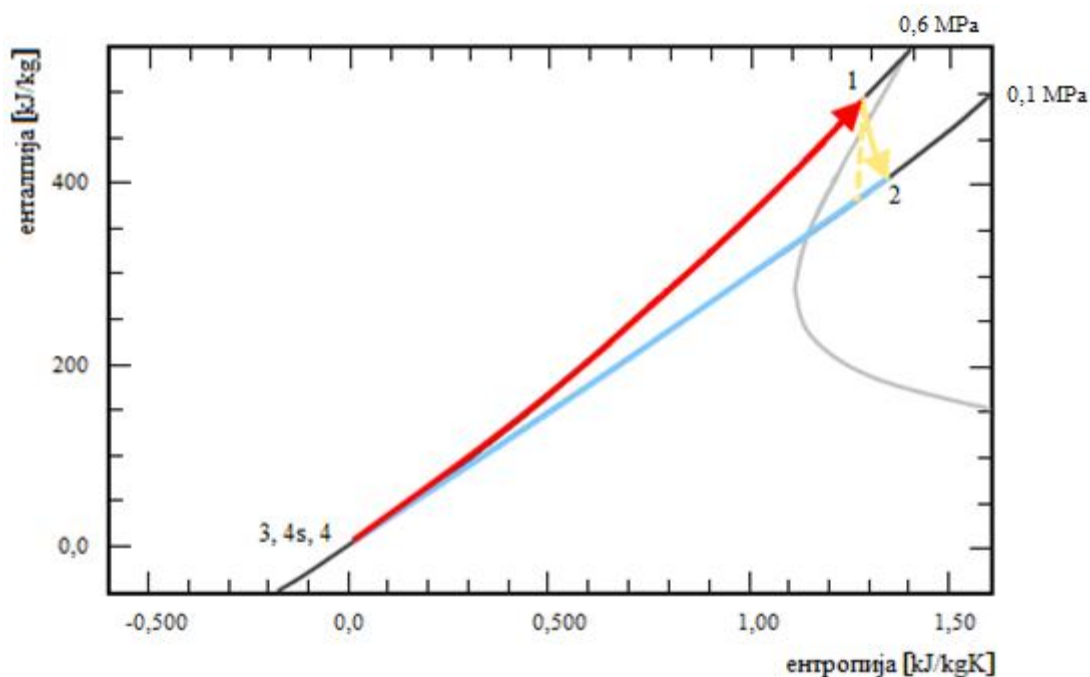
На основу прорачуна који је урађен, резултати су графички приказани дијаграмима на сликама 39, 40 и 41.



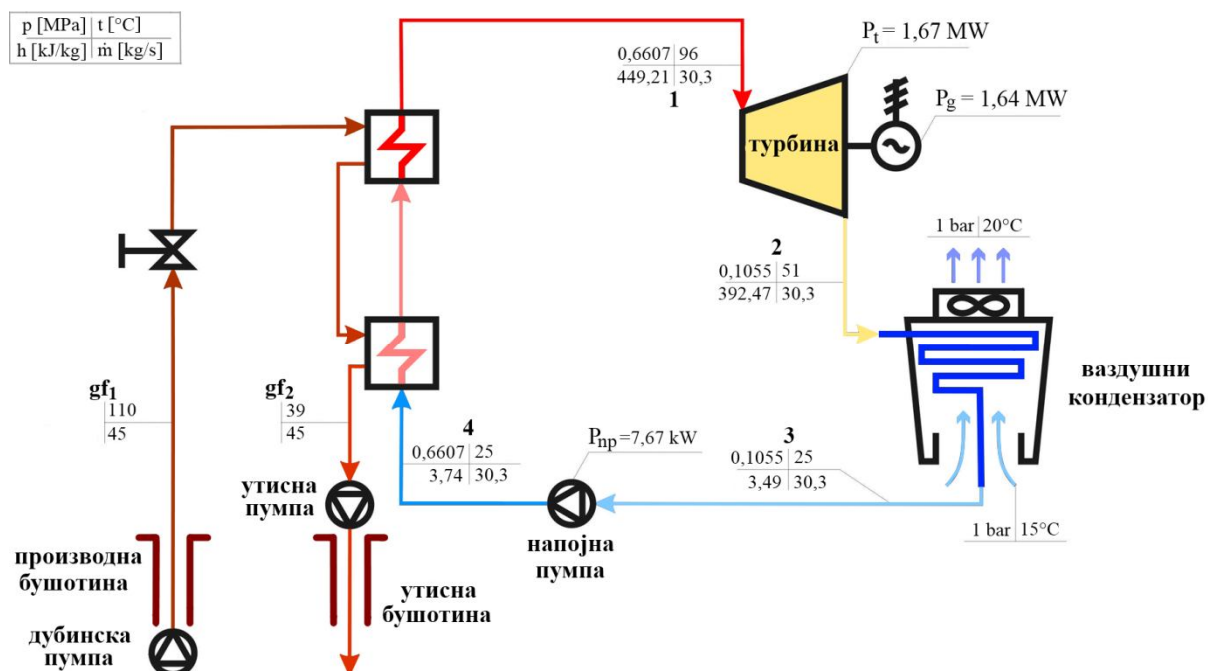
Слика 39: Дијаграм p - h



Слика 40: Дијаграм T - s



Слика 41: Дијаграм $h-s$



Слика 42: Шема постројења са добијеним вредностима по стањима радног флуида

Табела 10: Својства засићеног изопентана (за дате температуре).

48: isopentane: V/L sat. T=250.0 to 500.0 K								
	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	250.00	0.011375	661.66	0.39851	-110.30	269.11	-0.40033	1.1173
2	260.00	0.018908	652.28	0.63961	-89.640	283.06	-0.31933	1.1141
3	270.00	0.030037	642.76	0.98534	-68.520	297.33	-0.23970	1.1153
4	280.00	0.046059	633.07	1.4648	-46.925	311.90	-0.16126	1.1203
5	290.00	0.068190	623.19	2.1109	-24.836	326.73	-0.083873	1.1284
6	300.00	0.097949	613.08	2.9607	-2.2348	341.80	-0.0074190	1.1394
7	310.00	0.13700	602.71	4.0557	20.899	357.08	0.068221	1.1527
8	320.00	0.18713	592.04	5.4424	44.586	372.53	0.14315	1.1680
9	330.00	0.25024	581.03	7.1736	68.850	388.10	0.21748	1.1849
10	340.00	0.32835	569.51	9.3101	93.717	403.77	0.29131	1.2032
11	350.00	0.42358	557.73	11.923	119.22	419.48	0.36473	1.2226
12	360.00	0.53815	545.29	15.098	145.38	435.17	0.43784	1.2428
13	370.00	0.67436	532.21	18.941	172.25	450.77	0.51077	1.2635
14	380.00	0.83465	518.34	23.585	199.88	466.18	0.58364	1.2844
15	390.00	1.0216	503.52	29.209	228.34	481.30	0.65661	1.3052
16	400.00	1.2378	487.52	36.056	257.71	495.95	0.72986	1.3255
17	410.00	1.4864	470.00	44.481	288.12	509.92	0.80366	1.3446
18	420.00	1.7706	450.46	55.035	319.75	522.86	0.87839	1.3620
19	430.00	2.0941	428.04	68.651	352.92	534.21	0.95470	1.3763
20	440.00	2.4618	401.08	87.170	388.22	542.91	1.0338	1.3854

Табела 11: Својства прегрејане паре изопентана (за дати притисак).

4: isopentane: p = 0.1055 MPa					
	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Density (kg/m³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	280.00	0.10550	633.14	-46.872	-0.16140
2	290.00	0.10550	623.24	-24.804	-0.083969
3	300.00	0.10550	613.09	-2.2287	-0.0074397
4	302.15	0.10550	610.88	2.6919	0.0089040
5	302.15	0.10550	3.1739	345.07	1.1420
6	310.00	0.10550	3.0805	358.70	1.1866
7	320.00	0.10550	2.9704	376.41	1.2428
8	330.00	0.10550	2.8691	394.54	1.2986
9	340.00	0.10550	2.7754	413.08	1.3539
10	350.00	0.10550	2.6882	432.06	1.4089
11	360.00	0.10550	2.6069	451.46	1.4636
12	370.00	0.10550	2.5308	471.29	1.5179
13	380.00	0.10550	2.4594	491.56	1.5720
14	390.00	0.10550	2.3921	512.26	1.6257
15	400.00	0.10550	2.3287	533.39	1.6792

5. ЕКОЛОШКИ АСПЕКТИ ИСКОРИШЋАВАЊА ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

У процесу производње геотермалне енергије, значајан утицај на околину углавном имају високо температурна лежишта с већим производним количинама. Основни утицаји на околину током изградње објеката и процеса претварања геотермалне у електричну енергију односе се на: јединичну површину земљишта по јединици произведене енергије, емисију гасова и пара, емисију отпадне топлоте и ниво буке. Ови утицаји могу бити стални или повремени са повратним или неповратним ефектима.

5.1. КОРИШЋЕЊЕ ЗЕМЉИШТА

Изградња прилазних путева и израда бушотина могу утицати на вегетацију и изглед околине. Подручје активности је релативно мало, јер се обично из једног места буши неколико бушотина за шта је потребна површина земљишта до 2 500 m². Топлотна енергија се користи што је могуће ближе бушотинама, чиме се смањује дужина потребних цевовода. У табели 12 приказана је потребна површина земљишта за постројење за производњу електричне енергије различитих енергетских извора [20].

Табела 12: Потребна површина земљишта за постројења за производњу електричне енергије

Енергетски извор	Површина земљишта [m ² /MW]
Геотермална енергија	400 – 3200
Нуклеарна енергија	2000 – 4000
Енергија из фосилних горива (угаљ)	7600

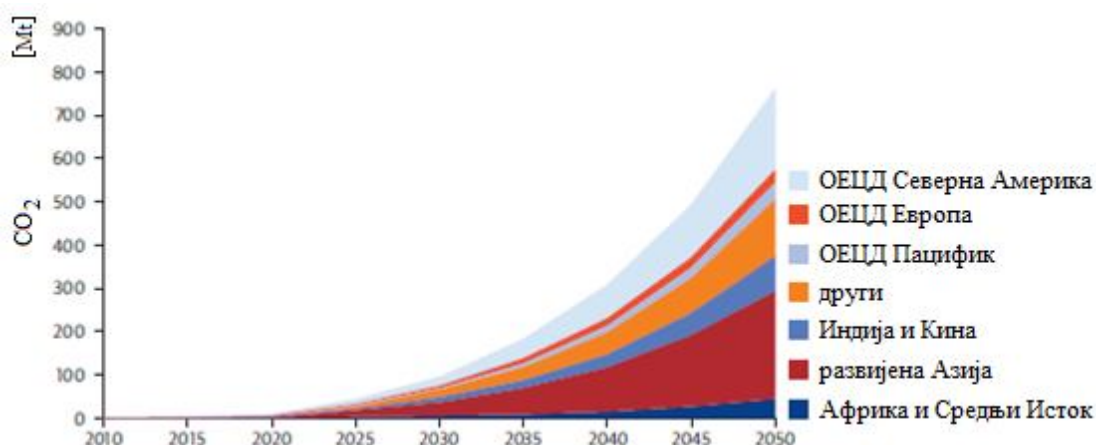
5.2. ЕМИСИЈА ГАСОВА И ПАРА

Геотермални флуид углавном садржи гасове угљен диоксид, метан и водоник сулфид, а у незнатним количинама кисеоник те лако испарљиве паре арсена и живе. Геотермално постројење има значајну еколошку предност у односу на постројења са фосилним горивима јер нема емисије кисеоникових оксида и сумпорног диоксида. Смањена емисија кисеоника и сумпора смањује опасност од појава киселих киша, а смањена емисија угљен диоксида смањује могућност глобалних климатских промена. Емисија угљен диоксида може се разликовати зависно од карактеристика геотермалног флуида и типа геотермалног постројења. Бинарно постројење не производи емисију угљен диоксида, док противпритисна и кондензацијска постројења за производњу електричне енергије емитују 0,09 kg CO₂/kWh произведене електричне енергије, што је десет пута мање у односу на постројење погоњено угљем (табела 13). Количина водоник сулфида (H₂S) у геотермалном флуиду креће се у границама 0,03-6,4 g/kWh [6], што не изазива појаву киселих киша. Водоников сулфид се може издвојити из паре у процесу којим се добија елементарни сумпор, што смањује емисију H₂S и до 90 %. У последње време користе се технике спаљивања H₂S за добијање сумпор диоксида који се претвара у сумпорну киселину чиме се добија готов производ.

Табела 13: Поређење емисије CO₂ код коришћења различитих енергената за производњу електричне енергије

Енергетски извор	Емисија CO ₂ [kg/kWh]
Геотермална енергија	0,09
Природни плин	0,6
Нафта	0,9
Угаљ	0,95

Рачуна се да ће у наредном периоду, до 2050 године, бити произведено 1 400 TWh електричне енергије употребом геотермалне енергије, и овом приликом смањити емисију CO₂ око 760 Mt годишње (сл. 43). Смањење емисије CO₂ ће бити остварено применом геотермалних постројења нове генерације које не емитују CO₂, (тзв. „високо обновљива“) а која ће заменити постојећа постројења која користе фосилна горива [7].



Слика 43: Смањење емисије CO₂ производњом електричне употребом геотермалне енергије до 2050. године [7]

5.3. ЕМИСИЈА ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ

На геотермалним изворима с преовладавајућом парном фазом, топлота одлази у атмосферу испуштањем паре и на површинским цевоводима. На геотермалним системима где преовладава течна фаза, топлота се губи расхладним торњевима и разводним цевоводима.

Табела 14: Количина отпадне топлоте за различите енергенте у произвоњи електричне енергије [20]

Енергетски извор	Емисија отпадне топлоте MW _T /MW електричне енергије
Природни гас	1,1
Нафта	1,6
Угаљ	1,7
Нуклеарни	2,0
Соларни	2,3
Геотермални	
Противпритисна турбина	4,4
Кондензацијска турбина	5,0
Бинарно постројење	9,0

Процес искоришћења геотермалне енергије обзиром на примењену технологију доводи до великих губитака топлоте. Ефикасност постројења за претварање геотермалне у електричну енергију је много мања у односу на друга слична постројења за производњу електричне енергије. Бинарно постројење емитује највећу количину топлоте у атмосферу према укупном степену корисности. У табели 14 приказане су вредности емисије топлоте у околину за различите енергенте коришћене у производњи електричне енергије.

5.4. УПУМПАВАЊЕ ГЕОТЕРМАЛНОГ ФЛУИДА

Сваки обим производње флуида и топлоте у искоришћавању геотермалне енергије који се природно надокнади у подземљу сматра се обновљивим. Упумпавање геотермалног флуида у овом случају обавља се утискивањем у плиће пропусне геолошке структуре код којих неће доћи до угрожавања квалитета питке воде. Тако на пример повећане производне количине геотермалног флуида без упумпавања довеле би до пада производње. Из овог разлога се готово увек планира „враћање“ флуида у лежиште чиме се надокнађује произведена вода и одржава притисак у лежишту.

5.5. НИВО БУКЕ

У процесу искоришћавања геотермалне енергије бука се појављује током израде бушотина и изградње постројења за претварање геотермалне у електричну енергију. У том периоду ниво буке креће се од 45 до 120 db, није сталног карактера а потиче од слободног истицања из бушотина или истицањем кроз пригушивач, тестирања бушотине, рада дизел агрегата за покретање гарнитуре за бушење итд. У процесу производње ниво буке креће се као и код већине постројења која користе моторне погоне а може се смањити употребом опреме са нижим нивоом буке као и постављањем звучних изолација.

6. ЗАКЉУЧАК

Геотермална енергија је свуда испод нас. Негде је лако доступна или сама излази на површину земље у облику топле воде или паре, а негде је на великој дубини и практично недоступна.

Геотермална енергија има бројне предности у односу на фосилне изворе енергије. Највећа предност је то што је њена прерада чистија и сигурнија за околину од прераде других облика енергије. Метода која се користи за производњу електричне енергије нема негативне ефекте на околину, а уз то геотермалне електране заузимају мало простора. Ова енергија је поуздана јер не зависи од метеоролошких утицаја за разлику од других електрана. Главни недостатак овог облика енергије је то што нема много локација на којима би се могла црпети. Геотермалну енергију је немогуће транспортовати и због тога се може користити само за снабдевање топлотом оближњих насеља и за производњу електричне енергије.

Потенцијал хидрогеотермалних ресурса Србије изузетно је велики. Досадашње коришћење потенцијала је минорно у односу на могућности. У највећем броју случајева геотермална енергија се користи у балнеотерапеутске сврхе. Индустријско коришћење и коришћење геотермалне енергије у топлификационе сврхе је врло мало. Овим радом је показано да има могућности коришћења ове енергије и у производњи електричне енергије на подручју Србије али је као инвестиција доста скупа. Уз већу стимулацију Владе Р Србије и развојем нових технологија, треба очекивати боље услове за експлоатацију ове врсте енергије.

Будући да је процењена укупна количина геотермалне енергије која би се могла искористити знатно већа него свеукупна количина енергетских извора базираних на нафти, угљу и природном гасу, требало би геотермалној енергији свакако дати већу важност, нарочито ако се узме у обзир да је реч о јефтином, обновљивом извору енергије која је уз то и еколошки прихватљива. Будући да геотермална енергија није свуда лако доступна, требало би искористити места на којима је та енергија лако доступна (рубови тектонских плоча) и тако барем мало смањити притисак на фосилна горива и тиме помоћи Земљи да се опорави од штетних гасова.

ЛИТЕРАТУРА

[1] МИНИСТАРСТВО РУДАРСТВА И ЕНЕРГЕТИКЕ ВЛАДЕ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ; СТРАТЕГИЈА РАЗВОЈА ЕНЕРГЕТИКЕ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ ДО 2015. године; БЕОГРАД, Децембар 2004. године.

http://www.ssl-link.com/mre/cms/mestoZaUploadFajlove/Strategija_Utvrdjen_Na_Vladi.pdf

[2] Badino G.: "Underground drainage systems and geothermal flux", Acta Carsologica 2005, 34 (2), 277-316.

[3] Ruggero Bertani: "Performance of Generating Plan 2001 – Renewable Energy Plant", Annex 6: Figures and Facts about Geothermal Energy.

[4] Ђурковић Р.: „Дефиниција и класификација термалних, термо-минералних и минералних вода“, Завод за геолошка и геофизичка истражинања, Београд 1960.

[5] Куревија Т., Голуб М.: „Искориштавање геотермалних лежишта“, Рударско-геолошко нафтни факултет, Завод за нафтно инжењерство, 2008.

[6] Шуштершић В., Бабић М.: „Геотермална енергија – енергија природних и вештачких извора топле воде“, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац 2009.

[7] International Energy Agency, „Technology Roadmap – Geothermal Heat and Power“, 2011.

www.iea.org

Пристапљено 05.05.2013.

[8] International Geothermal Agency

http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/what_is_geothermal_energy.html

Пристапљено 04.05.2013. год.

[9] L. Rybach: "Regulatory Framework for geothermal in Europe – with special reference to Germany, France, Hungary, Romania and Switzerland", Geothermal training programme IGC 2003 – Short Course Orkustofnun, Grensásvegur 9, September 2003.

[10] М. Мартиновић, З. Стевановић, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, А. Саљников, М. Коматина, Н. Рудоња, Машински факултет, Универзитет у Београду, С. Андрејевић, „Клима“, Смедерево, „Хидрогеотермални ресурси и топлотне пумпе – топлфикациона алтернатива Србије“.

- [11] Clauser R., „Geothermal Energy. In: Heinloth K., ed., Group VIII: Advanced Materials and Technologies, p. 493-604, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 2006.
- [12] Ronald DiPippo, „Geothermal Power Plants – Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact”, Butterworth-Heinemann, 2 edition, 2007.
- [13] Reynolds W.C., „Thermodynamic Properties in SI: Graphs, Tables and Computational Equations for 40 Substances”, Dept. Of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1979.
- [14] Gallager J.S., D. Linsky, G. Morrison and J.M.H. Levelt Sengers, „Thermodynamic Properties of a Geothermal Working Fluid; 90% Isobutane – 10% Isopentane”, NBS Tech. Note 1234, National Bureau of Standards, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, 1975.
- [15] Demuth O.J., C.J. Mines and W.D. Swank, „Supercritical Binary Geothermal Cycle Experiments With Mixed-Hydrocarbon Working Fluids and a Vertical, In-tube, Counterflow Condenser“, EGG-EP-7076, Idaho National Engineering Laboratory, 1975.
- [16] Milora S.L. and J.W. Tester, „Geothermal Energy as a Source of Electric Power: Thermodynamic and Economic Criteria”, The MIT Press, Cambridge, MA, 1976.
- [17] Bliem C.J. and Mines G.L., „Advanced Binary Performance Power Plants: Limits of performance”, EGG-EP-9207, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID, 1991.
- [18] Уредба о мерама подстицаја за повлашћене произвођаче електричне енергије, Влада Р Србије, Закон о енергетици, Сл. Гласник РС бр. 57/11, 80/11-исправка 93/12 и 124/12.
- [19] Петровић Д., СЗР „Заваривач“, Врање, Служба пројектовања, Ниш, и Илић Г., Машински факултет, Ниш, „Могућност коришћења енергије геотермалне воде у Врањској Бањи“.
- [20] Ruggero Bertani: “What is geothermal Potential?”, IGA News No. 53, pages. 1-3, 2002