

# Utjecaj hidrotermalnih ležišta na okoliš

---

Gašparić, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:868105>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Marija Gašparić

UTJECAJ HIDROTERMALNIH LEŽIŠTA NA OKOLIŠ

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, 2021

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20.09.2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06.09.2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Saša Koreć

#### Članovi povjerenstva

- 1) Prof.dr.sc. Miroslav Odub
- 2) Dr.sc. Dragana Dogačić
- 3) Doc.dr.sc. Jelena Kobrec
- 4) Izv.prof.dr.sc. Ivan Koreć

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

UTJECAJ HIDROTERMALNIH LEŽIŠTA NA OKOLIŠ

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Miroslav Golub

Komentor: dr. sc. Dragana Dogančić

Kandidat: Marija Gašparić

Varaždin, 2021



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MARIJA GAŠPARIĆ  
Matični broj: 236 - 2018./2019.  
Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

UTJECAJ HIDROTERMALNIH LEŽIŠTA NA OKOLIŠ

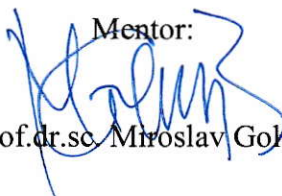
Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Hidrotermalna ležišta
3. Pretvorba geotermalne u električnu energiju
4. Direktna upotreba geotermalne energije
5. Obnovljivost geotermalne energije
6. Utjecaj na okoliš
7. Zaključak
8. Literatura
9. Popis slika
10. Popis tablica
11. Popis kratica i mjernih jedinica


Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 16.03.2020.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:  
  
Prof.dr.sc. Miroslav Golub

Neposredni voditelj:   
Dragana Dogančić  
Dr.sc. Dragana Dogančić

Predsjednik Odbora za nastavu:  
  
Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Utjecaj hidrotermalnih ležišta na okoliš

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom prof. dr. sc. Miroslava Goluba.

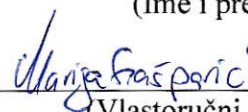
Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 02.09.2021

Marija Gašparić

---

(Ime i prezime)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

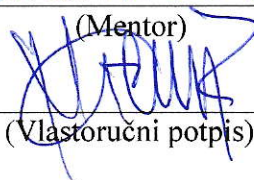
UTJECAJ HIDROTHERMALNIH LEŽIŠTA NA OKOLIŠ

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 01.05.2024

prof. dr. sc. Miroslav Golub

(Mentor)

  
(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK:

Pojam hidrotermalna ležišta označava geotermalne vode u podzemnim ležištima. Hidrotermalna ležišta klasificiraju se prema stupnju istraženosti fluida, vrsti geotermalnih ležišta i temperaturi ležišnog fluida. Geotermalna energija može se koristiti na više načina, a najpoznatiji je proizvodnja električne energije. Geotermalne elektrane rade na tri principa. U sva tri procesa para se koristi za pogon električnih generatora. Tokom rada geotermalnog postrojenja postoji mogućnost neželjenih emisija u atmosferu, vodu i tlo, a osim toga elektrane proizvode malu količinu buke, utječu na upotrebu zemljišta, može doći do slijeganja tla, inducirane seizmičnosti ili pojave klizišta. Međutim, za razliku od elektrana na ugljen utjecaj geotermalnih elektrana na okoliš je minimalan i ne predstavlja problem. Najveći utjecaj na okoliš primjećuje se prilikom izgradnje geotermalnog postrojenja zbog strojeva, vozila i materijala korištenih u izgradnji.

**KLJUČNE RIJEČI:** hidrotermalna ležišta, geotermalna energija, geotermalne vode, utjecaj na okoliš.



**Abstract:**

The term hydrothermal reservoirs refers to geothermal water in underground reservoirs. Hydrothermal reservoirs are classified according to the degree of fluid exploration, the type of geothermal reservoirs and the temperature of a reservoir fluid. Geothermal energy can be used in several ways and the most famous is the production of electricity. There are three principles of geothermal power plant operations. In all three processes steam is used to drive electric generators. During the operation of a geothermal plant, there is a possibility of unwanted emissions into the atmosphere, water, and soil. In addition, power plants produce little noise, affect land use, soil subsidence, induced seismicity or landslides may occur. However, unlike coal-fired power plants, their environmental impact is minimal and does not create a problem. The greatest impact on the environment is observed during the construction of a geothermal plant due to machines, vehicles and materials used during their construction.

**KEY WORDS:** hydrothermal reservoirs, geothermal energy, geothermal water, environmental impact.

## Sadržaj:

1. Uvod.....	1
2. Hidrotermalna ležišta.....	2
2.1. Definicija hidrotermalnih ležišta.....	2
2.2. Toplinski uvjeti u unutrašnjosti Zemlje i Zemljine kore.....	4
2.3. Geotermalni gradijent.....	7
2.4. Klasifikacija hidrotermalnih ležišta .....	12
2.4.1. Prema stupnju istraženosti fluida.....	13
2.4.2. Prema vrsti geotermalnih ležišta.....	14
2.1.3. Prema temperaturi ležišnog fluida .....	16
3. Pretvorba geotermalne u električnu energiju .....	17
4. Direktna upotreba geotermalne energije.....	21
5. Obnovljivost geotermalne energije .....	23
6. Utjecaj na okoliš .....	25
6.1. Emisije u atmosferu.....	27
6.2. Kruti i tekući otpad.....	34
6.3. Buka.....	35
6.4. Kvaliteta i upotreba vode.....	36
6.5. Upotreba zemljišta.....	38
6.6. Slijeganje tla .....	39
6.7. Inducirana seizmičnost .....	40
6.8. Pojava klizišta.....	41
6.9. Gejziri i fumarole .....	41

6.10.	Utjecaj na floru i faunu .....	42
7.	Zaključak .....	44
8.	Literatura.....	45
9.	Popis slika.....	48
10.	Popis tablica.....	49
11.	Popis kratica i mjernih jedinica .....	50

## 1. Uvod

Geotermalna energija je energija sadržana kao toplina u Zemljinoj unutrašnjosti. Geotermalna energija je neravnomjerno raspoređena i često na dubinama prevelikim da bi se mogla industrijski eksploatirati. Geotermalni gradijent opisuje porast temperature s dubinom Zemlje, taj gradijent u prosjeku iznosi  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  dubine. Također postoje područja gdje je geotermalni gradijent znatno iznad prosjeka i na tim područjima toplina je dostupna za iskorištavanje. Toplina se prenosi provođenjem i konvekcijom, a geotermalna tekućina djeluje kao nositelj topline.

Geotermalna energija za razliku od sunčeve energije ili energije vjetra ne ovisi o vanjskim čimbenicima. U povijesti je bila ograničena na područja u blizini granica tektonskih ploča, ali tehnološki napredak proširio je mogućnosti iskorištavanja i na druga područja.

Geotermalna energija može se koristiti na više načina, najpoznatiji je proizvodnja električne energije. Geotermalne elektrane rade na tri principa: princip suhe pare, princip separiranja pare i binarni princip. Sva tri procesa kontroliraju paru i koriste ju za pogon električnih generatora.

Direktna upotreba geotermalne energije također predstavlja važan dio ukupne potrošnje geotermalne energije. Najčešći oblici direktnog iskorištavanja su: balneologija, poljoprivreda, akvakultura, klimatizacija i industrijska primjena.

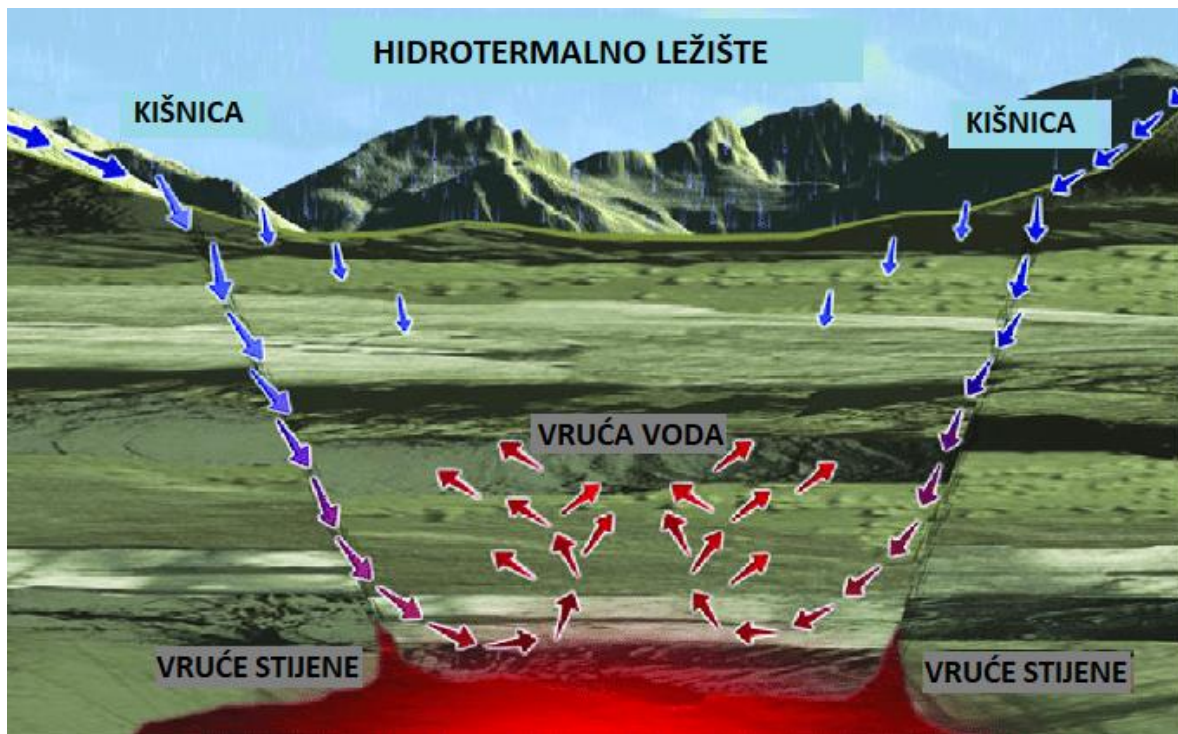
Kao i proizvodnja energije iz drugih izvora i geotermalna energija ima negativan utjecaj na okoliš. Negativni utjecaji su emisije neželjenih plinova u atmosferu, unošenje neželjenih kemikalija i spojeva u okoliš, poticanje seizmičnosti, slijeganje tla, korištenje vode i korištenje zemljišta.

## 2. Hidrotermalna ležišta

### 2.1. Definicija hidrotermalnih ležišta

Hidrotermalna ležišta sadrže vruću vodu i / ili paru zarobljenu u pukotinskim ili poroznim stijenskim formacijama na plitkim do umjerenim dubinama (100–4,5 km) sa slojem nepropusne stijene na vrhu[1]. Hidrotermalni resursi uglavnom su ograničeni na područja Zemljine kore gdje protok topline, koji je veći nego u okolnim područjima, zagrijava vodu koja se nalazi u propusnim stijenama (ležištima) u dubini [2–4].

Hidrotermalno ležište je veliko podzemno tijelo propusnih stijena na dubini dostupnoj bušenjem. To tijelo, stijena, mora sadržavati velike količine fluida, vode ili pare, koje prenose toplinu na površinu. Ležište je omeđeno hladnijim stijenama koje su hidraulički povezane s vrućim ležištem pukotinama i procjepima. Pukotine u hladnijim stijenama tvore kanale za prodor kišnice pod zemlju. Termalne vode ili termalna para uglavnom su kišnica koja se infiltrira na površini i dok putuje prema dubini prodire u vruće stijene ležišta gdje povećava svoju temperaturu [4]. Proces infiltriranja i zagrijavanja kišnice u ležištu prikazan je na slici 1.



*Slika1. Prikaz infiltriranja kišnice u podzemni rezervoar [5]*

Geotermalne vode mogu biti zarobljene u podzemnim ležištima ili prolaziti kroz njih, napajajući se prirodno ili umjetno, utiskivanjem. Izvori s najvećim energetske potencijalom uglavnom su smješteni na granicama tektonskih ploča, gdje često postoji vidljiva geotermalna aktivnost. Pod geotermalnom aktivnošću podrazumijevaju se vrući izvori, fumarole i gejziri. Aktivni vulkani također su vrsta geotermalne aktivnosti [2–4].

Prema općeprihvaćenoj teoriji tektonike ploča kruta vanjska ljuska Zemlje ili litosfera (kora i gornji plašt, debljina u rasponu od 70 do 100/125 km), podijeljena je u zasebne blokove ili ploče, nazvane litosferne ploče. Postoji nekoliko glavnih litosfernih ploča i deseci manjih. Šest glavnih nazvano je po kontinentima ugrađenim u njih, poput sjevernoameričke, afričke i antarktičke ploče. Konvekcijsko gibanje rastaljenih stijena u Zemljinom plaštu uzrokuje gibanje litosfernih ploča, te se one polako kreću površinom Zemlje, brzinom od nekoliko centimetara godišnje. Kako se ploče sastoje i od kontinenata i od morskog dna, koncept tektonike ploča znači da se kontinenti i morska dna pomiču, klizeći po plastičnoj astenosferi. Te se ploče ili odmiču jedna od druge, klize jedna pored druge ili se pomiču jedna prema drugoj. Većina geoloških aktivnosti proizlazi iz međusobnog djelovanja ploča.

Budući da se ploče neprekidno gibaju i dolaze u kontakt kao posljedicu imamo nastanak tri vrste tektonskih granica: konvergentne granice, gdje se ploče pomiču jedna prema drugoj; divergentne granice, gdje se ploče razdvajaju; i transformne granice, gdje se ploče pomiču bočno u odnosu jedna na drugu [6].

## 2.2. Toplinski uvjeti u unutrašnjosti Zemlje i Zemljine kore

Toplinska vodljivost predstavlja pokazatelj prijelaza topline od viših prema nižim izvorima topline, iz jače prema slabije zagrijanim dijelovima, težeći prema izravnanju temperature[7].

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho$$

Gdje je:

$\lambda$  – toplinska vodljivost, [W/m K]

$c$  – specifična toplina, [J/kg K]

$a$  – temperaturna vodljivost ili difuznost, [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  – gustoća, [kg/m<sup>3</sup>]

Toplinski tok je definiran kao količina topline koja prolazi kroz jediničnu površinu u jedinici vremena [7]:

$$q = \lambda \cdot G_t$$

gdje je:

$q$ - toplinski tok, [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda$ - koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

$G_t$  – vertikalni geotermalni gradijent, [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ]

Koeficijent toplinske vodljivosti važan je geotermalni parametar, a predstavlja količinu energije koja prođe u sekundi kroz presjek površine od  $1 \text{ m}^2$ , u pravcu okomitom na presjek, pri gradijentu temperature od  $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . Toplinska vodljivost određuje se eksperimentalno u laboratoriju, a može se proračunati i prema različitim fizikalnim parametrima.

$$\lambda = \frac{E \cdot h}{A \cdot (T_2 - T_1) \cdot \tau}$$

gdje je:

$E$  – količina topline koja je prošla kroz površinu  $A$ , [J]

$h$  – debljina sloja, [m]

$A$  – površina kroz koju prolazi toplinski tok, [ $\text{m}^2$ ]

$(T_2 - T_1)$  – razlika temperature na suprotnim plohamo sloja, [K]

$\tau$  – vrijeme prolaženja toplinskog toka, [s]

Količina iskoristive toplinske energije sadržane u geotermalnim tekućinama određuje se u smislu entalpije, koja se definira kao sadržaj energije po jedinici mase tekućine, a zajednička jedinica za entalpiju je  $\text{kJ}/\text{kg}$ [8]. Općenito entalpija je funkcija stanja termodinamičkog sustava, tj. količina topline pri konstantnom tlaku i volumenu ( $p=\text{const.}$ ,  $V=\text{const.}$ ).

$$h = U + R \cdot T$$

Za idealne plinove vrijedi  $p v = R T$  i stoga vrijedi: [9, 10].

$$h = U + p \cdot V$$

Gdje je:



- $h$ = entalpija
- $U$ = zbroj unutarnje energije
- $R$ = plinska konstanta (8.314 [J/mol K])
- $T$ = apsolutna temperatura
- $p$ = tlak
- $V$ = volumen

Geotermalna energija je toplinska energija koja se generira i pohranjuje u Zemlji. Toplinska energija je energija koja određuje temperaturu materije. Zemljina geotermalna energija potječe iz vremena samog nastanka planeta (20 %) te od radioaktivnog raspada kemijskih elemenata sadržanih u različitim mineralima (80 %). Razlika u temperaturi između jezgre planeta i njegove površine uzrokuje kontinuirano provođenje toplinske energije. Toplina koja se koristi za geotermalnu energiju pohranjena je duboko u Zemlji, sve do Zemljine jezgre na dubini od 6400 km [6].

Donedavno se pretpostavljalo da je toplina iz vremena nastanka planeta jedini izvor topline unutar Zemlje. Sada se zna da je drugi glavni izvor topline raspad dugovječnih radioaktivnih izotopa. Iako svi radioaktivni izotopi generiraju toplinu dok se raspadaju, samo su izotopi koji imaju dugo vrijeme poluraspada (4,5 milijardi godina) značajni proizvođači topline tijekom geološkog vremena, a takvi su i danas. Četiri dugotrajna radioaktivna izotopa važni su proizvođači topline, a to su  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  [4].

Prosječni toplinski tok iz kontinentalne kore (granita) iznosi  $57 \text{ mW/m}^2$ , a kroz oceansku koru (bazalt) iznosi  $99 \text{ mW/m}^2$ . Prosječni Zemljin toplinski tok je  $82 \text{ mW/m}^2$ . U kontinentalnoj kori toplinski tok na površini najveći je u područjima koja su imala magmatsku ili metamorfnu aktivnost u posljednjih 65 milijuna godina (od kenozoika do danas,  $77 \text{ mW/m}^2$ ), a taj se toplinski tok smanjuje na konstantnu vrijednost od oko  $46 \text{ mW/m}^2$  u kori starijoj od 800 milijuna godina (pretkambrij). U mladoj oceanskoj kori (< 65 milijuna godina, od kenozoika do danas) toplinski tok je veći i promjenjiviji ( $70\text{-}170 \text{ mW/m}^2$ ) nego u starijoj oceanskoj kori (> 65 milijuna godina) koja ima niži i stalniji toplinski tok (oko  $50 \text{ mW/m}^2$ ). Toplinski tok smanjuje se s godinama oceanske kore [4].

Jezgra Zemlje proteže se od 2900 do 6370 km (Zemljino središte): njezina debljina ili polumjer iznosi 3470 km. Izračuni pokazuju da jezgra mora imati gustoću od oko  $10 \text{ g/cm}^3$  na granici jezgra-plašta, povećavajući se na  $12\text{-}13 \text{ g/cm}^3$  u središtu Zemlje. Ova velika gustoća bila bi dovoljna da Zemlja dobije prosječnu gustoću od  $5,5 \text{ g/cm}^3$  (za usporedbu, gustoća kore je između  $2,7 \text{ g/cm}^3$  za granit i  $2,9 \text{ g/cm}^3$  za bazalt, a plašta između  $3,3 \text{ g/cm}^3$  u gornjem plaštu i  $5,5 \text{ g/cm}^3$  u osnovi plašta) [4].

Temperatura u jezgri može doseći i preko 5000 Celzijevih stupnjeva, a tlak u središtu Zemlje 3,6 milijuna bara (360 000 MPa). Za usporedbu, vanjska temperatura Sunca iznosi  $6000 \text{ }^\circ\text{C}$ , a unutarnja bi trebala biti oko 15 milijuna  $^\circ\text{C}$ . Tlak i izuzetno visoke temperature uzrokuju taljenje okolnih stijena, koje se tada nazivaju magma. Magma se konvekcijskim gibanjem diže prema gore, jer je lakša od čvrste stijene, gdje zagrijava stijenu i vodu u kori, ponekad i do  $370 \text{ }^\circ\text{C}$ [6, 4].

Prosječna temperatura na Zemljinoj površini varira između  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . U regiji Sjevernog pola to je približno  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , u regiji Južnog pola  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ , a u ekvatorijalnom pojasu prosječna temperatura iznosi oko  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  tijekom cijele godine [11]. Temperatura dane točke Zemljine površine uglavnom ovisi o Sunčevom zračenju i kutu s površinom na koje zračenje stiže. Utjecaj tog zračenja primjećuje se u gornjim dijelovima Zemljine kore do dubine 30 m. Na toj dubini temperatura je stalna, a nakon toga temperatura počinje rasti. Porast temperature s dubinom Zemlje naziva se geotermalni gradijent [3,11].

### 2.3. Geotermalni gradijent

Toplinski tok Zemlje rezultat je dva faktora -geotermalnog gradijenta i toplinske vodljivosti stijena. Geotermalni gradijent mjeri se u bušotinama, dok se vodljivost stijena najbolje mjeri u laboratoriju na uzorcima (nazvanim jezgrama) uzetim iz onog dijela bušotine u kojem je izmjeren gradijent[4]. Geotermalni gradijent direktno je proporcionalan toplinskom toku, i obrnuto proporcionalan toplinskoj vodljivosti, koja se mijenja s dubinom, jer se s dubinom mijenja i gustoća stijene[7].

$$G_t = \frac{T - T_0}{H} = \frac{q}{\lambda}$$

Gdje je:

$G_t$  – geotermalni gradijent [K/m]

$T$  – temperatura (izmjerena) na određenoj dubini, [K]

$T_0$  – srednja godišnja temperatura tla [K]

$H$  – dubina na kojoj je mjerena temperatura, [m]

U Zemlji se javljaju dva oblika prijenosa topline: kondukcija (provođenje) i konvekcija (strujanje) [4].

- Kondukcija (provođenje)

Provođenje ili kondukcija je spontani prijenos toplinske energije kroz tvar, iz područja više temperature u područje niže temperature, bez cjelokupnog prijenosa materijala. Čestice (molekule ili atomi) jače titraju u toplijem tijelu te postepeno predaju kinetičku energiju hladnijem tijelu. Tada se toplijem tijelu smanjuje unutarnja energija i temperatura, a hladnijem tijelu se povećavaju unutarnja energija i temperatura. Kondukcija je primarni način prijenosa topline u čvrstim tvarima. Toplina se kodnukcijom prenosi iz tijela magme prema propusnim stijinama ležišta ispunjenog tekućinama. Metali su vrlo dobri vodiči topline, dok su većina stijena relativno loši vodiči.

- Konvekcija (strujanje)

Konvekcija je uobičajeni postupak prijenosa topline u tekućinama ili plinovima, a sastoji se od kretanja vruće tekućine (tj. tekućine ili plina) s jednog mjesta na drugo. Fluidima se zagrijavanjem u pravilu smanjuje gustoća, pa se u polju sile teže zagrijani fluid diže, a hladniji spušta, tj. dolazi do strujanja uslijed razlike temperatura.

Zbog gibanja fluida konvekcija je znatno učinkovitiji proces prijenosa topline od kondukcije. U kotlu s vodom postavljenom iznad vatre, vruća voda zagrijana vatrom na

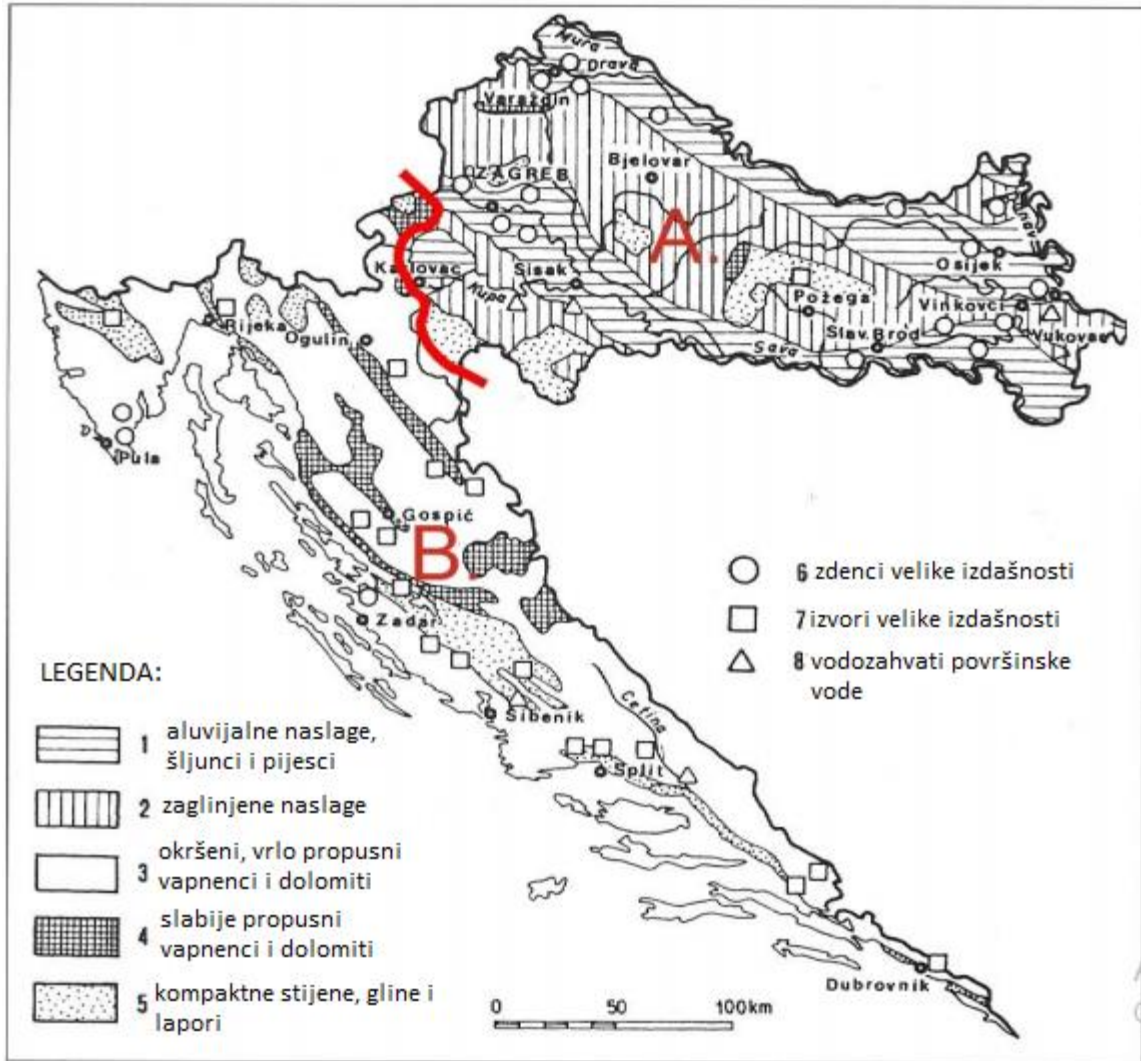
dnu kotla, podiže se na površinu blizu središta, a zatim se, hladeći se, vraća na dno kotla kako bi se ponovno zagrijala. Rezultirajuća cirkulacija, odnosno konvekcija, na kraju zagrijava svu vodu u kotlu.

Voda unutar ležišta se isto tako kreće konvekcijom, uslijed promjena gustoće uzrokovanih temperaturom, prenoseći toplinu iz najnižih dijelova ležišta u njegove gornje dijelove. Rezultat procesa konvekcije je da temperatura u gornjim dijelovima ležišta nije puno niža od temperature njegovih dubljih dijelova, tako da se najniže vrijednosti geotermalnog gradijenta zapravo nalaze unutar ležišta.

Prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta za Europsko područje iznosi  $0,03 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ . Slika 2. prikazuje kako se Republika Hrvatska dijeli na dva područja, jedno područje su Dinaridi i Jadran koji imaju geotermalni gradijent između  $0,015\text{-}0,025 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ , a drugo je Panonski dio na kojemu je geotermalni gradijent veći od  $0,04 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ . Kao što je prikazano na slici 3. Dinaridi su pretežno izgrađeni od karbonatnih stijena (vapnenca i dolomita), a Panonski dio izgrađen je od klastičnih sedimentnih stijena (konglomerat, pješčenjak, breča) [2, 12].



Slika2. Podjela Republike Hrvatske na dva geotermalno različita područja [13]



Slika3. Pregledna hidrogeološka karta Hrvatske (Mayer, 1996) [12]

## 2.4. Klasifikacija hidrotermalnih ležišta

Prema pravilniku o rezervama (NN 95/2018) propisuju se jedinstveni kriteriji klasifikacije i kategorizacije rezervi geotermalne vode za energetske svrhe. U Članku 28. pravilnika navedeno je da se pod geotermalnim vodama za energetske svrhe podrazumijevaju geotermalne vode koje se nalaze u podzemnim ležištima koja se ne napajaju, vode koje prolaze kroz podzemna ležišta i napajaju se prirodno ili umjetno utiskivanjem[14].

U članku 3. stavak (2) Zakona o vodama (NN 66/ 2018) navodi se da se odredbe Zakona o vodama odnose na geotermalne vode, osim kada je ovim Zakonom ili posebnim zakonom kojim se uređuju geotermalne vode drukčije uređeno. Zakonom su propisane i vrste zahvaćanja površinskih i podzemnih voda, uključujući izvorske, mineralne i geotermalne vode za različite namjene (za opskrbu vodom za piće, za stavljanje na tržište u izvornom ili prerađenom obliku u bocama ili drugoj ambalaži, sanitarne i tehnološke potrebe, zdravstvene i balneološke potrebe, grijanje, navodnjavanje i druge namjene)[15].

Prema članku 5. Zakona o vodama ciljevi upravljanja vodama su:

1. osiguranje dovoljnih količina zdravstveno ispravne vode za ljudsku potrošnju radi zaštite zdravlja ljudi
2. osiguranje potrebnih količina vode odgovarajuće kakvoće za različite gospodarske i osobne potrebe
3. zaštita ljudi i njihove imovine od poplava i drugih oblika štetnog djelovanja voda i
4. postizanje i očuvanje dobrog stanja voda radi zaštite života i zdravlja ljudi, zaštite njihove imovine, zaštite vodnih i o vodi ovisnih ekosustava[15].

Ne postoji standardna međunarodna klasifikacija, stoga postoji više podjela prema kojima se klasificiraju geotermalna ležišta:

- Prema stupnju istraženosti fluida
- Prema vrsti geotermalnih ležišta
- Prema temperaturi ležišnog fluida[2,3].

#### 2.4.1. Prema stupnju istraženosti fluida

U članku 29. Pravilnika o rezervama (NN 35/2018) navedeno je da se klasifikacija i kategorizacija geotermalnih voda temelji na geološko-tehnološkim osnovama te ekonomskim kriterijima [14].

Prema članku 30. Pravilnika rezerve geotermalne vode su one količine za koje se predviđa da će biti komercijalno pridobivene iz poznatih akumulacija, od određenog datuma nadalje pod poznatim uvjetima. Rezerve moraju biti otkrivene, pridobive poznatim tehnološkim metodama, komercijalne te preostale od određenog datuma nadalje.

Nadalje sve procjene rezervi uključuju određeni stupanj nesigurnosti te su stoga rezerve kategorizirane s obzirom na stupanj nesigurnosti pridobivanja koji ovisi o količini geoloških i inženjerskih podataka dostupnih za procjenu rezervi. Na temelju stupnja nesigurnosti rezerve se kategoriziraju na dokazane (1P) i vjerojatne (P2).

Uvjetovani resursi su one otkrivene i potencijalno pridobive količine geotermalne vode za koje se, trenutno, ne smatra da zadovoljavaju kriterije komercijalnosti. Uvjetovani resursi geotermalne vode po stupnju njihove istraženosti i pripremljenosti za eksploataciju svrstavaju se u dokazane (C1), i vjerojatne (C2) resurse.

Perspektivni resursi su one količine geotermalne vode za koje se smatra kako bi potencijalno mogle biti otkriveni iz nepoznatih akumulacija geotermalnih ležišta [14].

Prema članku 31. pravilnika dokazane rezerve (P1) su one količine geotermalne vode koje se analizom geoloških i inženjerskih podataka mogu procijeniti s opravdanom sigurnošću



kao komercijalno pridobive, od određenog datuma nadalje, iz poznatih ležišta, pod definiranim ekonomskim uvjetima, postojećim tehnološkim metodama i zakonskim regulativama.

Prema članku 33. pravilnika vjerojatne rezerve geotermalne vode (P2) su one količine geotermalne vode koje su procijenjene na temelju geoloških i/ili inženjerskih podataka sličnih onima koji su se koristili pri procjeni dokazanih rezervi, ali tehnički, ugovorni, ekonomski ili zakonski okviri isključuju mogućnost da te rezerve budu klasificirane kao dokazane [14].

#### 2.4.2. Prema vrsti geotermalnih ležišta

Prema vrsti geotermalna se ležišta dijele na nekoliko načina, najvažniji su [16, 2]:

1. S obzirom na način ulaska i izlaska vode iz ležišta
2. S obzirom na termodinamičke i hidrološke osobine

##### 1. Podjela s obzirom na način ulaska i izlaska vode iz ležišta

- Ulaz i izlaz su prirodni otvori
- Ulaz je prirodni otvor, a izlaz bušotine
- Ulaz i izlaz su bušotine

##### 2. Podjela s obzirom na termodinamičke i hidrološke osobine

Najčešći kriterij za klasifikaciju geotermalnih resursa temelji se na entalpiji geotermalnih fluida. Resursi se dijele na: niske, srednje i visoke entalpije (ili temperature).

Razlikuju se geotermalni sustavi kojima dominiraju voda ili tekućina i geotermalni sustavi kojima dominira para (ili suha para). Sustavi kojima dominira voda, a čije se temperature mogu kretati od <125 do> 225 ° C, najrasprostranjeniji su na svijetu. U sustavima kojima

dominiraju pare, tekuća voda i para normalno koegzistiraju u ležištu, dok je para faza koja kontinuirano regulira tlak u ležištu.

- Ležišta vruće vode
  - Glavna karakteristika ovih ležišta je tekuća voda, a moguća je i prisutnost male količine vodene pare u dijelovima ležišta pod nižim tlakom. Pri dovoljno visokim temperaturama, većim od 170°C, voda se na površini može pretvoriti u paru i direktno koristiti za pogon turbine za proizvodnju električne energije.
  
- Ležišta suhe vodene pare
  - Ležišta suhe vodene pare se rijetko nalaze, ali su najjeftinija i najjednostavnija za korištenje. Suha vodena para izravno se koristi za pokretanje parnih turbina za proizvodnju električne energije.
  
- Vruće i suhe stijene
  - U vrućim i suhim stijenama akumulirana je toplinska energija. Nalaze na većim dubinama stoga je za iskorištavanje njihove topline potrebno dovoljno duboko izdrobiti stijene kako bi se dobila dovoljno velika površina za prijelaz topline između stijene i utisnute vode. Voda se utiskuje u umjetno stvorenu bušotinu među raspucane stijene gdje se zagrijava i zatim kroz drugu bušotinu odvodi na površinu gdje se iskorištava.
  
- Ležišta tople vode pod visokim tlakom
  - Ovakva ležišta se nalaze na velikim dubinama, imaju umjerenu temperaturu i sadrže otopljeni metan. Zbog vrlo visokog tlaka pogodne su za iskorištavanje mehaničke, toplinske i kemijske energije.

### 2.1.3. Prema temperaturi ležišnog fluida

Najviše korištena podjela geotermalnih resursa je prema temperaturi ležišnog fluida koji prenosi toplinu s vrućih stijena prema površini. Niti za ovu podjelu ne postoji standardizirano mjerilo stoga se u različitim literaturama mogu naći različiti primjeri podjele kao što se vidi u tablici 1.

*Tablica 1. podjela geotermalnih ležišta prema temperaturi ležišnog fluida [2, 17]*

°C	Muffler i Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter and Cormy (1990)	Haenel i dr.	Axelsson and Gunnlaugsson (2000)
Nisko temperaturni resursi	< 90	< 125	< 100	< 150	≤ 190
Srednje temperaturni resursi	90 - 150	125 - 225	100 - 200	/	/
Visoko temperaturni resursi	> 150	> 225	> 200	> 150	> 190

### 3. Pretvorba geotermalne u električnu energiju

Iz vrućih izvora geotermalna energija koristila se za kupanje još od paleolitika, a za grijanje prostora od starih Rimljana, ali sada je poznatija po proizvodnji električne energije. U svijetu je oko 10.715 MW geotermalne energije na mreži u 24 zemlje. Dodatnih 28 GW izravnog geotermalnog kapaciteta grijanja instalirano je za daljinsko grijanje, grijanje prostora, lječilišta, industrijske procese, desalinizaciju i poljoprivredne primjene [6].

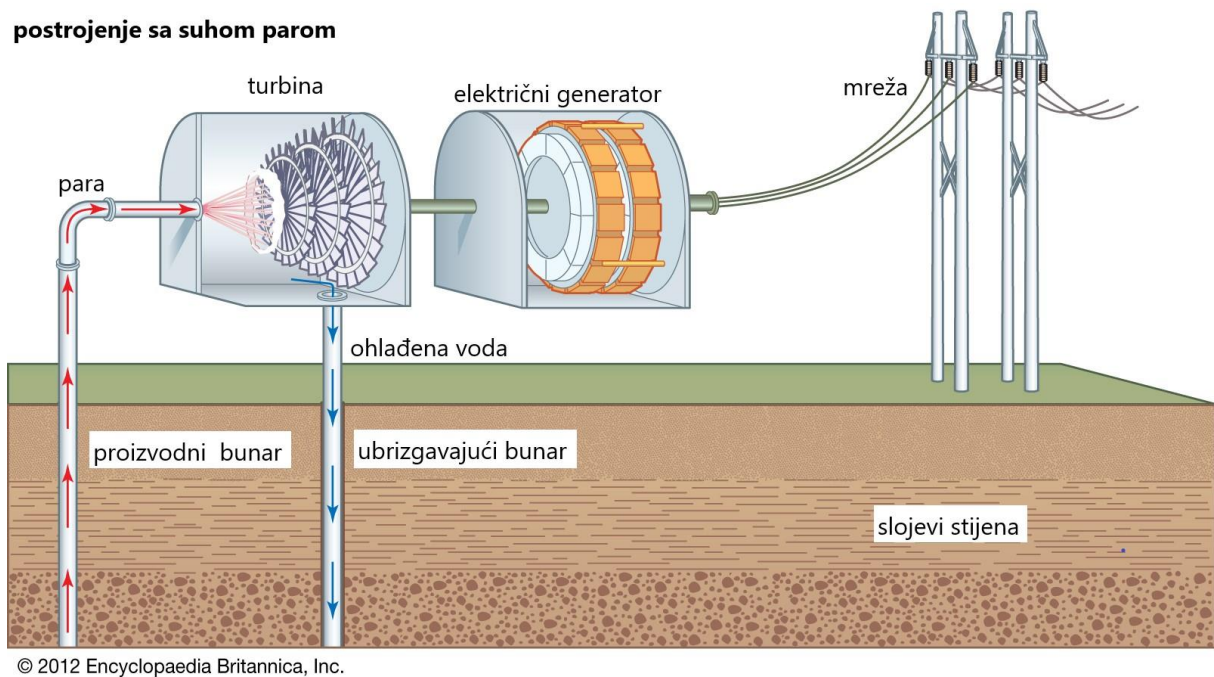
Princip rada geotermalnih elektrana temeljen je na pretvaranju toplinske energije geotermalnog fluida u kinetičku energiju rotacije turbine, koja se zatim pretvara u električnu energiju. Tri su osnovna principa rada geotermalnih elektrana [6, 16]:

- Princip suhe pare (Dry steam)
- Princip separiranja pare (Flash steam)
- Binarni princip (Binary cycle)

Unatoč razlikama u dizajnu, sva tri procesa kontroliraju paru i koriste je za pogon električnih generatora. S obzirom na to da se višak vodene pare na kraju svakog postupka kondenzira i vraća u zemlju, gdje se ponovno zagrijava za kasniju upotrebu, geotermalna energija smatra se obnovljivim izvorom energije [18].

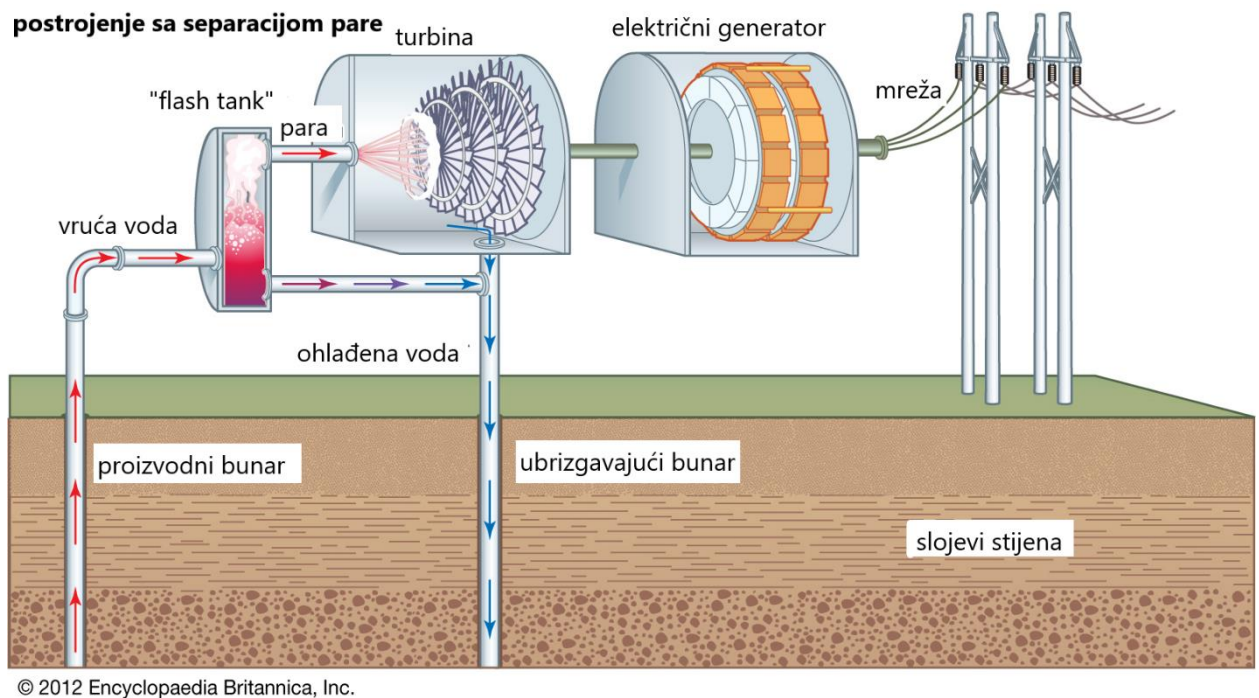
- Postrojenja sa suhom parom (dry steam)
  - Sustavi elektrana na suhu paru bili su prvi tip izgrađenih geotermalnih elektrana (prvi su se put koristili u Lardarellu u Italiji 1904. godine). Tehnologija pare i danas je učinkovita i trenutno se koristi u Gejzirima na sjeveru Kalifornije, najvećem pojedinačnom izvoru geotermalne energije na svijetu. Postrojenje sa suhom parom, prikazano na slici 4., koristi paru iz podzemnih bunara za pokretanje turbine, koja aktivira generator za proizvodnju električne energije. Kod ovog postrojenja direktno se koristi geotermalni resurs te je to najjeftiniji i

najjednostavniji princip proizvodnje električne energije pomoću geotermalne energije [6, 16].



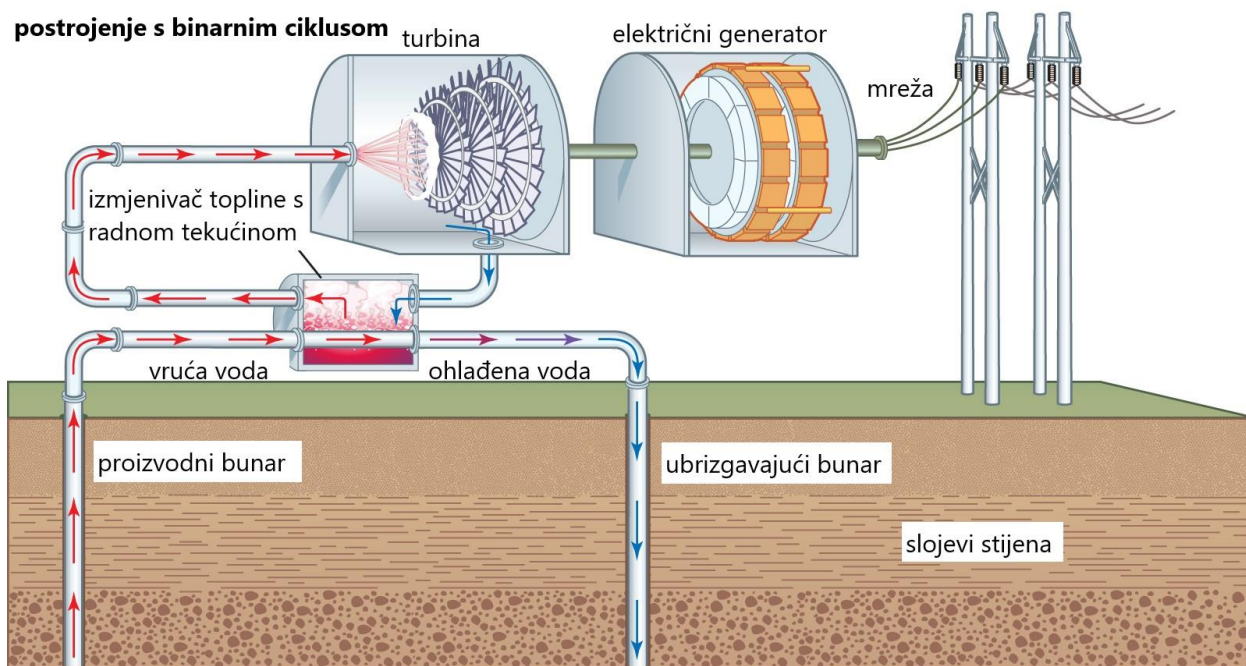
*Slika4. Postrojenje sa suhom parom [18]*

- Postrojenja sa separacijom pare (flash steam)
  - U termoelektranama koje rade na principu separiranja pare koriste se izvori s temperaturom većom od 180 °C. Kao što je prikazano na slici 5., voda se pod visokim tlakom crpi ispod površine u takozvane „flash tank“ spremnike, gdje nagli pad tlaka dovodi do toga da tekuća voda ispari u paru koja se zatim koristi za pogon turbine generatora. Ostaci vode i kondenzirane pare vraćaju se u ležište [6, 18]



*Slika5. Postrojenje sa separacijom pare [18]*

- Binarna postrojenja
  - Postrojenja s binarnim ciklusom, prikazana na slici 6., koriste toplu vodu iz rezervoara s nižom temperaturom (105 – 180°C) kako bi zagrijala radnu tekućinu, koja zatim isparava u izmjenjivaču topline i koristi za napajanje generatora. Voda, koja nikada ne dolazi u izravan kontakt s radnom tekućinom, ubrizgava se natrag u zemlju da bi se ponovno zagrijala [6].



© 2012 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Slika6. Postrojenje s binarnim ciklusom [18]

## 4. Direktna upotreba geotermalne energije

Direktna upotreba znači da se toplinska energija izravno iz Zemlje koristi za grijanje kuće ili za neku drugu primjenu. Prije više od 10 000 godina, američki Indijanci koristili su vruće izvore za kuhanje i kupanje, a drevni Rimljani u Italiji koristili su vruće izvore za kuhanje, kupanje i grijanje domova. Od tada je upotreba geotermalne energije znatno napredovala [19].

Geotermalni fluidi koji se mogu industrijski eksploatirati kreću se u rasponu od vode povećane energetske vrijednosti, vruće vode do mješavine vodene pare i konačno pregrijane pare. Direktna primjena najviše koristi mješavinu tople vode ili vodene pare.

Minimalna temperatura na kojoj se može koristiti geotermalna tekućina ovisi o temperaturi okoline na mjestu korištenja. Voda s temperaturom od 25 °C može se iskoristiti u sjevernim geografskim širinama, dok bi se u tropskim područjima smatrala hladnom. Temperatura iskorištenja se kreće između 20 i 180 °C, međutim, optimalna temperatura kreće se između 50 i 160 °C. Ove dvije krajnosti nisu definirane proizvoljno, već uzimajući u obzir sljedeće čimbenike. Minimalna temperatura za grijanje staklenika je 50 °C, korištenje geotermalnih voda na temperaturama nižim od 50 °C je ograničeno jer imaju mali ekonomski interes. Gornja granica definirana je na 160 °C, jer se iznad ove temperaturne vrijednosti geotermalna tekućina može prikladnije koristiti u sustavu "binarnog ciklusa" za proizvodnju električne energije, zagrijavajući međuprodukt kao što je izobutan [20].

U tablici 2. prikazan je način primjene geotermalne vode i potrebna temperatura za tu primjenu. Tekućine koje se koriste u direktnom načinu primjene imaju mnogo širu distribuciju u cijelom svijetu od onih pogodnih za proizvodnju električne energije jer se javljaju na gotovo svim kontinentima.



Tablica 2. Načini primjene geotermalne energije i potrebna temperatura [2]

Temperatura (°C)	Primjena geotermalne energije
180	Isparavanje visoko koncentriranih otopina
170	Proizvodnja teške vode procesom vodik-sulfid
160	Sušenje ribe u prehrambenoj industriji
150	Proizvodnja aluminijske Bayerovim procesom
140	Konzerviranje hrane
130	Isparavanje vode u šećeranama; izlučivanje soli isparavanjem i kristalizacijom
120	Dobivanje pitke vode destilacijom
110	Sušenje cementnih gredica
100	Sušenje organskih materijala, morskog raslinja, trava, povrća, te pranje i sušenje vune
90	Sušare
80	Hlađenje ( niska temperaturna granica)
60	Grijanje prostora i staklenika
50	Grijanje tla
30	Bazeni, fermentacija, odležavanje
20	Ribogojilišta i poljodjelstvo

## 5. Obnovljivost geotermalne energije

Brzina obnavljanja energije u geotermalnim sustavima najkritičniji je aspekt za klasifikaciju geotermalne energije kao obnovljivog izvora energije. Geotermalna ležišta općenito su sustavi s kontinuiranom cirkulacijom topline i tekućine, gdje tekućina ulazi u rezervoar iz zona punjenja i odlazi kroz područja ispuštanja (vrući izvori, bunari). U eksploataciji prirodnih geotermalnih sustava, dopunjavanje energije odvija se advekcijom termalne vode u isto vrijeme kad i proizvodnja iz resursa. Tijekom industrijske eksploatacije tekućine se dopunjavaju u ležište ponovnim ubrizgavanjem otpadnih tekućina iz postrojenja za iskorištavanje kroz bušotine. Ovim postupkom ponovnog ubrizgavanja može se nadoknaditi barem dio tekućine ekstrahirane proizvodnjom i do određene će granice produžiti komercijalni vijek ležišta [4, 21].

Prijenos energije unutar kore odvija se kroz tri procesa:

- ◆ advekcija magme
- ◆ advekcija geotermalne tekućine
- ◆ toplinska vodljivost [21]

Prijenos energije (topline) uz advekciju magme i termalne vode relativno je brz proces. Vremenske konstante u rasponu dana ili mjeseci prikladne su za opisivanje tih procesa. S druge strane, toplinska vodljivost relativno je spor proces gdje je za karakterizaciju procesa potrebna vremenska konstanta reda stotina godina. Korištenjem geotermalne energije iz prirodnih geotermalnih sustava prvenstveno se upravlja advekcijom toplinske tekućine u kori. Stoga je jedna godina također prikladna vremenska konstanta za geotermalnu energiju [21].

Advekcija magme i vode je brz proces transporta energije tako da geotermalna energija udovoljava svim zahtjevima da bude obnovljivi izvor energije, tj. energija se zamjenjuje na istoj vremenskoj skali kao i za vađenje energije. S druge strane ako se transport energije vrši samo toplinskom vodljivošću, teško je govoriti o "obnovljivim" izvorima energije jer je vremenska konstanta zamjene energije mnogo duža od vremenske konstante eksploatacije.

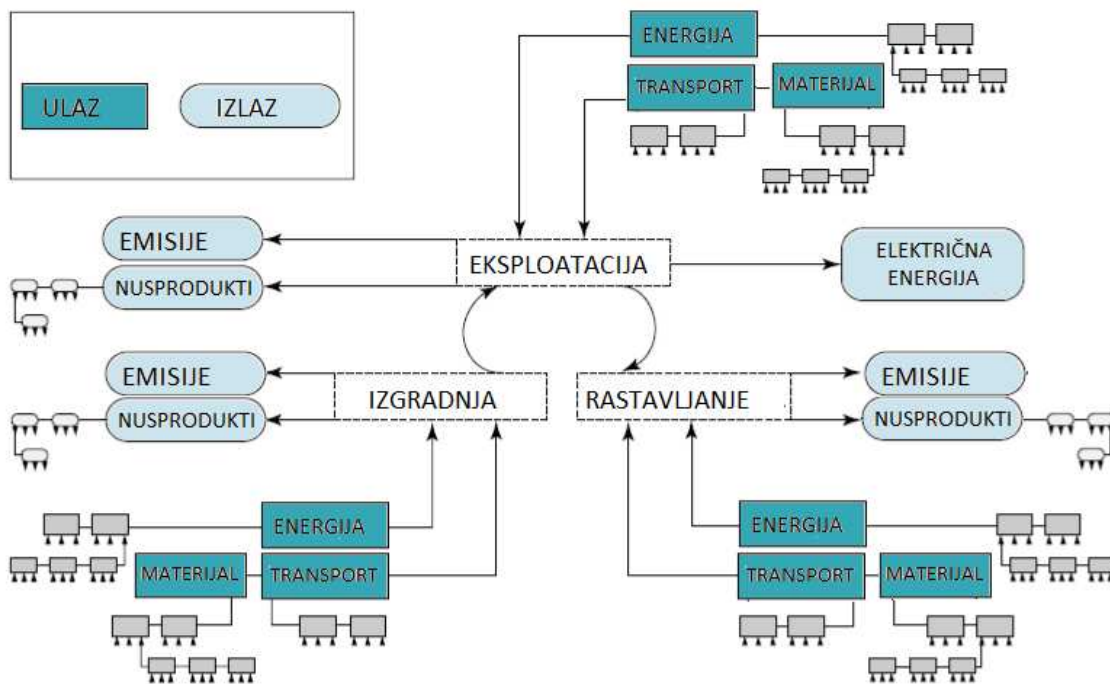
Sva konvencionalna eksploatacija geotermalne energije temelji se na ekstrakciji energije iz prirodnih geotermalnih sustava gdje voda prenosi energiju unutar i prema sustavima, a voda također prenosi energiju na površinu na kojoj se odvija korištenje. Proizvodnja uzrokuje pad tlaka u geotermalnom sustavu, što rezultira povećanim dopunjavanjem vode i energije u sustav koji se eksploatira. Ti su uvjeti tipični za obnovljive izvore energije gdje se zamjena energije odvija u sličnom vremenskom opsegu kao i ekstrakcija.

Iznimka od ovog pravila je vruća suha stijena. U ovom je slučaju ideja stvoriti umjetni geotermalni sustav u nepropusnim stijenama ubrizgavanjem vode u jednu bušotinu i izvlačenjem topline pohranjene u stijenama kroz drugu bušotinu. Zbog duge vremenske konstante postupka provođenja topline, metoda vruće suhe stijene ne može se klasificirati kao obnovljivi izvor energije. Vruća suha stijena ne obnovljivi je izvor energije, dok su prirodni geotermalni sustavi obnovljivi izvori energije [21].

## 6. Utjecaj na okoliš

Procjena životnog vijeka, LCA (*Life cycle assessment*), primjenjuje se na geotermalna postrojenja u svim fazama životnog ciklusa (izgradnja postrojenja, eksploatacija, rastavljanje postrojenja). Na temelju ovog pristupa, kvantificiraju se emisije onečišćujućih tvari, koje doprinose antropogenom efektu staklenika, zakiseljavanju i eutrofikaciji prirodnih ekosustava, kao i potrošnja konačnih energetske izvora [22].

Prilikom procjene životnog vijeka postrojenja uključuju se svi tokovi energije, na primjer, električna energija potrebna za rad bušeće platforme koju osiguravaju dizel generatori. Dizelsko gorivo proizvodi se od različitih vrsta sirove nafte. Njegova uporaba na mjestu bušenja, kao i opskrba gorivom na mjestu rezultira zračnim emisijama. Shematski prikaz toka energije prikazan je na slici 7.



Slika7.. Shematski prikaz toka energije prilikom izrade LCA studije [22]

U drugoj fazi izrade LCA studije emisije i upotreba resursa pretvaraju se u utjecaje na okoliš. To se radi uz pomoć međunarodne baze podataka o životnom vijeku (ILCA). Kategorije utjecaja na okoliš i njihove mjerne jedinice prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Kategorije utjecaja na okoliš[23]

Kategorija utjecaja	Mjerna jedinica
Zakiseljavanje/ acidifikacija	Mol H <sup>+</sup> ekv. (ekv.-ekvivalent)
Klimatske promjene	Kg CO <sub>2</sub> ekv.
Ekotoksičnost slatke vode	CTUe (usporedni toksični učinak na okoliš)
Eutrofikacija slatke vode	kg P ekv.
Eutrofikacija morske vode	kg N ekv.
Eutrofikacija zemljišta	Mol N ekv.
Toksičnost za ljude, učinci koji izazivaju rak	CTUh (usporedni toksični učinak na ljude)
Toksičnost za ljude, učinci koji ne izazivaju rak	CTUh (usporedni toksični učinak na ljude)
Ionizirajuće zračenje	Bq U-235 ekv.
Iscrpljivanje ozonskog omotača	Kg CFC-11 ekv.
Čestice / anorganske materije, utjecaj na ljudsko zdravlje	kg PM <sub>2,5</sub> ekv.
Fotokemijsko stvaranje ozona, utjecaj na ljudsko zdravlje	kg NMVOC
Iscrpljivanje resursa, minerala, fosila i obnovljivih izvora	kg Sb ekv.
Iscrpljivanje resursa, voda	m <sup>3</sup> ekv.

LCA studije provedene na različitim geotermalnim postrojenjima daju slične rezultate. Većina LCA studija govori o globalnom zatopljenju, koje je uglavnom uzrokovano potrošnjom goriva u fazi izgradnje. Izgradnja geotermalnog postrojenja ima najveći utjecaj na okoliš u cijelom životnom vijeku postrojenja. Međutim, i u fazi rada geotermalne elektrane postoje neželjene emisije u okoliš, ali su zanemarive u usporedbi s elektranama na ugljen ili prirodni plin [22–24].

Zabrinjavajuća područja u radu geotermalne elektrane na okoliš su emisije neželjenih plinova u atmosferu, unošenje neželjenih kemikalija i spojeva u okoliš, poticanje seizmičnosti, slijeganje tla, korištenje vode i korištenje zemljišta [25].

Geotermalna tekućina može uključivati značajne količine klorida, male količine bora i tragove arsena, amonijaka, žive ili teških metala, što ga čini neprikladnim za odlaganje na površinu. Problem se učinkovito rješava ponovnim ubrizgavanjem sve proizvedene geotermalne tekućine u isti duboki rezervoar iz kojeg je potekla. Ova praksa također ima koristi za dopunjavanje vode dubokog sustava, poboljšavajući održivost i ekonomski život postrojenja [26]. Međutim, kemijske promjene mogu utjecati na fizičke attribute sustava promjenom poroznosti stijene, otvora pukotina i temperature. Svako ometanje u jednom dijelu sustava odrazit će se na neku mjerljivu prilagodbu u drugim dijelovima sustava. Topljivosti minerala ovisi o temperaturi, ako se temperatura vode poveća, minerali s kojima je voda u kontaktu otopiti će se ili istaložiti. Isto tako, temperaturna ovisnost koncentracija otopljenog plina promijenit će se kao odgovor na temperaturne poremećaje, a to će zauzvrat rezultirati oslobađanjem plinova u ili apsorpcijom iz atmosfere [25].

### 6.1. Emisije u atmosferu

Vidljivi oblak koji se diže iz nekih geotermalnih elektrana zapravo su emisije vodene pare, a ne dim, a uzrokovane su isparavanjem iz rashladnog sustava. Budući da geotermalne elektrane ne sagorijevaju gorivo poput elektrana na fosilna goriva, one gotovo ne ispuštaju emisije u zrak. Sustavi hlađeni zrakom ne emitiraju vodenu paru i tako se lako stapaju u okoliš. Tijekom vodenog hlađenja, 50 % ili više geotermalne tekućine koja ulazi u rashladni toranj emitira se u atmosferu kao vodena para, dok se ostatak reciklira natrag u ležište. Geotermalne emisije vodene pare sadrže samo tragove onečišćujućih tvari koje se obično nalaze u mnogo većim količinama u emisijama elektrana na ugljen i plin. Postrojenja na ugljen opremljena scruberima i drugim tehnologijama za kontrolu emisija emitiraju 24 puta više ugljičnog dioksida, 10.837 puta više sumpornog dioksida i 3.865 puta više dušikovih oksida po MWh od geotermalnog parnog postrojenja [26].

Kod plinovitih emisija iz geotermalnih elektrana, ponašanje tri vrste plinovitih emisija posebno je važno: emisije stakleničkih plinova (posebno CO<sub>2</sub>), sumporovodik (H<sub>2</sub>S) i otrovni metali poput žive (Hg) [25].

- Vodikov Sulfid ( $H_2S$ )

Vodikov sulfid ili sumporovodik ( $H_2S$ ) prirodno se javlja u zraku i u podzemlju. U normalnim uvjetima prisutan je u zraku na razini tla od <1 dio na milijardu (1 ppb) do nekoliko stotina ppb, ovisno o lokalnim uvjetima okoliša. Vodikov sulfid je visoko reducirani sumporni spoj koji nastaje u uvjetima kada je parcijalni tlak kisika vrlo nizak. Prirodni izvori  $H_2S$  uključuju vulkanske plinove, naftne naslage, prirodni plin, geotermalne tekućine, vruće izvore i fumarole.  $H_2S$  se također može stvoriti razgradnjom kanalizacije i stajskog gnojiva, a može se emitirati iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, postrojenja za akvakulturu, mlin za proizvodnju celuloze i papira, rafinerija nafte, postrojenja za kompostiranje, mljekara i operacija stočne hrane. Također, okruženja poput močvara, u kojima je u tijeku anaerobno propadanje, mogu imati relativno visoku razinu  $H_2S$  i razlog je što takva okruženja često imaju miris po trulim jajima. U podzemlju, gdje slobodnog kisika može biti vrlo malo, sumpor se javlja kao spojevi koji su obično prilično reducirani. Minerali poput pirita ( $FeS_2$ ) i piritita ( $FeS$ ) obično su reducirani sumporni spojevi, dok je  $H_2S$  uobičajeni plinoviti oblik sumpora. Odras ovih uvjeta je da geotermalne tekućine sadrže  $H_2S$  u otopini [25, 26].

Utjecaji na zdravlje visokih koncentracija  $H_2S$  uključuju mučninu, glavobolju i nadraženost očiju. U koncentracijama od 500 ppb ili više, može uzrokovati nesvjesticu i smrt. Na razinama od 10-50 ppb većina ljudi smatra da ima jak miris pokvarenog jaja. Na razinama između 50 ppb i nekoliko stotina ppb  $H_2S$  može brzo ugasiti mirisne senzore tako da se miris ne opaža. Iz tih razloga nameću se strogi propisi o emisijama i potrebno je smanjenje ako su koncentracije iznad regulatornih granica. To može biti problem tijekom bušenja bušotine kao i tijekom izgradnje cijelog kompleksa za proizvodnju električne energije.  $H_2S$  ostaje u atmosferi oko 18 sati [25, 26].

$H_2S$  je onečišćujuća tvar koja se smatra najvećom brigom za geotermalnu zajednicu. Međutim, to se sada rutinski smanjuje na geotermalnim postrojenjima. Dva najčešće korištena sustava za smanjenje  $H_2S$  odzračnog plina su Stretford i LO-CAT. Oba sustava

pretvaraju preko 99,9 %  $H_2S$  iz geotermalnih nekondenzirajućih plinova u elementarni sumpor, koji se zatim može koristiti kao dodatak tlu i sirovina za gnojivo [26].

Kao rezultat mjera za smanjenje, geotermalne elektrane na principu suhe pare i separiranja pare proizvode minimalne emisije  $H_2S$ , a geotermalne elektrane koje koriste binarni princip ili kombinirani ciklus uopće ne emitiraju  $H_2S$ .

- Ugljični dioksid ( $CO_2$ )

Ugljični dioksid, plin bez boje i mirisa, ispušta se u atmosferu kao nusprodukt izgaranja goriva. Iako se emisije  $CO_2$  proizvode i iz prirodnih izvora, većina stručnjaka slaže se da su povećane koncentracije  $CO_2$  u atmosferi uzrokovane izgaranjem fosilnog goriva. Koncentracije u atmosferi povećale su se za približno 20% od 1960. godine. Povećanje  $CO_2$  obično se pripisuje elektranama (prvenstveno ugljenu) i emisijama vozila, a drugo krčenju šuma i promjeni namjene zemljišta. Oko 37 % ukupnog nakupljanja  $CO_2$  uzrokovano je proizvodnjom električne energije, uglavnom iz fosilnih goriva. Iako  $CO_2$  ne predstavlja izravne učinke na ljudsko zdravlje - ljudi izdišu  $CO_2$  svakim udahom - stručnjaci se općenito slažu da globalno zagrijavanje predstavlja značajne utjecaje na okoliš i zdravlje, uključujući rizike od poplava, problema s otapanjem ledenjaka, šumskih požara, povećanja razine mora i gubitka bioraznolikost [26].

Geotermalna postrojenja emitiraju  $CO_2$ , ali u malim količinama u usporedbi s emisijama iz fosilnih goriva. Neke tekućine iz geotermalnih ležišta sadrže različite količine nekih nekondenzirajućih plinova, uključujući  $CO_2$ . Geotermalna para se obično kondenzira nakon prolaska kroz turbinu. Međutim,  $CO_2$  se ne kondenzira i prolazi kroz turbinu do ispušnog sustava, gdje se zatim kroz rashladne tornjeve ispušta u atmosferu.

Topljivost ugljičnog dioksida u geotermalnim tekućinama mijenja se temperaturom tekućine i minerala duž putanje protoka. Ako na putu protoka nema karbonatnih minerala (poput kalcita ili dolomita), jedini izvori  $CO_2$  bit će atmosferski plinovi koji se nalaze u dubini ili koji oslobađaju plinove iz hladnih magmi. U slučajevima kada su karbonatni minerali



prisutni duž putanje protoka, koncentracije CO<sub>2</sub> bit će znatno veće. To znači da količina CO<sub>2</sub> koja se nalazi u geotermalnoj tekućini može varirati ovisno o mjestu, a količina CO<sub>2</sub> koja se ispušta u atmosferu može varirati ovisno o dizajnu postrojenja. To otežava generaliziranje količine CO<sub>2</sub> koja se emitira u "prosječnom" geotermalnom postrojenju. Na primjer, binarna postrojenja s zračnim hlađenjem nalaze se u sustavu zatvorene petlje i ne emitiraju CO<sub>2</sub> jer u tom sustavu geotermalne tekućine nikada nisu izložene atmosferi [25, 26].

Unatoč tim razlikama, geotermalna postrojenja će emitirati samo mali dio CO<sub>2</sub> koji emitiraju tradicionalne elektrane po MWh. Nekondenzirajući plinovi poput CO<sub>2</sub> čine manje od 5 % težine parne faze većine geotermalnih sustava. Od tih 5 %, CO<sub>2</sub> obično čini 75 % ili više kondenziranog plina po volumenu. Zbog niske razine emisije CO<sub>2</sub>, geotermalna proizvodnja električne energije trenutno sprječava emisiju 22 milijuna tona CO<sub>2</sub> godišnje u usporedbi s proizvodnjom električne energije iz ugljena [26].

- Živa (Hg)

Iako živa nije prisutna u svim geotermalnim resursima, tamo gdje je prisutna, oprema za smanjenje žive obično smanjuje emisije za 90 % ili više. Razmjerno najveći pogoni koji emitiraju živu, dva pogona u gejzirima u Kaliforniji, oslobađaju živu na razinama koje ne pokreću nikakve zdravstvene rizike prema strogim kalifornijskim propisima [26].

Većina emisija žive dolazi iz prirodnih izvora. Hg se prirodno javlja u tlima, podzemnim vodama i potocima, ali ljudska aktivnost može osloboditi dodatni Hg u zrak, vodu i tlo. Elektrane na ugljen najveći su izvor dodatnih Hg bilo kojeg izvora energije, jer se Hg koji se prirodno nalazi u ugljenu oslobađa tijekom izgaranja. Trenutno industrija ugljena doprinosi 1/3 antropogenih emisija žive. Emisije žive iz ugljena razlikuju se iz dana u dan i od postrojenja do postrojenja [26].

Emisije Hg iz elektrana predstavljaju značajan rizik za ljudsko zdravlje. Kad Hg uđe u vodu, biološki ga procesi transformiraju u vrlo otrovni oblik, metil živu, koji se nakuplja u ribama i životinjama koje jedu ribu. Ljudi su izloženi živi prvenstveno jedući ribu ili pijući kontaminiranu vodu, a posebno štetna za žene. Živa nije prisutna u svim geotermalnim resursima, a tamo gdje je prisutna upotreba tog resursa za proizvodnju električne energije

može rezultirati emisijom žive, ovisno o korištenoj tehnologiji. Budući da u binarnim postrojenjima geotermalna tekućina prolazi kroz izmjenjivač topline, a zatim se vraća u ležište, binarna postrojenja ne emitiraju živu [26].

Ublažavanje emisija žive obično se postiže metodom kondenzacije i hlađenja koja omogućuje odvajanje žive ili sorpciju žive na mineralnoj podlozi, poput ugljičnog materijala ili zeolita koji je impregniran sumporom. Takvi se sustavi lako koriste zajedno sa shemom ublažavanja sumporovodika, čime se minimiziraju troškovi inženjerstva i dizajna. Stopa smanjenja žive unutar postrojenja, koja varira ovisno o učinkovitosti apsorbera žive s aktivnim ugljenom, obično je blizu 90 % i uvijek je dovoljno učinkovita da osigura da nusproizvod sumpora nije opasan. Mediji s aktivnim ugljenom povremeno se mijenjaju i odlažu kao opasan otpad. Količina smanjenja opasnog otpada iznosi tisuće tona godišnje [25, 26].

- Čestice

Pojam čestice uključuje kapljice tekućine ili čestice dima, prašine ili letećeg pepela. Primarne čestice poput čađe ili dima potječu iz različitih izvora u kojima gorivo gori, uključujući elektrane na fosilna goriva i vozila. Sekundarne čestice nastaju kada plinovi izgorjelog goriva reagiraju s vodenom parom i sunčevom svjetlošću. Sekundarne čestice mogu tvoriti NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> i hlapljivi organski spojevi (HOS).

Čestice se emitiraju kroz puni proces proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva, posebno u rudarstvu ugljena. Učinci čestica na zdravlje uključuju iritaciju oka, astmu, bronhitis, oštećenje pluća, rak, trovanje teškim metalima i kardiovaskularne komplikacije.

Iako elektrane na ugljen i naftu proizvode stotine tona godišnje, geotermalna postrojenja gotovo ne emitiraju čestice. Vodeno hlađena geotermalna postrojenja emitiraju male količine čestica iz rashladnog tornja kao kondenzat pare kod ciklusa hlađenja. Međutim, količina čestica koja izlazi iz rashladnog tornja prilično je mala u usporedbi s postrojenjima na ugljen ili naftu koja imaju postupke gorenja u kombinaciji s rashladnim tornjevima.

- Amonijak ( $\text{NH}_3$ )

Amonijak koji se prirodno javlja ( $\text{NH}_3$ ) emitira se na niskim razinama iz geotermalnih postrojenja, a koncentrirane količine emitiraju određena postrojenja u Gejzirima. Iako je stoka odgovorna za gotovo polovicu emisija amonijaka, geotermalna energija čini manje od jedan posto emisija amonijaka. Dodatni izvori uključuju gnojiva, usjeve i sagorijevanje biomase.

- Bor (B)

Bor, element koji se nalazi u vulkanskim izvorskim vodama, ne postoji prirodno u svom elementarnom obliku, ali se obično nalazi kao mineralna sol, „boraks“, u suhim naslagama isparavanja jezera. Bor je toksičan samo kada se unose visoke koncentracije. Kad je prisutan u tlu u niskim koncentracijama, bor je bitan za normalan rast biljaka. U geotermalnim parnim sustavima bor je prisutan u pari kao visoko topljiva borna kiselina. U kombinaciji s amonijakom često stvara naslage bijele kristalne soli na opremi koja je izložena geotermalnoj pari. Zbog svoje visoke topljivosti, gotovo svi borati koji ulaze u geotermalno postrojenje otopit će se u parnom kondenzatu, gdje izlaze iz postrojenja putem rashladnog tornja ili se ubrizgavaju natrag u spremnik pare. Nova geotermalna postrojenja sada trebaju instalirati visoko učinkovite eliminatorne zanošenja za kontrolu čestica bez obzira na sadržaj bora u vodi, a ti eliminatori smanjuju emisije bora. Spojevi borove soli mogu se emitirati u zanosu rashladnog tornja, ali emisije bora uglavnom nisu regulirane, jer ne uzrokuju nikakav utjecaj na okoliš.

Tablica 4. Emisije u zrak- sažetak [26]

kg/ MWh	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	čestice
Elektrane na ugljen	1,95	4,71	993,82	1,01
Elektrane na ugljen/ emisije tijekom životnog ciklusa	3,35	6,71	Nije primjenjivo	9,21
Elektrane na naftu	1,81	5,44	758,40	Nije primjenjivo
Elektrane na prirodni plin	1,34	1,00	550	0,06
Geotermalne elektrane (flash sistem)	0	0,16	27,21	0
Geotermalne elektrane ( binarni sistem)	0	0	0	zanemarive
Geotermalni izvori ( gejziri)	0,0005	0,0001	40,28	zanemarive

Kao što je vidljivo u tablici 4. geotermalne elektrane ispuštaju vrlo malo emisija u zrak jer izbjegavaju utjecaje na okoliš povezane s izgaranjem goriva kao i one povezane s transportom i preradom izvora goriva. Geotermalne elektrane emitiraju samo NO<sub>x</sub> u tragovima, gotovo nikakav SO<sub>2</sub> ili čestice i male količine CO<sub>2</sub>. Primarna onečišćujuća tvar koju neka geotermalna postrojenja moraju umanjiti je H<sub>2</sub>S, koji je prirodno prisutan u mnogim podzemnim geotermalnim ležištima. Korištenjem napredne opreme za smanjenje emisija, emisije H<sub>2</sub>S redovito se održavaju ispod važećih standarda. Prosječne emisije životnog ciklusa u postrojenjima za ugljen znatno su veće od njihovih prosječnih operativnih emisija koje ne uzimaju u obzir učinke rudarstva, transporta, gradnje i razgradnje ugljena. Nasuprot tome, emisije životnog ciklusa iz geotermalnih postrojenja uglavnom ostaju u istom rasponu kao i operativne emisije [26].

## 6.2. Kruti i tekući otpad

Kruti otpad koji se ispušta iz geotermalnih elektrana neopasan je i u vrlo malim količinama. Navedene tvari su obično preniske da bi mogle izazvati zabrinutost ili se recikliraju kroz sustav i ne dovode u kontakt s vodom, kopnom ili zrakom.

- Arsen (As)

Arsen je u svom čistom obliku siva, kristalna krutina, ali se u različitim oblicima može naći u prirodnom okruženju u kombinaciji s drugim elementima. Arsen se proizvodi prirodno u Zemljinoj kori i može se emitirati tijekom vulkanskih erupcija. Također se proizvodi u preradi fosilnih goriva te u proizvodnji pesticida, sredstava za zaštitu drveta, stakla i drugih materijala. To je poznati karcinogen za ljude. Dodatni učinci na zdravlje uključuju upaljeno grlo, nadražena pluća, mučninu, povraćanje, smanjenu proizvodnju crvenih i bijelih krvnih stanica, abnormalni srčani ritam, oštećenja krvnih žila i abnormalnosti pigmentacije kože [26].

Geotermalna postrojenja ne proizvode visoke koncentracije arsena iako je arsen uobičajen za vulkanske sustave. Kada je arsen prisutan u geotermalnom sustavu, tipično završava u čvrstom obliku u mulju povezanom s proizvodnjom i smanjenjem hidrogen sulfata.

- Silicij i drugi otpadni proizvodi

Silicij-dioksid, bogat element koji je primarna komponenta pijeska, nusprodukt je proizvodnje geotermalne energije iz određenih ležišta slane vode. Silicij se obično odvodi, a talog silicijevog dioksida odlaže se izvan mjesta. Silicij se smatra potencijalnom opasnošću samo ako se nađe na radnom mjestu u visokim koncentracijama, ali ne predstavlja opasnost za okoliš. Silicij se nalazi u otpadnim vodama ili pročišćenim otpadnim vodama, koje su

nusproizvodi bušenja u nekim resursima. Koncentracije silicijevog dioksida dovoljno su male u geotermalnim objektima da radnici nisu u opasnosti. Ostale geotermalne otpadne vode smatraju se bezopasnim, čak ponekad i korisnim za okoliš [26].

### 6.3. Buka

Uobičajeni rad geotermalne elektrane obično proizvodi manje buke od ekvivalenta proizvedenog u blizini lišća koje suška od povjetarca, u skladu s uobičajenim standardima razine zvuka, pa se stoga ne smatra pitanjem zabrinutosti.

Zvuk se mjeri u jedinicama decibela (dB), ali se u svrhu zaštite okoliša obično mjeri u decibelima A-ponderiranim (dBA). A-ponderiranje odnosi se na elektroničku tehniku koja simulira relativni odgovor ljudskog slušnog sustava na različite frekvencije koje obuhvaćaju sve zvukove [26].

Geotermalne elektrane mogu raditi u skladu s važećim propisima i ne smatraju se smetnjama buke u okolnim stambenim zajednicama. Svi elektroenergetski objekti moraju udovoljavati lokalnim propisima o buci u skladu s fazom izgradnje i rada. Zagađenje bukom iz geotermalnih postrojenja obično se razmatra tijekom tri faze: faze bušenja i ispitivanja bušotina, faze izgradnje i faze rada postrojenja. Tijekom faze gradnje, buka se može stvoriti prilikom izgradnje bunara, prijenosnih tornjeva i elektrane. Tijekom faze rada većina buke generira se iz rashladnog tornja, transformatora i zgrade turbinskog generatora [26].

Izgradnja je jedna od najbučnijih faza geotermalnog razvoja, ali čak i građevinska buka općenito ostaje ispod 65 dBA. Zagađenje bukom povezano s fazom izgradnje geotermalnog razvoja, kao i kod većine građevina, privremeni je utjecaj koji završava kad gradnja završi.

Faza bušenja i ispitivanja bušotina u geotermalnom razvoju uglavnom ne premašuje propise o buci, oni su privremeni, a onečišćenje bukom koje proizvode nije trajno. Međutim, bušenje bunara obično se odvija 24 sata dnevno, sedam dana u tjednu. Ovo privremeno zagađenje bukom može trajati od 45 do 90 dana po bušotini. Tijekom bušenja mogu se napraviti privremeni štitnici od buke oko dijelova bušaćih postrojenja. Kontrole buke mogu se koristiti

i na standardnoj građevinskoj opremi, udarni alati mogu biti zaštićeni, a oprema za prigušivanje ispušnih plinova može se instalirati tamo gdje je to prikladno [26].

#### 6.4. Kvaliteta i upotreba vode

Geotermalna voda je vruća, često slana tekućina bogata mineralima koja se povlači iz dubokog podzemnog rezervoara. Para koja uz naglu promjenu tlaka isparava iz vruće vode koristi se za okretanje turbina i proizvodnju električne energije. Preostala voda, zajedno sa kondenziranim parom, ubrizgava se natrag u geotermalni rezervoar da bi se ponovno zagrijala. U vodeno hlađenim sustavima 50 % ili više tekućine gubi se u atmosferu u obliku pare, a ostatak se ubrizgava natrag u sustav.

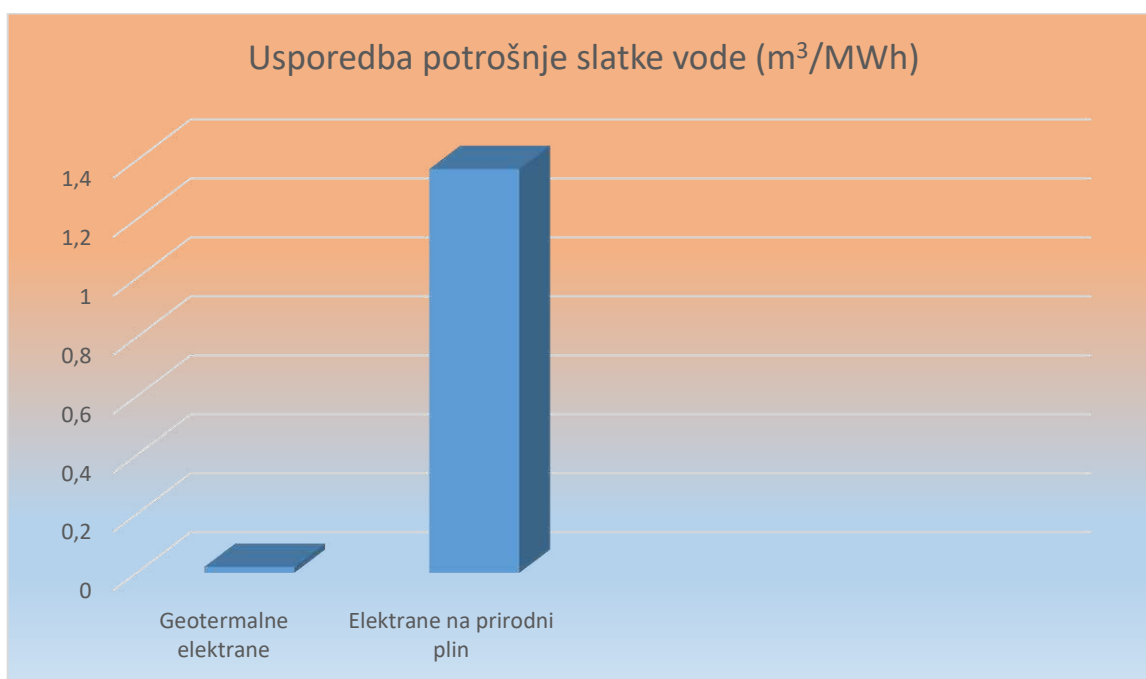
U binarnom, zračno hlađenom postrojenju, geotermalna voda se nalazi u zatvorenom sustavu, a binarne elektrane ne troše vodu. U binarnom geotermalnom postrojenju, geotermalna voda je izolirana tijekom proizvodnje, ubrizgana natrag u geotermalni rezervoar i odvojena od podzemne vode gusto zatvorenim cijevima, čineći objekt praktički bez zagađivača vode.

Većina geotermalnih ležišta nalazi se duboko pod zemljom, znatno ispod rezervoara podzemne vode. Kao rezultat, ovi duboki rezervoari gotovo da nemaju negativan utjecaj na kvalitetu i upotrebu vode. U svakom slučaju, pitka podzemna voda i čista površinska voda važni su resursi kojima je potrebno kontinuirano paziti kako raste upotreba geotermalnih resursa.

Geotermalna para i vruća voda mogu doći na površinu na dva načina: kroz prirodne površinske značajke kao što su gejziri i fumarole ili kroz umjetne bušotine koje se buše u rezervoar kako bi koristile Zemljinu energiju za električnu energiju. U oba slučaja, ove prirodne geotermalne tekućine sadrže različite koncentracije potencijalno otrovnih minerala i drugih elemenata i izuzetno su vruće kad dosegnu površinu Zemlje. Iz tih razloga, geotermalne tekućine mogu biti opasne za ljude i okolne ekosustave. To je samo jedan od razloga zašto se geotermalne tekućine koje se koriste za električnu energiju ubrizgavaju natrag u geotermalne rezervoare i ne smiju se ispuštati u površinske vodotoke [26].

U rijetkim situacijama geotermalne otpadne tekućine koje se ne ubrizgavaju natrag u sustav, nego se skladište, imaju blagotvoran učinak na okoliš. Na primjer, ubrizgavanje otpadne vode natrag u podzemne spremnike je zabranjeno na geotermalnom polju Amedee na sjeveroistoku Kalifornije jer je skladištena otpadna voda stvorila raznoliku močvaru. U drugom slučaju, u jezeru s otpadnom geotermalnom tekućinom u meksičkom geotermalnom postrojenju borave 34 vrste ptica. Islandska turistička atrakcija, Plava laguna (tirkizno jezero bogato mineralima) zapravo je stvorena geotermalnom vodom koja se ispušta iz elektrane. Plava laguna ne samo da je sigurna za kupanje, već se navodi i kao „umirujuća voda“ i kao izvor „ljekovitih moći“ [26].

Podaci o upotrebi vode u geotermalnim postrojenjima ne uključuju geotermalnu tekućinu, jer se ta tekućina ubrizgava natrag u sustav i ne povlači se iz postojećih slatkovodnih izvora. Geotermalna postrojenja koriste 0,02 m<sup>3</sup> slatke vode po MWh, dok binarne postrojenja hlađena zrakom ne koriste slatku vodu, usporedno s tim, postrojenja na prirodni plin koriste 1,37 m<sup>3</sup> po MWh [26]. Odnos upotrebe slatke vode u geotermalnim postrojenjima i postrojenjima na prirodni plin prikazanje na slici 7.



Slika7. Odnos potrošnje slatke vode u geotermalnim elektranama i elektranama na prirodni plin [26]



## 6.5. Upotreba zemljišta

Geotermalne elektrane mogu se projektirati tako da se "stapaju" sa svojom okolinom više nego mnoge druge vrste postrojenja za proizvodnju električne energije. Geotermalne elektrane koje koriste binarni princip obično ne emitiraju vidljive oblake vodene pare, a elektrane koje rade na principu separiranja pare i suhe pare proizvode minimalni vizualni utjecaj [26].

Izgradnja geotermalnog objekta najviše utječe na lokalni krajolik, ali se u većini slučajeva značajno smanjuje nakon završetka izgradnje i ispitivanja i započinjanja operacija. Faza izgradnje geotermalnog objekta obično se sastoji od dvije osnovne komponente, bušenja bušotine ili bušotina i izgradnje geotermalnog objekta. Te su građevinske komponente jednake za sve primjene, bez obzira radi li se o elektrane koje rade na binarnom principu, principu separiranja pare ili principu suhe pare [25].

Geotermalne elektrane mogu se dizajnirati tako da se uklope u okruženje i mogu se nalaziti na zemljištima višestruke namjene koja uključuju poljoprivredu, skijanje i lov. Geotermalno postrojenje koristi 404 m<sup>2</sup> zemlje po GWh, dok postrojenje na ugljen koristi 3632 m<sup>2</sup> po GWh. Dok izvori energije iz fosilnih goriva, poput ugljena, koriste velike dijelove zemlje za vađenje goriva, geotermalna postrojenja minimiziraju ukupnu količinu zemlje koja se koristi samo izgradnjom postrojenja, zajedno s brojem bunara potrebnim za potporu radu. Utjecaj razvoja i uporabe obnovljivih izvora energije na zemlju mnogo je manje štetan od utjecaja koji nastaje razvojem i korištenjem fosilnih goriva. Iskopavanje ugljena zahtijeva transport ogromnih količina prljavštine i stijena i uzrokuje poremećaje vodnih sustava odvodnjom kiselina, krčenjem šuma i oštećenjem ekosustava, dok nuklearni objekti zahtijevaju sigurno skladištenje ogromnih količina radioaktivnog otpada [26].

## 6.6. Slijeganje tla

Slijeganje tla se najčešće smatra polaganim propadanjem kopnene površine prema dolje. Ostale vrste deformacija tla uključuju gibanje prema gore (napuhavanje) i vodoravno kretanje. U nekim slučajevima slijeganje može oštetiti objekte kao što su ceste, zgrade i sustave za navodnjavanje, ili čak dovesti do potapanja komadića zemljišta u obližnja vodna tijela. Iako se može dogoditi prirodno, slijeganje se može dogoditi i kao rezultat ekstrakcije podzemnih tekućina, uključujući podzemne vode, ugljikovodike i geotermalne tekućine [26].

Povlačenje tekućine iz podzemlja bez ponovnog ubrizgavanja može utjecati na lokalnu hidrologiju i režim površinskog naprezanja. Voda u međusobno povezanim porama i pukotinama doživljava malo ili nimalo opterećenja od stijene na mjestima gdje kostur stijene ima veliku čvrstoću. U takvom slučaju jedina sila koja djeluje na vodu u dubini je od mase vode, a tlak je hidrostatski. Takva se nalazišta obično sastoje od granita, gnajsa ili druge kristalne stijene. Voda uklonjena s takvog mjesta neće imati vidljiv učinak na nadmorsku visinu površine zemljišta [25].

Stijene male čvrstoće, koje su stišljive, vršit će određenu silu na vodu u porama i pukotinama. Budući da je voda nestlačiva, vršit će odgovarajuću silu na stijenu koja može biti visoka kao litostatski tlak. U takvim okolnostima voda postaje unutarnji element podzemnog strukturnog okvira. Stijene koje se tako ponašaju obično su nekonsolidirani sedimenti, porozne vulkanske stijene ili stijene s visokim udjelom gline. Ako se voda ukloni iz takvog okruženja, gornja stijenska masa će se slegnuti, ovisno o količini uklonjene vode i stišljivosti stijene. U tim slučajevima, smanjenje tlaka pore ležišta smanjuje potporu samoj stijeni ležišta i stijeni koja prekriva ležište, što potencijalno dovodi do polagane deformacije površine kopna prema dolje. U većini područja gdje se slijeganje pripisuje geotermalnim operacijama, područje deformacije Zemlje bilo je ograničeno na samo područje bušotine i nije poremetilo ništa izvan mjesta [26, 25].

Iako se slijeganje može izazvati termičkim stezanjem ležišta uslijed ekstrakcije i prirodnog punjenja, pravilno postavljeno ubrizgavanje smanjuje mogućnost slijeganja održavanjem tlaka u ležištu. Na ležištima izgrađenim od sedimentnih stijena gdje su poroznost i propusnost

prvenstveno između zrna stijena, ubrizgavanje može uspješno ublažiti slijeganje. Slijeganje u prirodi najčešće se događa u područjima koja su tektonski aktivna, poput vulkanskih regija i zona rasjeda, a budući da se većinom i geotermalne operacije događaju na tektonski aktivnim mjestima, ponekad je teško razlikovati inducirano i prirodno slijeganje. Propadanje povezano s geotermalnim razvojem vjerojatnije je u područjima gdje se geotermalni rezervoar javlja u slabim, poroznim sedimentnim ili piroklastičnim formacijama [26].

U slučajevima kada je slijeganje uzrokovano padom geotermalnog tlaka u ležištu, ubrizgavanjem geotermalne tekućine tlak u ležištu se stabilizira i to učinkovito ublažava slijeganje.

#### 6.7. Inducirana seizmičnost

Potresna aktivnost ili seizmičnost obično je uzrokovana pomicanjem aktivnih rasjeda u tektonski aktivnim zonama. Gibanje tektonskih ploča akumulira se u stijenama u obliku tektonskih napetosti koje, kad postanu veće od graničnih vrijednosti posmične čvrstoće stijena ili postojećih rasjeda, dovode do naglog otpuštanja akumulirane energije i nastaje potres. Iako se obično javlja prirodno, seizmičnost je ponekad uzrokovana i ljudskom aktivnošću [25, 27].

Seizmička aktivnost povezana s radom geotermalne elektrane može se rezultirati iz nekoliko postupaka: ubrizgavanje hladne vode u vruće geotermalne rezervoare, crpljenje tekućine iz ležišta i ubrizgavanje tekućine pod visokim tlakom radi povećanja propusnosti ležišta. Seizmički događaji povezani s tim slučajevima bili su događaji male veličine poznatiji kao mikropotresi. Mikropotresi su potresi magnitude ispod 2 po Richteru, koje ljudi uglavnom ne osjećaju i ne smatraju se opasnostima za geotermalne elektrane ili okolne zajednice. Obično će proći nezapaženo ukoliko se u blizini ne nalaze osjetljivi seizmometri. Međutim, zabilježeni su događaji veće magnitude, najveći događaj povezan s proizvodnjom geotermalne energije bio je magnitude 4,6 na polju Gejziri u Kaliforniji 1982. godine [19, 25].

Slično poput slijeganja, seizmičnost se obično događa u područjima s visokim razinama tektonske aktivnosti, kao što su vulkanska područja i zone rasjeda. Budući da se geotermalne operacije obično odvijaju u područjima koja su također tektonski aktivna, često je teško razlikovati događaje uzrokovane geotermalnom energijom i događaje u prirodi. Mnoge regije u kojima se dogodio ili je planiran geotermalni razvoj poznate su kao područja s visokom razinom tektonske aktivnosti. U tim se krajevima često događaju potresi različite jačine [26].

#### 6.8. Pojava klizišta

Nejasno je do koje mjere geotermalni razvoj uzrokuje klizišta, jer se klizišta, koja se prirodno javljaju u određenim područjima geotermalne aktivnosti, poput vulkanskih zona, proizvode kombinacijom događaja ili okolnosti, a ne bilo kojim specifičnim djelovanjem. Iako građevinske radnje na terenu mogu "pokrenuti" klizišta, lokalni geološki preduvjeti već moraju postojati da bi došlo do odrona. Iako su klizišta rijetka, kad se pojave, dovoljno su mala da se mogu u potpunosti ograničiti na područje bušotine geotermalnog objekta. Geotermalnim područjima s opasnostima od klizišta, između ostalih tehnika upravljanja, može se pravilno upravljati detaljnim mapiranjem opasnosti, procjenom podzemnih voda i praćenjem deformacija. Budući da odroni uvijek imaju znakove upozorenja, takve tehnike osiguravaju da se klizišta mogu izbjeći na geotermalnim zemljištima [26].

#### 6.9. Gejziri i fumarole

Geotermalni izvori često se otkrivaju pod određenim kopnenim značajkama poput gejzira, fumarola, vrućih izvora, bazena s blatom, parnog tla i sedre. Gejziri su vrela izvora u kojima povremeno izbija vruća voda, para ili plin, dok fumarole ispuštaju plin i paru. Riječ "gejzir" potječe od islandske riječi "geysir", što znači "petrolejski izvor" [26].

Postoji zabrinutost da će se takva obilježja zemljišta drastično izmijeniti ili uništiti kao rezultat geotermalnog razvoja. Međutim, kroz evoluciju geotermalnog razvoja, projektanti

geotermalnih elektrana došli su do najbolje prakse upravljanja kojima se smanjuje utjecaj površinskih svojstava i primijenili su preventivne mjere ublažavanja koje smanjuju potencijalni utjecaj na površinske značajke prije nego što se pojave. Uz to, zakonski su propisani programi praćenja značajnih površinskih obilježja, a zabranjen je geotermalni razvoj u područjima na kojima površinske značajke mogu biti negativno pogođene [26].

#### 6.10. Utjecaj na floru i faunu

Geotermalna postrojenja predstavljaju minimalan utjecaj na životinje i vegetaciju u okolici u usporedbi s postrojenjima na fosilna goriva, poput ugljena. Ponekad se geotermalni objekti moraju graditi u osjetljivijim područjima od elektrana na ugljen, međutim, povećana osjetljivost dovodi do pojačanog nadzora na tim područjima. Prije nego što gradnja geotermalnog postrojenja može početi, potreban je pregled okoliša kako bi se kategorizirali potencijalni učinci na biljke i životinje. Iako bilo koji poremećaj zemljišta koji nastane izgradnjom elektrane može poremetiti stanište, geotermalna postrojenja, poput bilo koje vrste elektrane, moraju biti u skladu s mnoštvom propisa koji štite područja koja su predviđena za razvoj [26].

Geotermalna postrojenja dizajnirana su tako da minimaliziraju potencijalni učinak na divlje životinje i vegetaciju: cijevi su izolirane kako bi se spriječili toplinski gubici, elektrane su ograđene kako bi se spriječio pristup divljim životinjama, postavljaju se sustavi za zadržavanje izlivanja koji mogu zadržati 150 posto potencijalnog maksimalnog izlivanja na mjestu i izbjegavaju se područja s visokim koncentracijama divljih životinja ili vegetacije specifičnih za to područje. Budući da geotermalna postrojenja izbjegavaju velik dio dodatnih poremećaja uzrokovanih rudarstvom ugljena i izgradnjom cesta za njegov transport, izgradnja geotermalnog postrojenja smanjuje ukupni utjecaj divlje životinje i vegetaciju. Tipično postrojenje za ugljen od 500 MW može ugroziti 21 milijun ribljih jaja, ribljih ličinki i malih riba samo iz upotrebe vode tijekom normalnog rada, jer se za njega izvlači 8,3 milijuna m<sup>3</sup> vode potrebne svake godine za stvaranje pare za pokretanje turbina iz obližnjih vodnih tijela bogatih ribljim vrstama. Staništa mnogih vrsta ograničena su izgradnjom cesta

ili su potpuno eliminirana rudarskim aktivnostima povezanim s proizvodnjom fosilnih goriva [26].

## 7. Zaključak

Geotermalna energija je stalni, obnovljivi izvor energije koji se može koristiti za proizvodnju električne energije, a pokazala se vrijednom i u raznim neelektričnim primjenama gdje su potrebne niže temperature.

Utjecaji geotermalnih izvora na okoliš ovise o smještaju postrojenja, tipu postrojenja, njegovoj veličini i korištenoj tehnologiji. Za razliku od postrojenja koja koriste fosilna goriva, geotermalna postrojenja ne zauzimaju puno prostora, ne zahtijevaju transport i skladištenje materijala, nema sagorijevanja goriva, a emisija plinova je zanemariva. Postrojenje bazirano na binarnom principu ima najmanji utjecaj na okoliš jer geotermalni fluid ne dolazi u kontakt s atmosferom i nema nikakvih emisija u okoliš.

Cilj mora biti izbjegavanje ili minimiziranje negativnih utjecaja na okoliš tijekom svih faza geotermalnog postrojenja (npr. gradnja, eksploatacija i rastavljanje) te zadovoljavanje ciljeva i zahtjeva zaštite klime i okoliša, očuvanja prirode i očuvanja konačnih resursa.

Geotermalna energija može pružiti čist, pouzdan i bogat obnovljiv izvor energije za svijet.

## 8. Literatura

- [1] Z. Salameh, “Emerging Renewable Energy Sources,” *Renew. Energy Syst. Des.*, pp. 299–371, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-374991-8.00005-2.
- [2] R. Bošnjak and Suradnici, “SCAN GEOEN\_program korištenja geotermalne energije.pdf.” Energetski institut “Hrvoje Požar,” 1998.
- [3] “Iskorištavanje geotermalne energije u energetici.” <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/67-iskoristavanje-geotermalne-energije-u-energetici?showall=1> (accessed Sep. 24, 2020).
- [4] E. Barbier, “Nature and technology of geothermal energy: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 1, no. 1–2. Elsevier Ltd, pp. 1–69, Mar. 01, 1997, doi: 10.1016/S1364-0321(97)00001-4.
- [5] S. Kumar, S. K. Gupta, and M. Rawat, “Resources and utilization of geothermal energy in India: An Eco - friendly approach towards sustainability,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2019, vol. 26, pp. 1660–1665, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.347.
- [6] N. El Bassam, P. Maegaard, and M. L. Schlichting, “Geothermal Energy 12.,” in *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities*, 2013, pp. 185–192.
- [7] M. Golub and T. Kurevija, “ISKORIŠTAVANJE GEOTERMIJSKIH LEŽIŠTA,” 2008.
- [8] X. Gao, J. Wang, and R. N. Horne, “Downhole measurement of enthalpy in geothermal wells – An analytical, experimental and numerical study,” *Geothermics*, vol. 88, p. 101902, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101902.
- [9] J. Ravenščak, “Proizvodni kapaciteti hidrotermalnih ležišta Republike Hrvatske.” Accessed: Nov. 04, 2020. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:714010>.
- [10] F. Bošnjaković and K. F. Knoche, *Technische Thermodynamik Teil I*. 1998.



- [11] P. Variations, “6. Temperature and Thermal Processes in the Earth,” *Int. Geophys.*, vol. 1, no. C, pp. 121–148, 1959, doi: 10.1016/S0074-6142(08)62732-1.
- [12] D. Aljinović and B. Tomljenović, “Podzemne i površinske vode,” 2015.
- [13] S. Borović and I. Marković, “Utilization and tourism valorisation of geothermal waters in Croatia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 52–63, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.022.
- [14] “Pravilnik o rezervama.” [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_10\\_95\\_1848.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_10_95_1848.html) (accessed Jun. 24, 2021).
- [15] H. Sabor, *NN 66/2019 Zakon o Vodama*. 2019.
- [16] “Geotermalna energija,” Čakovec, 2010. [Online]. Available: <http://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/6-geotermalna.pdf>.
- [17] S. Jalilinasrabady and R. Itoi, “Exergetic Classification of Geothermal Resources in Japan,” *undefined*, 2015.
- [18] J. W.Lund, “geothermal energy | Description, Uses, History, & Pros and Cons | Britannica.” <https://www.britannica.com/science/geothermal-energy> (accessed Nov. 04, 2020).
- [19] A. Wachtel, *Energy Today: Geothermal Energy*. 2009.
- [20] E. Barbier and M. Fanelli, “Non-electrical uses of Geothermal energy,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 73–103, 1977, doi: 10.1016/0360-1285(77)90009-0.
- [21] V. Stefansson, “The renewability of geothermal energy,” *World Geotherm. Congr.*, pp. 883–888, 2000.
- [22] Huenges, *Geothermal energy systems exploration development utilization*. .
- [23] A. Paulillo, A. Striolo, and P. Lettieri, “The environmental impacts and the carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant,” *Environ. Int.*, vol. 133, no. June, p. 105226, 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.105226.
- [24] C. Tomasini-Montenegro, E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, R. J. Romero, and E.

- Santoyo, “Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 1119–1136, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.074.
- [25] William E. Glassley, *Geothermal Energy\_ Renewable Energy and the Environment- CRC Press (2010)*. 2010.
- [26] J. Wesseler and R. Smart, “Environmental impacts,” *Socio-Economic Considerations Biotechnol. Regul.*, pp. 81–95, 2014, doi: 10.1007/978-1-4614-9440-9\_6.
- [27] “potres | Hrvatska enciklopedija.” <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49792> (accessed Jun. 24, 2021).

## 9. Popis slika

Slika1. Prikaz infiltriranja kišnice u podzemni rezervoar [5] .....	3
Slika2. Podjela Republike Hrvatske na dva geotermalno različita područja [12] .....	10
Slika3. Pregledna hidrogeološka karta Hrvatske (Mayer, 1996) [11] .....	11
Slika4. Postrojenje sa suhom parom [17] .....	18
Slika5. Postrojenje sa separacijom pare [17] .....	19
Slika6. Postrojenje s binarnim ciklusom [17] .....	20
Slika7.. Shematski prikaz toka energije prilikom izrade LCA studije [21] .....	25
Slika7. Odnos potrošnje slatke vode u geotermalnim elektranama i elektranama na prirodni plin [25].....	37

## 10. Popis tablica

Tablica 1. podjela geotermalnih ležišta prema temperaturi ležišnog fluida [2][16] .....	16
Tablica 2. Načini primjene geotermalne energije i potrebna temperatura [2] .....	22
Tablica 3. Kategorije utjecaja na okoliš[22] .....	26
Tablica 4. Emisije u zrak- sažetak [25].....	33

## 11. Popis kratica i mjernih jedinica

Entalpija - termodinamička funkcija stanja ravnoteže termodinamičkog sustava,  $H=U+pV$ ,  $p=\text{const.}$ ,  $V=\text{const.}$  [kg/kJ]

Unutarnja energija - molekule u toplinskom gibanju imaju kinetičku energiju, a zbog međusobnih privlačenja, odnosno odbijanja, imaju i potencijalnu energiju. Ukupan zbroj kinetičkih i potencijalnih energija molekula nekog čvrstog tijela, tekućine ili plina naziva se unutarnja energija,  $U$  [J].

Ekv.- ekvivalent- stvar, čin, pojam ili veličina istog značenja ili iste praktične vrijednosti prema drugoj stvari.

CTU (Clinical trials units) - Jedinice za klinička ispitivanja su specijalizirane biomedicinske istraživačke jedinice koje osmišljavaju, centralno koordiniraju i analiziraju klinička ispitivanja i druge studije.

CTU<sub>e</sub> → usporedni toksični učinak na okoliš

CTU<sub>h</sub> → usporedni toksični učinak na ljude

ppb.- Parts per billion, 1ppb = 1mg/L

ppm.- Parts per million, 1ppm = 1μg/L

LCA - Life cycle assessment- procijena životnog vijeka proizvoda

$\lambda$  - toplinska vodljivost, [W/m K]

$c$  - specifična toplina, [J/kg K]

$a$  - temperaturna vodljivost ili difuznost, [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  - gustoća, [kg/m<sup>3</sup>]

$q$  - toplinski tok, [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda$  - koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

$G_t$  - vertikalni geotermalni gradijent, [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ]

$E$  - količina topline koja je prošla kroz površinu  $A$ , [ $\text{J}$ ]

$h$  - debljina sloja, [ $\text{m}$ ]

$A$  - površina kroz koju prolazi toplinski tok, [ $\text{m}^2$ ]

$\tau$  - vrijeme prolaženja toplinskog toka, [ $\text{s}$ ]

$R$  - plinska konstanta ( $8.314$  [ $\text{J}/\text{mol K}$ ])

$T$  - apsolutna temperatura [ $\text{K}$ ]

$p$  - tlak [ $\text{Pa}$ ]

$v$  - volumen [ $\text{m}^3$ ]