

# Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske

---

**Bunić, Mateja**

**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:130:361210>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MATEJA BUNIĆ

TEHNOEKONOMSKA PROCJENA HIDROTERMALNIH  
LEŽIŠTA HRVATSKE

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20. 09. 2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će izvršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06. 09. 2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Saupš Kovač

### Članovi povjerenstva

- 1) prof. dr. sc. Miroslav Golub
- 2) Dr. sc. Dragana Dogančić
- 3) izr. prof. dr. sc. Ivana Kovač
- 4) Doc. dr. sc. Jelena Lobotec

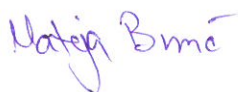
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

TEHNOEKONOMSKA PROCJENA HIDROTERMALNIH LEŽIŠTA HRVATSKE

KANDIDAT:  
Mateja Bunić



MENTOR:  
Prof. dr.sc. Miroslav Golub

NEPOSREDAN VODITELJ:  
Dr.sc. Dragana Dogančić

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MATEJA BUNIĆ  
Matični broj: 272 - 2019./2020.  
Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

TEHNOEKONOMSKA PROCJENA HIDROTERMALNIH LEŽIŠTA HRVATSKE

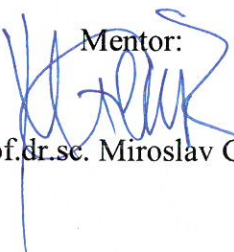
Rad treba sadržati:


1. Uvod
2. Hidrotermalna ležišta
3. Primjena geotermalne energije
4. Tehnički potencijal hidrotermalnih ležišta u Hrvatskoj
5. Ekonomske karakteristike
6. Utjecaj na okoliš
7. Rasprava
8. Zaključak

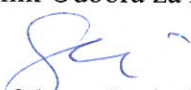
Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 14.04.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:  
  
Prof.dr.sc. Miroslav Golub

Neposredni voditelj:  
  
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:

**Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske**

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, 1.9.2021.

Mateja Bunić  
(Ime i prezime)

Mateja Bunić  
(Vlastoručni potpis)

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

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

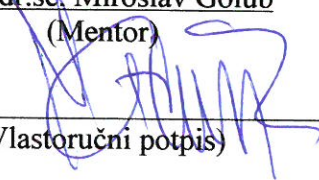
### Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske

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, 1.9.2021.

Prof.dr.sc. Miroslav Golub

(Mentor)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK RADA

Autor: Mateja Bunić

Naslov rada: Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske

Geotermalna energija iskorištavana je za rekreacijske svrhe tisućljećima, ali samo za proizvodnju električne energije nešto više od stoljeća. Iako je geotermalna energija jedinstvena među obnovljivim izvorima energije zbog svojih osnovnih mogućnosti i mogućnosti opskrbe toplinom iz obnovljivih izvora, njezino iskorištavanje i dalje znatno zaostaje za drugim obnovljivim izvorima. To se uglavnom može pripisati nesigurnostima u pogledu raspoloživosti resursa u slabo istraženim ležištima i financijskim izdacima u ranoj fazi istraživanja. Napredak u tehnikama karakterizacije ležišta počinje sužavati granice nesigurnosti istraživanja, kako poboljšanjem procjena geometrije i svojstava ležišta, tako i pružanjem procjena temperature na dubini prije bušenja. Napredak u tehnologijama bušenja i upravljanju potencijalno mogu znatno smanjiti početni kapital, dok se operativni troškovi dodatno smanjuju učinkovitijim upravljanjem ležištem i sve učinkovitijim sustavima za pretvorbu energije. Povećana svjesnost o blagodatima geotermalne energije, te sve veći tehnološki napredak mogu dovesti do toga da geotermalna energija postane glavna vrsta obnovljivih izvora.

Ključne riječi: obnovljivi izvori, geotermalna energija, hidrotermalna ležišta, tehničke karakteristike, ekonomske karakteristike



## Abstract

Author: Mateja Bunić

Title: Technical and economic assessment of hydrothermal energy in Croatia

Geothermal energy has been used for recreational purposes for millennia, but its exploitation for generating electricity started just over a century ago. Although geothermal energy is unique among renewable energy sources due to its basic capabilities and the ability to supply heat from renewable sources, its exploitation still significantly falls behind other renewable sources. This can be mainly attributed to uncertainty regarding the availability of resources in poorly explored deposits and financial expenditures at an early stage of exploration. Advances in reservoir characterization techniques are beginning to narrow the limits of exploration uncertainty, both by improving the estimates of reservoir geometry and properties and by providing temperature estimates at depth before drilling. Advances in drilling and management technologies can potentially significantly reduce start-up capital, while operating costs are further reduced by more efficient reservoir management and increasingly efficient energy conversion systems. Increased awareness of the benefits of geothermal energy along with technological advances can lead to geothermal energy becoming a major type of a renewable energy technology.

Keywords: renewable sources, geothermal energy, hydrothermal deposits, technical characteristics, economic characteristics

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Hidrotermalna ležišta.....	3
2.1. Podjela hidrotermalnih ležišta .....	3
2.2. Geološka struktura Hrvatske .....	4
3. Primjena geotermalne energije.....	6
3.1. Električna energija .....	6
3.2. Toplinska energija.....	7
3.3. Toplinske crpke.....	8
4. Tehnički potencijal hidrotermalnih ležišta u Hrvatskoj .....	10
4.1. Toplinska vodljivost.....	11
4.2. Geotermalni gradijent.....	13
4.3. Toplinski tok.....	13
4.4. Karta temperatura u Hrvatskoj .....	14
4.5. Iskorištavanje geotermalnog potencijala u Hrvatskoj.....	15
4.6. Trenutno iskorištavanje potencijala .....	17
4.6.1. Geotermalno polje Zagreb .....	19
4.6.2. Velika Ciglena .....	21
4.6.3. Draškovec .....	23

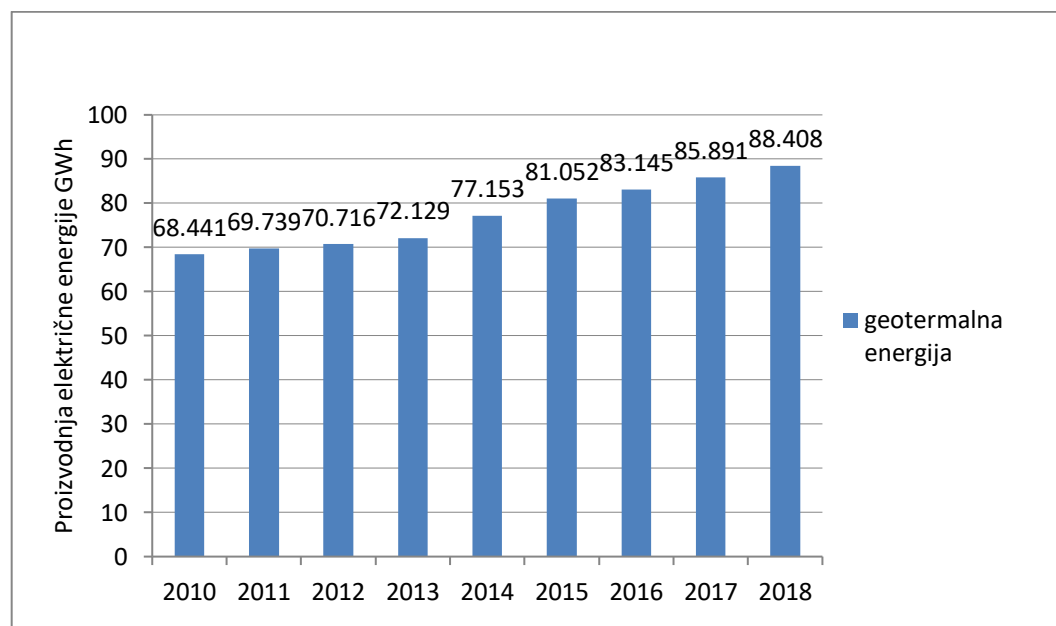
4.6.4. Lunjkovec- Kutnjak .....	24
4.6.5. Bizovac .....	25
5. Ekonomske karakteristike.....	25
5.1. Troškovi istraživanja i potvrđivanja geotermalnog ležišta .....	26
5.2. Troškovi razvoja geotermalnog projekta.....	27
5.3. Operativni troškovi i troškovi održavanja .....	28
5.4. Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske.....	29
6. Utjecaj na okoliš .....	32
7. Rasprava.....	36
8. Zaključak.....	41
Literatura.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Popis slika.....	47
Popis tablica.....	48
Popis kratica.....	49

## 1. Uvod

Povećanje populacije i unaprjeđenje društvenog i ekonomskog razvoja dovodi do sve većeg opterećenja okoliša i njegovih sastavnica, stoga se posljednjih desetljeća pokreće niz inicijativa, strategija, direktiva i zakona kojima se potiče i usmjerava na iskorištavanje obnovljivih izvora. S obzirom na veliki porast potrošnje energije potreban je alternativan način opskrbe energije koji nije štetan za okoliš i klimu. Ponajviše se misli na izbjegavanje primjene fosilnih goriva koja su uzročnici povećanja koncentracije stakleničkih plinova i uzrokuju klimatske promjene. Direktivom o promicanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora energije (Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable source) [1] formirani su strateški ciljevi zahtijevaju ostvarivanje određenog udjela obnovljivih izvora energije do 2020. Od Europske unije, Direktivom 2009/28/EC, zahtijeva se smanjenje stakleničkih plinova u odnosu na referentnu 1990. godinu za 20%, te povećanje obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije za 20% i povećanje energetske učinkovitosti za 20%. Takozvana Strategija „20-20-20“ pridonijela je korištenju manje onečišćujućih tehnologija potpomognuto sufinanciranjem EU i omogućila ostvarivanje ciljeva zemalja. Razvijeni su i daljnji klimatski i energetske planovi do 2030. i 2050. godine kako bi se mogao mjeriti napredak i ostvarivanje ciljeva. Ciljevi do 2030. godine iziskuju smanjenje ispusta stakleničkih plinova u odnosu na 1990. godinu za 40%, povećanje energije iz obnovljivih izvora na najmanje 27% u ukupnoj potrošnji te povećati energetske učinkovitost od 27% do 30% [2].

Geotermalna energija jedan je od gotovo neiscrpnih resursa obnovljivih izvora energije. Definira se kao toplinska energija koja prirodno nastaje u unutrašnjosti Zemlje uglavnom raspadanjem radioaktivnih elemenata kalija, urana i torija [3]. Geotermalna energija pojavljuje se na površini Zemlje kao prirodan vrući izvor, te su je ljudi instinktivno iskorištavali još od davnina. Kao prirodna para i vruća voda, desetljećima se iskorištava za javna kupališta, proizvodnju električne energije, kako za grijanje prostora, tako i za industrijske procese.

Obnovljivi izvori energije, prema zadnjim podacima International Renewable Energy Agency, za 2018. godinu čine oko 18% u ukupnoj potrošnji energije u svijetu. Od čega oko 10% otpada na moderne obnovljive izvore, u koje se ubraja i geotermalna energija, te od tih 10% ona čini 0,15%. Bez obzira na vrlo nizak postotak geotermalne energije u ukupnoj potrošnji energije interes za razvoj geotermalnih projekata posljednjih godina je u porastu, kao i instalirali kapaciteti geotermalnih postrojenja i proizvodnju električne i toplinske energije iz geotermalnih ležišta [4]. Od 2010. do 2018. godine u svijetu je proizvodnja električne energije iz geotermalne energije u porastu za oko 29% što je prikazano na slici 1. U Hrvatskoj od ukupne potrošnje energije od 91 920 TJ na geotermalnu energiju otpada 355 TJ, odnosno samo 1% od ukupne potrošnje energije [5].



Slika 1. Proizvodnja električne energije 2010.-2018. [5].

Obnovljivi i niskougljični uvjeti geotermalne energije jedan su od najvažnijih poticaja za veće iskorištavanje njezinog potencijala kao čistog izvora energije. Sve većim napretkom i razvojem tehnologije postaje sve isplativija, a trenutno velika početna ulaganja postupno opadaju.

## 2. Hidrotermalna ležišta

Unutrašnjost Zemlje ima temperaturu oko 5000°C (Slika 2) [3]. Radijalno prema zemljinoj površini temperatura pada s gradijentom prosječno 30°C/km što dovodi do protoka topline u prosjeku od 65 W/km<sup>2</sup>. Oko 20% protoka energije dolazi iz pohranjene energije u unutrašnjosti zemlje, dok oko 80% protoka energije proizlazi iz procesi raspadanje prirodnih izotopa (kalija, urana i torija) u Zemljinoj kori [6].

Geotermalno ležište može se definirati kao „spremnik“ toplinske energije unutar Zemlje iz kojeg je moguće dobiti toplinsku energiju, koja se koristi u razne svrhe, na ekonomičan način. Ležišta karakterizira njihova dubina, debljina, opseg, svojstva stijena, temperatura fluida, poroznost i propusnost stijena [7].



Slika 2. Raspodjela temperature po dubini [3].

### 2.1. Podjela hidrotermalnih ležišta

Kada se fokusira na iskorištavanje geotermalne energije, najznačajnija podjela ležišta je ono prema temperaturi. Odnosno, podjela prema termodinamičkim i hidrološkim obilježjima:

- ležišta vruće vode su ležišta u kojima je tekuća voda kontinuirana i određuje tlak u ležištu, te je voda pod normalnim temperaturnim

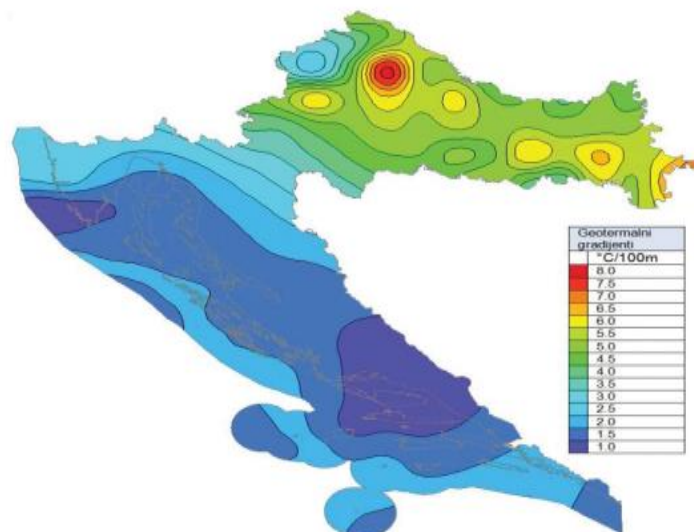
gradijentom i na malim dubinama, moguća je pojava malih količina vodene pare u obliku mjehurića na dijelovima malih dubina, većina ležišta pripada ležištima vruće vode.

- ležišta suhe vodene pare karakteristična su za područja s izraženim vulkanizmom, imaju visok temperaturni gradijent te su vrlo rijetka, ali najjednostavnija i najprofitabilnija za korištenje [7], [8].
- Ležišta suhих i vrućih stijena su ležišta u kojima je toplina pohranjena u stijenama na većim dubinama (oko 5km). Da bi se izvukla toplina potrebno je razbijati stijene i zatim se toplina izvlači iz pukotina stijena, ta metoda smatra se ekonomski neisplativom [7], [8].
- ležišta tople vode pod visokim tlakom (geotlačna geotermalna ležišta) nalaze se na velikim dubinama, temperatura se kreće od 140°C do 180°C, nalaze se na velikim dubinama i sadrže otopljeni metan i ugljikov dioksid, te je zbog visokog tlaka moguće iz ležišta iskorištavati kemijsku, mehaničku i toplinsku energiju [7], [8].

## 2.2. Geološka struktura Hrvatske

Tri tipa geološke strukture koje pogoduju geotermalnoj energiji su: vulkanska područja s temperaturom preko 200°C, rubovi tektonskih ploča koji su izgrađeni od nepropusnih stijena s temperaturom većom od 100°C i taložni bazenski prostori izgrađeni od sedimentnih stijena, gdje je mineralizirana voda pod većim tlakom od hidrostatskog. S obzirom na geološku građu Hrvatska se dijeli na dva dijela, Dinaride koji obuhvaćaju južnu i jugozapadnu Hrvatsku građenu pretežito od karbonatnih stijena i Panonski dio koji obuhvaća sjevernu Hrvatsku koja pretežito sadrži sedimentne stijene. Najveći geotermalni potencijal nalazi se u Panonskom dijelu zbog povoljnih geoloških uvjeta. No, i na Dinarskom području ima geotermalnih ležišta. Prosječni geotermalni gradijent u Panonskom dijelu iznosi 0,049°C/m i površinski toplinski tok od 76 mW/m<sup>2</sup>, dok toplinski gradijent na Dinarskom dijelu iznosi 0,018°C/m, a površinski toplinski tok 29 mW/m<sup>2</sup> [6]. Razlika gradijenta je posljedica dubine Mohorovičićevog

diskontinuiteta, tj. granice Zemljine kore i plašta. Na Panonskom dijelu dubina do diskontinuitet varira između 22-27km, dok na području Dinarida varira između 32-46km (Slika 3) [6]. Budući da se konvekcijom iz plašta toplina prenosi učinkovitije nego u kori, područja gdje je plašt bliži površini imaju veći toplinski tok, što je razlog tome da je u panonskom dijelu najveći geotermalni potencijal [6]. Također, na stvaranje topline utječe već navedeno raspadanje radioaktivnih izotopa. U odnosu na geotermalni gradijent Europe koji iznosi  $0,030^{\circ}\text{C}/\text{m}$  može se zaključiti kako panonski dio Hrvatske s geotermalnim gradijentom  $0,049^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ima visok geotermalni potencijal i predispozicije za iskorištavanje geotermalne energije.

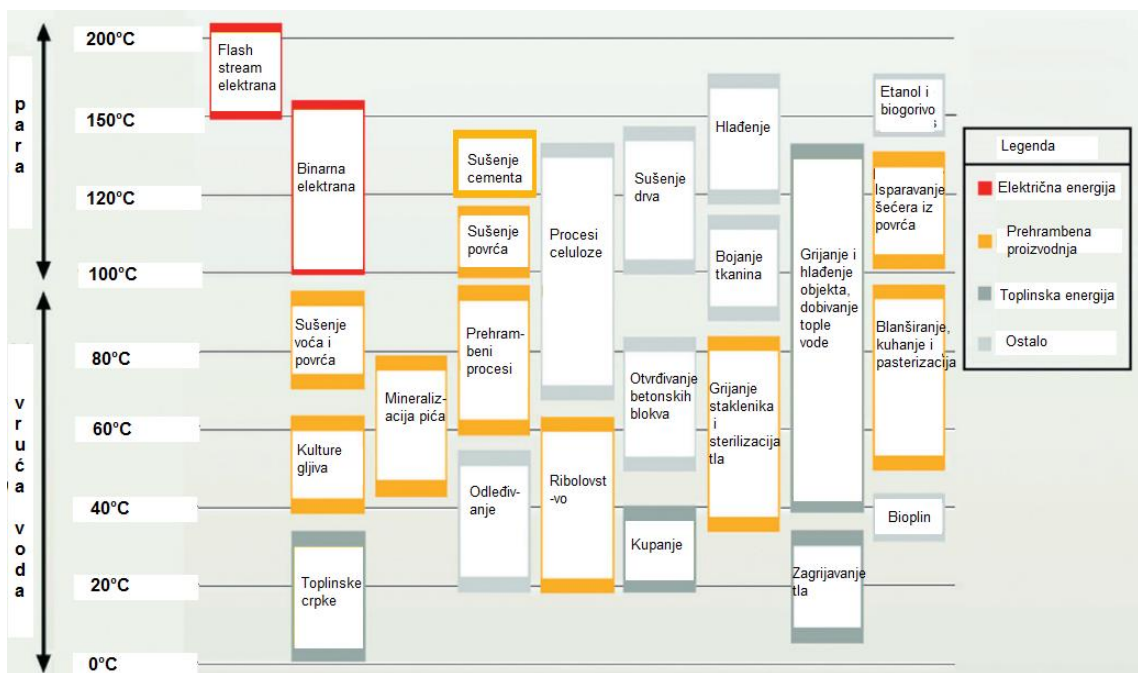


Slika 3. Geotermalni gradijent na području Hrvatske [9].



### 3. Primjena geotermalne energije

Toplinska energija geotermalnog ležišta sadržana je u geotermalnom fluidu pri nekom tlaku i temperaturi, a može se koristiti izravno kao toplinska energija ili za pretvorbu u električnu energiju. Korištenje geotermalne energije ostvaruje se konvektivnim prenošenjem topline uz pomoć fluida. Primjena ovisi o temperaturi, a na temelju temperature primjena geotermalne energije može se prikazati na temelju Lindal-ovog dijagrama (Slika 4) [10].



Slika 4. Spektar primjena geotermalne energije, temeljen na Lindal-ovom dijagramu [10].

#### 3.1. Električna energija

Za proizvodnju električne energije koriste se geotermalni izvori visokih temperatura, odnosno temperature fluida viših od 120°C. Geotermalni fluid više temperature svoju toplinu pretvara u mehanički rad, koji se koristi za dobivanje električna energija. Proces primjene ovisi o količini fluida, tlaku, temperaturi, omjeru vruće vode i pare, te o sadržaju nekondenzirajućih plinova i pojavi korozije [7]. Mogući načini primjene su:

- direktan proces
- Clausius-Rankine
- flash proces
- binarni ciklus.

Direktnim procesom proizvodi se električna energija iz ležišta suhe pare. Elektrane na suhu paru bile su prva vrsta geotermalnih elektrana (u Italiji 1904.). Koriste suhu ili pregrijanu paru pod tlakom iz ležišta u kojem dominira para. Para i čestice vode odvajaju se u separatoru, zatim se para pod pritiskom iz geotermalnog izvora odvodi u turbinu. Jedan dio pare odlazi u kondenzator i prelazi u tekuće stanje, te se zatim dobivena voda hladi u rashladnom tornju i ponovo vraća u kondenzator, gdje ima funkciju hlađenja kondenzatora da bi tlak u kondenzatoru bio što manji. Ovakav način pretvorbe smatra se najjednostavnijim i najekonomičnijim [7], [8].

Kod Clausius-Rankine procesa u centrifugalnom separatoru odvaja se para koja dolazi iz proizvodne bušotine. Zatim se pregrijana para odvodi u parnu turbinu s popratnim plinovima, CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>. Voda iz radnog procesa se hladi u rashladnom tornju te se na kraju procesa koristi za hlađenje kondenzatora [7].

Za binarni ciklus koriste se ležišta srednjih temperatura, te proces sadrži veće količine neželjenih popratnih plinova. Geotermalni fluid ulazi u turbinu, a hlađenjem i kondenziranjem radni fluid stvara tlak, zatim se radni fluid koristi za pokretanje turbine koja je spojena na generator za proizvodnju električne energije, geotermalni i radni fluid se odvajaju izmjenjivačem topline što smanjuje emisije u zrak, te se geotermalni fluid kroz utisnu bušotinu vraća u zemlju. Postoji još stirling proces, koji je zapravo binarni proces. Takav proces koristi helij kao radni medij.

### **3.2. Toplinska energija**

Toplinska energija može se koristiti izravno ako se radi o ležištima niskih temperatura. Ležišta niskih temperatura koriste se za grijanje, kupanje,

rekreacijske svrhe i ponajviše u poljoprivredi za grijanje prostora te u industrijskim procesima. Kod ležišta visokih temperatura toplinska energija također se može koristiti izravno, ali nakon proizvodnje električne energije na način da se preostala toplina iskorištava za grijanje prostora te u industrijskim procesima [7].

Jedan od načina najčešće upotrebe izravne geotermalne energije je grijanje staklenika. Staklenik je konstrukcija čiji je cilj stvaranje zaštićenog prostora za uzgoj biljaka u kontroliranom okolišu, čak i tijekom klimatski nepovoljnih razdoblja. Također je i s ekonomske strane najisplativiji odabir. Vrijeme povrata uloženi sredstava je obično deset godina ili manje, ovisno o dizajnu sustava i troškovima zamijenjenih fosilnih goriva. Korištenjem geotermalne energije u staklenicima troškovi proizvodnje se mogu smanjiti i do 35%. Staklenici mogu izravno koristiti temperaturu tople vode u rasponu od 40°C-90°C [11]. Način grijanja staklenika odabire se ovisno o uvjetima rasta uzgajanog bilja [7]. Podjela sustava za grijanje je na [7]:

- sustav prisilne konvekcije topline rekuperatorima ispod krova staklenika u kojem kroz rebrastu spiralu protječe radni fluid određene temperature, dok ventilator raspršuje zagrijani zrak u prostor staklenika,
- sustav površinskog grijanje na tlu,
- sustav podnog grijanja u kombinaciji s rekuperatorima u kojem kroz cijevi cirkulira vruća voda, a cijevi su zakopane u tlu staklenika.

### **3.3. Toplinske crpke**

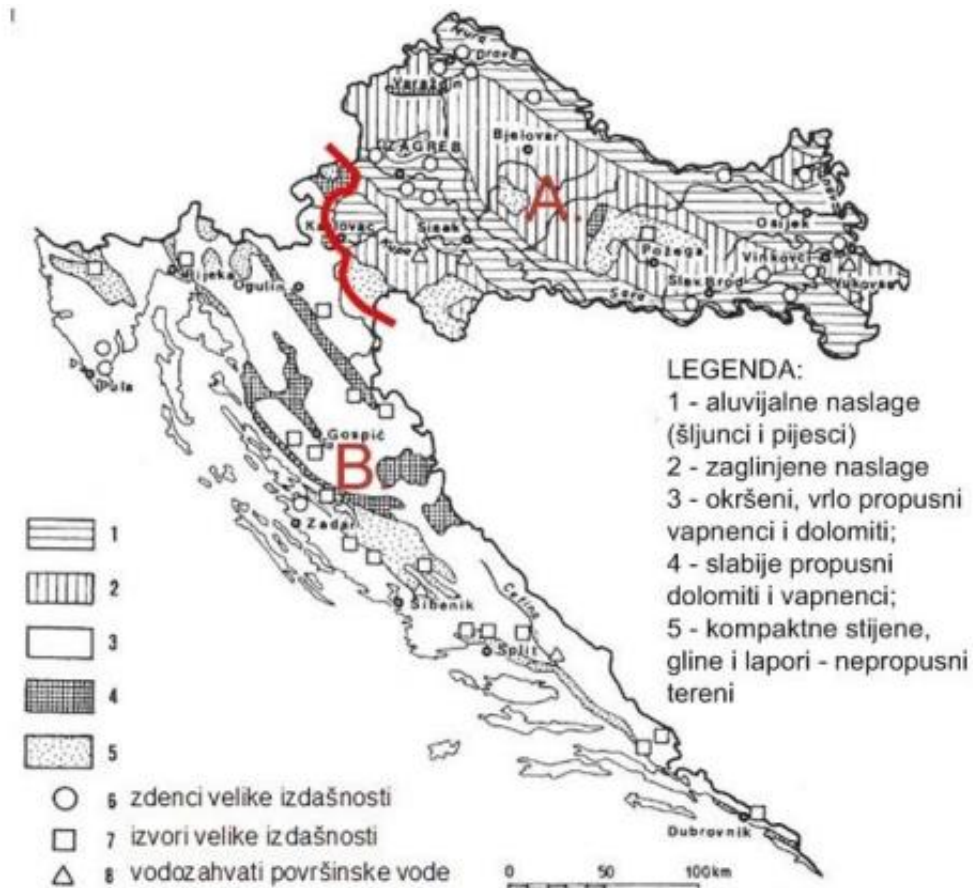
Geotermalne toplinske crpke jedna su od najbrže rastućih primjena obnovljive energije u svijetu, s godišnjim rastom od 10% u 30-ak zemalja tijekom posljednjih 10 godina. Njihova glavna prednost je što koristi niže temperature podzemne vode (između 5 i 30°C), koje su dostupne u svim zemljama. Najčešće su korištene u SAD-u i Europi, mada se interesi razvijaju i u drugim zemljama [12]. Budući da su uvjeti potrebni za upotrebu toplinskih crpka vrlo

povoljni i lako dostupni na većini ležišta njihova upotreba se može tretirati kao mjera energetske učinkovitosti, a ne kao opskrba energijom. Geotermalna toplina se dovodi u kućanstvo i koristi se ponajviše za grijanje, zatim za hlađenje i pripremu tople vode. Takvom upotrebom geotermalne energije uz toplinske crpke dolazi do smanjenja potrošnje električne energije [7]. Razlikuju se dva osnovna sustava iskorištavanja geotermalne vode crpkama [7]:

- otvoreni krug koji ne koristi izravno geotermalni fluid nego se izmjenjivačem topline toplina preuzima iz zemljine kore ili iz fluida u bušotini,
- zatvoreni krug gdje se iskorištava geotermalna voda proizvedena iz bušotine, a toplina se predaje sekundarnom fluidu i zatim se utiskuje natrag u bušotinu ili ispušta u vodotoke ili kanalizacijske sustave.

#### **4. Tehnički potencijal hidrotermalnih ležišta u Hrvatskoj**

Uz povoljne geološke uvjete za geotermalni potencijal na nekom području važne su i karakteristike stijena, odnosno toplinska svojstva, poroznost i propusnost stijena. Na toplinska svojstva stijena ponajviše utječe poroznost jer ležišni fluid ispunjava pore, a pore utječu na kretanje topline. S obzirom na propusnost, vodopropusne stijene su one koje brzo primaju i otpuštaju vodu te omogućuju protjecanje mjerljivih količina vode u određenom vremenu. Među vodopropusne stijene spadaju: šljunak, pijesak, raspucane karbonatne, magmatske i metamorfne stijene. U stijenama s dobrim toplinskim svojstvima nastaju ležišta jer takve stijene imaju veliki toplinski kapacitet te dobru toplinsku vodljivost [13]. Na slici 5 prikazana je hidrogeološka karta Hrvatske. Iz karte je vidljivo da na Panonskom dijelu prevladavaju aluvijalne i zaglinjene naslage, kompaktne stijene (gline i lapori), te dolomiti i vapnenci. Osim što su takve stijene pogodne za hidrotermalna ležišta za njih postoje mjerenja temperatura i fluida u njima u istraživačkim i razradnim bušenjima za ugljikovodike.



Slika 5. Geološka građa Hrvatske [9].

#### 4.1. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost opisuje prijenos topline kroz materijal, odnosno toplinska vodljivost je fizikalno svojstvo koje pokazuje prijelaz topline iz jače prema slabije zagrijanim dijelovima te teži izjednačenju temperature [14]. Brzina prijenosa topline ovisi o temperaturi sustava te svojstvima medija kroz koji se prenosi topline. Prijenos se može odvijati kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem. U hidrotermalnim ležištima prijenos topline odvija se strujanjem fluida, to jest konvekcijom u ležištu i kondukcijom kroz stijene, što predstavlja prijelaz topline dvaju tijela koja su u dodiru [7]. Tablica 1 prikazuje toplinsku vodljivost stijena koje se karakteristične za Panonsko područje.

Tablica 1. Toplinska vodljivost stijena [15].

Medij	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Zemljina kora	2,0-2,5
Stijene	1,2-5,9
Pješčenjak	2,5
Lapor	1,1-2,1
Vapnenac	2,5-3

Proračun toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) uz fizikalne parametre može se izračunat prema formuli [8]:

$$\lambda = \frac{E \cdot h}{A \cdot (T^2 - T^1) \cdot \tau} \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

gdje je:

E – količina topline koja prolazi kroz površinu A, [J]

h – debljina sloja, [m]

A – površina kroz koju prolazi toplinski tok, [m<sup>2</sup>]

T<sub>2</sub> -T<sub>1</sub> – razlika temperature na suprotnim plohama sloja, [K]

$\tau$ – vrijeme koje je potrebno za prolazak toplinskog toka [s].

## 4.2. Geotermalni gradijent

Gradijent temperature na bilo kojem mjestu na Zemlji je geotermalni gradijent. On predstavlja porast temperature s povećanjem dubine ispod Zemljine površine. Gradijent je posljedica protoka topline iz unutrašnjosti Zemlje. Veličina geotermalnog gradijenta ovisi o brzini prijenosa topline u dubini, toplinskoj vodljivosti stijena i dinamici sustava. Geotermalni gradijent ( $G_t$ ) može se izračunati po formuli [8]:

$$G_t = \frac{T - T_0}{H} = \frac{q}{\lambda} \left[ \frac{K}{m} \right]$$

gdje je:

T – temperatura koja je izmjerena na određenoj dubini H [K]

T<sub>0</sub> – srednja godišnja temperatura tla

H – dubina na kojoj je izmjerena temperatura [m].

## 4.3. Toplinski tok

Nakon toplinske vodljivosti, geotermalnog gradijenta vrlo bitan parametar je toplinski tok. Toplinski tok ( $q$ ) je količina topline koja prolazi kroz jediničnu površinu u jedinici vremena, te se računa prema formuli [8]:

$$q = \lambda \cdot G_t \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

gdje je:

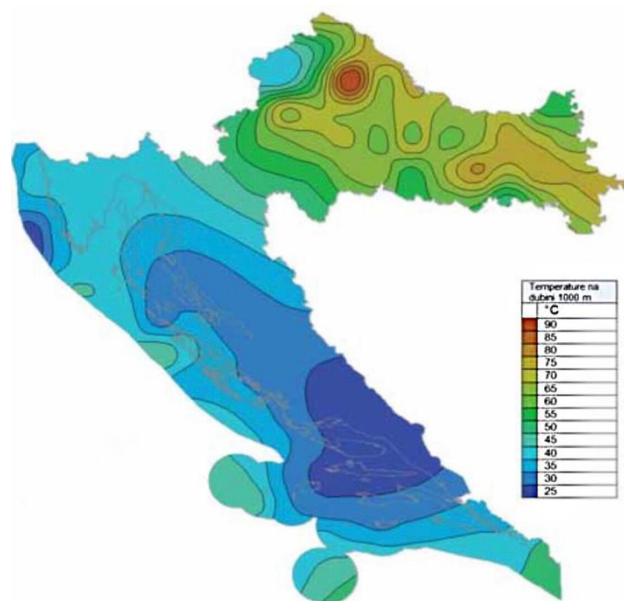
$\lambda$  - koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]



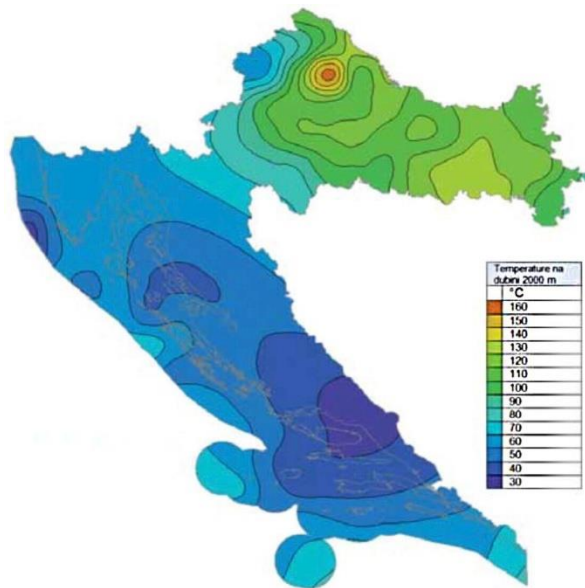
$G_t$  - vertikalni geotermalni gradijent [K/m].

#### 4.4. Karta temperatura u Hrvatskoj

Karte temperatura u Hrvatskoj izračunate su prema interpolaciji temperature te pretpostavljenoj vertikalnoj kondukciji topline i promjenjivoj toplinskoj vodljivosti po dubini. Prema rezultatima temperature na dubinama od 1000m i 2000m dosežu od 60°C do 100°C. Odnosno, na dubini od 1000 m mogle bi se dosegnuti temperature do 60°C (Slika 6). Dok, na dubinama od 2000 m temperature voda mogu dosegnuti i do 100°C uz određena odstupanja na lokacijama gdje se toplina uz kondukciju prenosi i konvekcijom putem cirkulacije fluida (Slika 7) [8].



Slika 6. Temperature na dubini od 1000m [9].



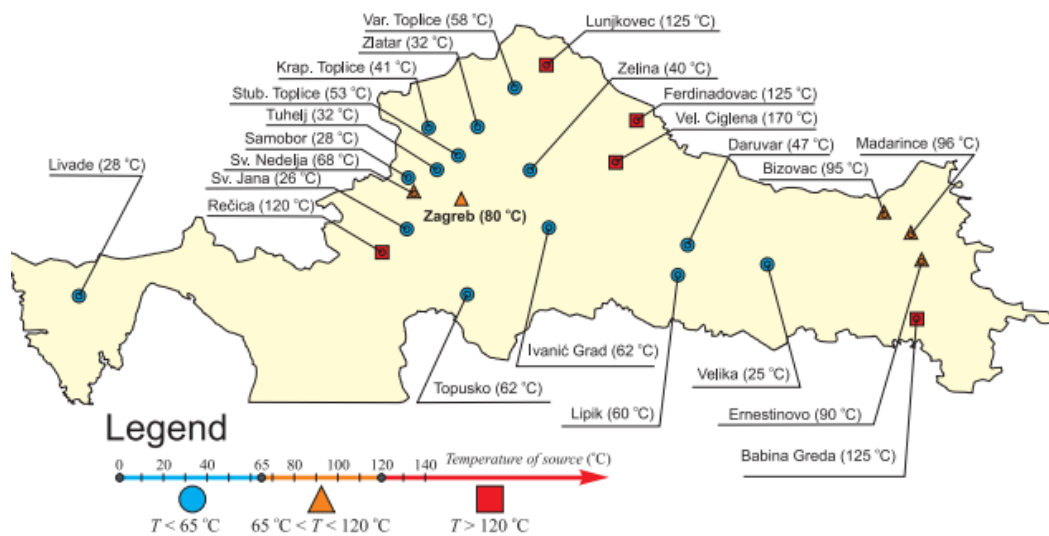
Slika 7. Temperature na dubini od 2000m [9].

#### 4.5. Iskorištavanje geotermalnog potencijala u Hrvatskoj

U Hrvatskoj iskorištavanje hidrotermalnih ležišta traje još od davnina. Od početnog korištenja u balneološke, medicinske i rekreacije svrhe, korištenje se proširilo na druge aspekte kao što su grijanje prostora i proizvodnja električne energije. 80-tih godina INA je provodila istraživanje naftnih bušotina i otkrila niz novih geotermalnih ležišta. Nakon tih otkrića može se reći da je započela „nova era“ iskorištavanja geotermalnog potencijala na Panonskom dijelu Hrvatske. Istraživanje je dovelo do otkrića geotermalnih polja Bizovac, Velika Ciglan, Sv. Nedjelja, Bošnjaci sjever, Draškovec, Virovitica 2, Slatina 2, Slatina 3, Babina Greda 1, Babina Greda 2, Karlovac, Križevci, Merhatovec, Legrad, Ernestinovo, Kutnjak- Lunjkovec [16], [17]. Od kojih su najznačajnija ležišta Velika Ciglan, Zagreb, Bizovac i Legrad. Geotermalne potencijale u Hrvatskoj možemo podijeliti u tri skupine (Slika 8) [7], [8]:

- srednje temperaturna ležišta 120-200°C, geotermalna energija iz ovih ležišta može se iskorištavati za grijanje prostora, u različitim tehnološkim procesima, te za proizvodnju električne energije binarnim procesom

- niskotemperaturna ležišta 65-120°C, geotermalna energija iz ovih ležišta može se iskorištavati za grijanje prostora, te u različitim tehnološkim procesima
- geotermalna ležišta temperature vode ispod 65°C, koriste se za balneološke i rekreativne svrhe u većem broju toplica i rekreacijskih kompleksa.



Slika 8. Geotermalna nalazišta u Hrvatskoj [16].

Ako se izuzmu izvori manji od 65°C koji se koriste u balneološke, medicinske i rekreacijske svrhe, te se daje prednost izvorima koji se mogu iskoristiti u energetske svrhe podjela je sljedeća [7].

- Geotermalna ležišta s vodom toplijom od 100°C, gdje se energija može iskorištavati za grijanje prostora, u tehnološkim procesima te za proizvodnju električne energije binarnim procesom.
- Geotermalna ležišta s vodom hladnijom od 100°C, gdje se energija može iskorištavati za grijanje prostora te u tehnološkim procesima.

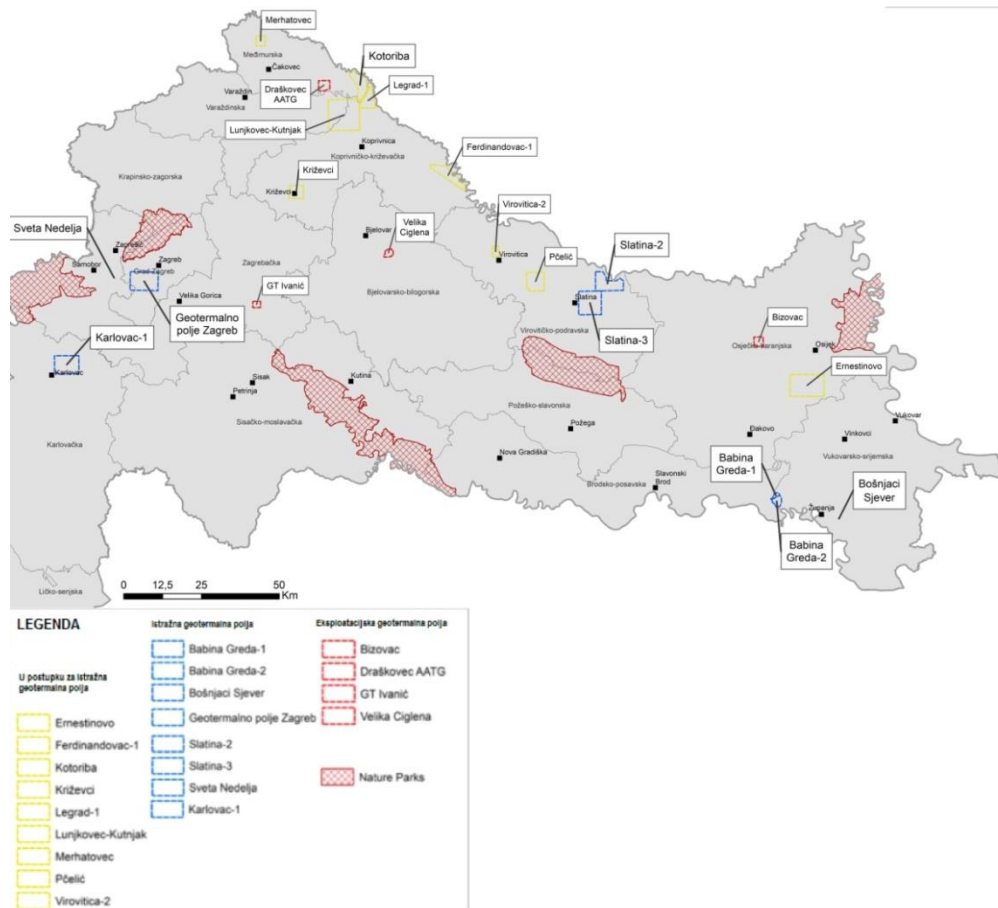
#### **4.6. Trenutno iskorištavanje potencijala**

U Hrvatskoj se trenutno geotermalna voda koristi na direktan način za kupanje i grijanje prostora, čak na 18 lokacija. 6 lokacija koristi i za kupanje i za grijanje, dok ostale koriste u rekreacijske svrhe. Također, se geotermalna energija koristi na tri lokacije za daljinsko grijanje (Topusko, Zagreb, Bizovac), te u dva staklenika (Sv. Nedjelja i Bošnjaci) (Tablica 2). Ukupni kapacitet proizvodnje iznosi 81 MWt, te je 42,3 MWt kapacitet daljinskog grijanja, 24 MWt kupanja i grijanja, 6,5 MWt je kapacitet u staklenicima i 12,6 MWt je kapacitet individualnog grijanja objekata i prostora. Godišnja proizvodnja geotermalne topline iznosi oko 300 TJ/god, no s obzirom na potencijal Hrvatske i s povećanjem učinkovitosti i ulaganjem mogla bi biti znatno veća [17].

Tablica 2. Iskorištavanje geotermalne vode u Hrvatskoj [17].

Lokacija	Iskorištavanje	Lokacija	Iskorištavanje
Bizovac	Balneološke svrhe	Sv. Nedjelja	Staklenici
Daruvar		Bošnjaci	
Naftalan		Krapinske Toplice	
Terme Jezerčica			Individualno grijanje prostora
Krapinske toplice			
Lešće			
Lipik		Zagreb- Mladost	
Istarske toplice		Zagreb-Lučko	
Stubičke Toplice		Bizovac	
Sv. Martin		Krapinske Toplice	
Topusko		Lipik	
Tuhelj		Stubičke toplice	
Varaždinske Toplice		Topusko	
Velika		Varaždinske toplice	
Sutinske toplice			
Sv. Jana			
Samobor			
Zelina			

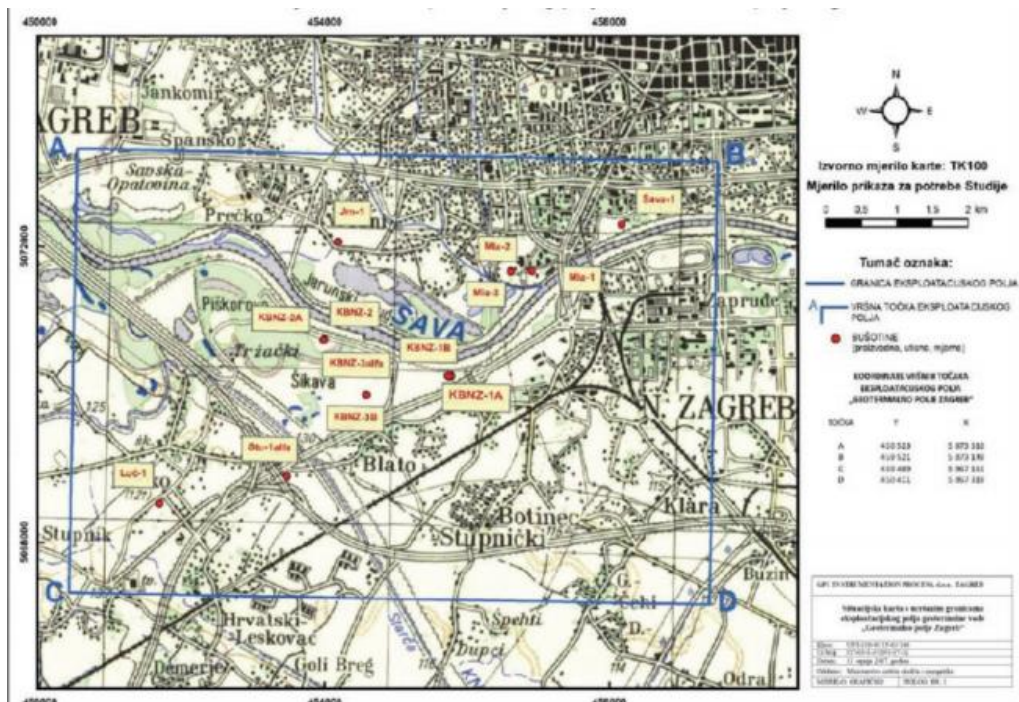
Geotermalno istraživanje i razvoj u posljednjih nekoliko godina raste, te je interes usmjeren na proizvodnju električne energije. Govoreći o potencijalu, najveći je u Panonskom dijelu, bušenjem do dubine od 2000m nalaze se temperature stijena od oko 100°C, a na dubini od 3000 temperatura je već oko 150°C. Ta temperatura je već vrlo značajna za moguću proizvodnju električne energije. Prema Hrvatskoj agenciji za ugljikovodike, u 2020.-toj godini, status aktivnih istraživačkih i eksploatacijskih geotermalnih polja prikazan je na slici 9.



Slika 9. Aktivna istraživačka i eksploatacijska polja u Hrvatskoj [18].

#### 4.6.1. Geotermalno polje Zagreb

Geotermalno ležište Zagreb nalazi se u jugozapadnom dijelu Zagreba, a otkriveno je 1977. godine istraživanjem INE i prostire se na 54km<sup>2</sup>. Izbušeno je ukupno 14 bušotina, a ležišta su u dolomitnim i vapnenačkim stijenama trijasse starosti (Slika 10). Prva bušotina Mladost-1 izbušena je 1980., a do kraja 80-tih izrađeno je ostalih 13 te su sve bušotine potvrdile ležišta geotermalne vode [19].



Slika 10. Geotermalnog polja Zagreb [19].

Otkrivena ležišta nalaze se na dubinama 881-1374 m, te izmjerena srednja temperatura vode u ležištu bušotine Mla-1 iznosi 75°C, a izmjereni tlak je 104 bar. Kasnije kontrolnim mjerenjima temperature u središnjoj zoni, gdje se nalaze eksploatacijske bušotine KBNZ-1B i Mla-1, potvrđena je viša vrijednost temperature od preko 80°C. Stoga je geotermalno polje Zagreb u grupi niskotemperaturnih polja pa je geotermalnu vodu iz ležišta moguće iskorištavati za izravnu upotrebu, te je predviđeno je korištenje geotermalne energije na dva tehnološka sustava. Prvi tehnološki sustav je Mladost s 3 bušotine, od kojih je Mla-1 utisna, Mla-2 proizvodno-utisna te Mla-3 proizvodna bušotina. Drugi tehnološki sustav je Klinička bolnica Novi Zagreb s 4 bušotine, od koji su dvije proizvodne KBNZ-1B i KBNZ-1A i dvije utisne bušotine KBNZ-3a i KBNZ-2A. Tehnički pokazatelji geotermalnog ležišta osim temperature od 80°C, i hidrostatskog tlaka su i raspoloživa izdašnost od 77,14 l/s. Na lokalitetima Mladost i Blato provedene su kemijske analize, te je prema rezultatima salinitet oko 2NaCl g/dm, osim kod bušotine KBNZ-3a koja se ima iznimno malu mineralizaciju (oko 0,6 g/dm). Iz uzorka otopljenog plina uzetog na lokalitetu Blato utvrđen je kemijski sastav: 98,31% CO<sub>2</sub>, 1,22% CH<sub>4</sub> i 0,47% N<sub>2</sub>. Blaga

mineralizacija vode i temperatura od 80°C omogućuje široku primjenu iskorištavanja geotermalne vode [20], [21].

#### 4.6.2. Velika Ciglena

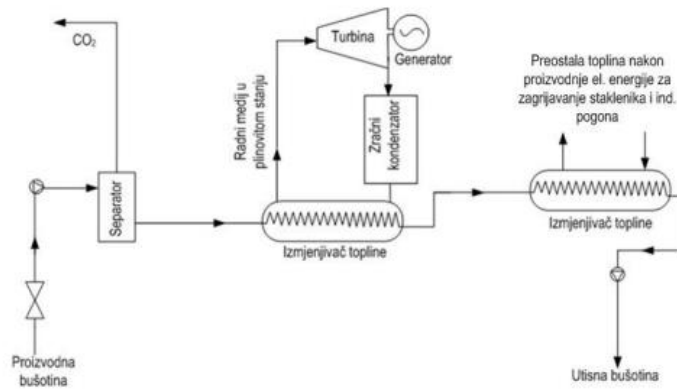
Na lokalitetu Velika Ciglena geotermalna elektrana puštena u rad krajem 2018. godine, te je najveća geotermalna elektrana s binarnom tehnologijom u Europi. Velika Ciglena je geotermalno ležište otkriveno u sklopu već spomenutog istraživanja ugljikovodika INE, nalazi se u Bjelovaru, odnosno u Panonskom dijelu Hrvatske, te leži na području visokog geotermalnog potencijala. Geotermalno polje Velika Ciglena je polje s najvišim temperaturama geotermalne vode zabilježenima u Hrvatskoj, koje iznose do 170°C. Geotermalna elektrana je snage 16,5 MW, dok je maksimalna dopuštena snaga električne energije 10MW. Odnosno elektrana svaki mjesec proizvede oko 7000 MWh električne energije [22]. Dobivenom električnom energijom može se opskrbiti čak 29 tisuća kućanstava [23]. Pojednostavljeni ležišta i elektrane su prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Karakteristike lokaliteta Velika Ciglena [22].

Geologija	karbonatne stijene
Bušotine	VC-1,VC-1A - proizvodne VC-2,Ptk-1 - utisne
Dubina bušotina	2526-4790m
Temperatura vode	170°C
Protok (VC-1,VC1A)	750 t/h
Tlak	40 bar
Toplinska energetska vrijednost	73475 MW <sub>t</sub>
Proizvodna električna snaga	10 MW <sub>e</sub>
Ukupna električna snaga elektrane	16,5 MW



Na području eksploatacijskog polja „Velika Ciglena“ su četiri bušotine: VC-1, VC-1A, VC-2 i Ptk-1. Geotermalna elektrana opskrbljuje se geotermalnom vodom spojnim cjevovodima s VC-1 i VC-1A proizvodnim bušotinama. Te se ohlađena geotermalna voda nakon što preda toplinu u geotermalnu elektranu utiskuje natrag u podzemlje kroz utisne bušotine VC-2 i Ptk-1. Proizvodne bušotine VC-1 i VC-1A međusobno su udaljenje nekoliko stotinjaka metara, te se vruća voda u bušotini VC-1 crpi s dubine od 4700m, a u bušotini VC-1A s dubine od 3000m. Utisne bušotine VC-2 i Pat-1 udaljenje su od proizvodnih bušotina 2000-3000m. Dubina utisne bušotine Ptk-1 iznosi oko 2800m, dok je dubina druge utisne bušotine VC-2 oko 3000m. Proizvodnja električne energije ostvaruje se binarnim ORC ciklusom [22]. Shema binarne elektrane s ORC ciklusom prikazana je na slici 11. Postrojenje se sastoji od pregrijača, isparivača (separtor), turbine s generatorom, pumpe za napajanje i kondenzatora s ventilatorima. Način rada je takav da se prvo u separatoru izdvaja CO<sub>2</sub>, nakon toga geotermalna tekućina (fluid) usmjerava se u izmjenjivač topline (isparivač) gdje cirkulira sekundarna tekućina (radni fluid) niskog vrelišta i visokog tlaka pare. Postupak izmjene topline između geotermalne tekućine i sekundarne tekućine dovodi do isparavanja sekundarne tekućine i ta se suhozasićena para zatim koristi za pokretanje turbine radi proizvodnje električne energije. Preostala toplina iskorištava se za grijanje industrijskih postrojenja i grijanje staklenika [24]. Ukupan trošak takve investicije iznosi oko 60 mil.€. No, samom realizacijom elektrane čije je korištenje dugoročno, Hrvatska je doprinijela kako gospodarskom tako i ekonomskom razvoju države.



Slika 11. Shema binarne elektrane [7].

#### 4.6.3. Draškovec

Na eksploatacijskom polju Draškovec u sjevernom dijelu Hrvatske, u blizini Preloga, započeti su radovi na izgradnji prve hrvatske hibridne geotermalne energane. Na lokalitetu je izgrađena 1977. godine prva bušotina Dr-1, te je 2016.-te izgrađena druga bušotina Dr-2 koja je potvrdila geotermalni potencijal. Bušotinom DR-2 čiji je cilj bilo utvrditi uvjete ležišta, otkrivena su ležišta „Pješčenjaci“ i „Vapnenci“ [25]. Ležište „Pješčenjaci“ sastoji se od ležišta „Pješčenjaci-Okoli“ i „Pješčenjaci-Iva“ koji imaju različitu dubinu i temperaturu geotermalne vode. Ukupna temperatura pridobivene geotermalne vode bušotinom Dr-2, iz ležišta Pješčenjaci, iznosit će 96°C, dok geotermalna voda sadrži 2,62 m<sup>3</sup> otopljenog plina na 1 m<sup>3</sup> vode koji će zajedno s vodom predstavljati geotermalni fluid za proizvodnju energije [25]. Inovativnim tehnološkim postupkom AAT Geothermae d.o.o želi postići racionalno korištenje resursa tako da će energetske potencijal iskoristiti na ekonomski učinkovit način, te koristiti u cijelosti i bez emisija ugljikovih spojeva. Dinamički tlak ušća na proizvodnoj bušotini Dr-2 iznosit će 4 bara [25]. Planira se izgradnja još 3 proizvodne bušotine DR-4, DR-6 i DR-8 koje će služiti za eksploataciju geotermalne vode i 4 utisne bušotine DR-3, DR-5, DR-7 i DR-9 koje će služiti za utiskivanje iskorištene geotermalne vode niskog toplinskog potencijala i

ugljikovog dioksida izdvojenog iz ispušnih plinova nastalih spaljivanjem plina izdvojenog iz geotermalne vode natrag u podzemne slojeve. Dok će prvotna bušotina Dr-1 postati kontrolna za moguće promjene koje će se događati u ležištima tijekom pridobivanja.

Projekt elektrane bit će dizajniran na način da se s dubina od 1800 do 2300 m crpi geotermalna voda i metan, zatim će se koristiti energija koja je sadržana u vodi i otopljenom plinu za pretvorbu u električnu i toplinsku energiju putem ORC (eng. „organic Rankine cycle“) i CHP (eng. „combined heat and power“) sustava. Zapravo, toplinska energija koja je sadržana u geotermalnoj vodi pretvarat će se u električnu energiju kroz ORC sustav, a plinovita faze će se koristiti za pretvaranje u električnu energiju kroz CHP sustav. CHP sustav kao nusprodukt svog rada proizvest će toplinsku energiju koja će se koristiti za izdvajanje CO<sup>2</sup> u fazama daljinskog grijanja [25]. Elektrana će imati instaliranu snagu od 18,1 Mw<sub>e</sub> i 89 MW<sub>t</sub>. Osim što će elektrana proizvoditi električnu i toplinsku energiju bit će i velik doprinos za razvoj turističke zone, sustava daljinskog grijanja i poticanje stakleničke proizvodnje [26]. Pretpostavlja se da će se elektrana proizvoditi trećinu ukupne proizvodnje hidrocentrale Dubrava na Dravi. Također, kroz nekoliko godina rada elektrane cijena energije za grijanje bit će jeftinije za Prelog, ali i okolicu.

#### **4.6.4. Lunjkovec- Kutnjak**

Području eksploatacijskog polja geotermalne vode „Lunjkovec-Kutnjak“ također je otkriveno istraživanjem INE, nalazi se na sjeverozapadnom dijelu Hrvatske i prostire se kroz tri županije: Varaždinske (Općina Velika Bukovec, Općina Mali Bukovec, Grad Ludbreg), Međimurske (Općina Donja Dubrava) i Koprivničko-križevačke (Općina Legrad, Općina Đelekovec, Općina Koprivnički Ivanec, Općina Rasinja) [27]. Geotermalno ležište nastaje u visokoporoznim lomljenim karbonatima trijasko starosti. Postojale su tri istražne bušotine Kt-1, Kt-2 i Lun-1. Tijekom 2004. godine nakon što su provedena ispitivanja na bušotinama Kt-1 i Lun-1 dobiveni su podaci na temelju kojih se dobio proračun rezervi

ležišta. 1969.-te izbušena je bušotina Kt-1 i nije dala pozitivne rezultate na ugljikovodike, ali je otkrivena voda niskog saliniteta i visoke temperature. Bušotina Lun-1 izbušena je 1976. godine i nije dala pozitivne rezultate na ugljikovodike, tijekom bušenja otkrivena visoka temperatura vode [28]. S obzirom na temperaturu i izdašnost ležišta najprikladnija i najefikasnija je proizvodnja električne energije binarnom elektranom. Takvo postrojenje iziskuje investicije za bruto snagu od 3920\$/Kw<sub>e</sub>, a za neto snagu 5100\$/kW<sub>e</sub>. Dok bi vrijeme povrata investicije bilo 9,6 godina [7].

#### **4.6.5. Bizovac**

Geotermalno polje Bizovac nalazi se u istočnoj Slavoniji u Osječko baranjskoj županiji. Otkriveno je Naftno polje Bizovac 1967. godine u bušotini Biz-1, te su iste godine izrađene još dvije bušotine koje su otkrile zalihe geotermalne vode. Trenutno su na lokalitetu u procesu crpljenja geotermalne vode tri bušotine, od kojih su dvije proizvodne Biz-4 i Slk-1 te jedna utisna Biz-2. Geotermalna energija koristi se u energetske svrhe za grijanje Bizovačkih toplica. Proizvodnja geotermalne vode kreće se od 6 do 9 l/s s temperaturom od 85 do 90°C na površini. U vodi od 1 m<sup>3</sup> sadrži se 1,6 m<sup>3</sup> otopljenog plina koji se sastoji od 92,5 % metana i 7,28% ugljikovog dioksida [29]. Ukupna godišnja proizvodnja toplinske energije je oko 9900 MW/h, s obzirom na potencijal ležišta iskorištavanje bi moglo biti u znatno većim količinama. Moguće je postići i do trostruko veću proizvodnju uz nova investiranja [7].

### **5. Ekonomske karakteristike**

S tehnološke strane svi parametri ovise o karakteristikama ležišta, dok s ekonomske strane sve ovisi o pretpostavkama i usklađivanju troškova, te su investicijski troškovi varijabilni jer ovise o širokom rasponu uvjeta. Neki od

uvjeta su : temperatura i tlak resursa, dubina i propusnost ležišta, kemijska svojstva geotermalnog fluida, sama lokacija, broj, veličini i vrsta postrojenja. Troškovi proizvodnje geotermalne energije mogu se podijeliti u dvije faze [7]:

- početna kapitalna investicijska ulaganja
- operativni troškovi i troškovi održavanja tijekom rada postrojenja.

### **5.1. Troškovi istraživanja i potvrđivanja geotermalnog ležišta**

Geotermalna ležišta u Hrvatskoj većinom su niskotemperaturna, od 50-120°C, te je za efikasno i ekonomski isplativo iskorištavanje moguće samo u obliku toplinske energije i samo na lokalnoj razini. Postoje i ležišta temperatura većih od 120°C gdje je uz toplinsku moguća i proizvodnja električne energije ( Velika Ciglena, Lunjkovec-Kutnjak, Babina Greda, Rečica, Fernandinovac). Investicijska ulaganja uveliko ovise o načinu iskorištavanja ležišta, pa su tako postrojenja za proizvodnju električne energije skuplja od postrojenja za toplinsku energiju. Ulaganja u postrojenja izražavaju se po jedinici instalirane snage, pa je tako i jedna od prednosti to što su postrojenja manjih snaga te su ukupna ulaganja manja od ulaganja u klasične elektrane. Istraživanje i razvoj projekata geotermalne energije zahtijevaju visoke investicije financijskih i materijalnih sredstava. Pa tako u Hrvatskoj 2018.-te na snagu stupa Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika koji je zakonodavni dio svakog projekta. Njime se uređuje istraživanje i korištenje geotermalnih resursa koji sadrže toplinu koja se može iskoristi u energetske svrhe. Najveći dio ulaganja odnosi se na izgradnju bušotine. Iako u Hrvatskoj postoji određen broj bušotina koje su ispitane i dokazane su rezerve geotermalne energije istraživanjem INE, to dovodi do eliminiranja troškova za istraživanje i izrade bušotina. Samim time, INA se smatra investitorom, a budući investitor može im nadoknaditi ulaganje ili ponuditi zajedničku suradnju u proizvodnji geotermalne energije.

Faza istraživanja obuhvaća pronalaženje ležišta koje će imati dokazane rezerve da bi se mogla proizvoditi električna energija. Istraživanja se često temelje na

već postojanim i dokazanim geološkim studijama, analizama geofizičkih i geokemijskih ispitivanja. Navedeni troškovi istraživanja iznose otprilike oko  $7\$/kW_e$  [7] instalirane snage, no troškovi su ovisni i o količini dostupnih podataka na regionalnoj razini i pristupačnosti terena. Nakon pronalaska ležišta nužno je izraditi istražne bušotine, a troškovi bušotina najznačajnija su ekonomska komponenta bilo kojeg geotermalnog projekta. Troškovi bušotina najskuplji su dio istraživanja, a trošak iznosi  $22\$/kW_e$  [7]. Bušotine služe za potvrđivanje geotermalnog potencijala i dobivanje parametara ležišta. Potrebna je i izrada dodatnih proizvodnih i utisnih bušotina koje dopiru do ležišta. Troškovi za pridobivanje parametara temperature, dubine, tlaka i protoka iz istražne bušotine iznose oko  $77\$/kW_e$  [7]. Sveukupno troškovi faze istraživanja iznose oko  $100-200\$/kW_e$  [7]. Za potvrđivanje ležišnih kapaciteta potrebne su izrade dodatnih bušotina, čiji troškovi iznose i do 80% troškova od faze potvrđivanja. Manji dio troškova faze potvrđivanja iznosi oko  $150\$/kW_e$  i odnose se na izgradnju pristupnih puteva do ležišta, testiranje bušotina te pravne aktove kao što su dozvole i administracija [7].

## **5.2. Troškovi razvoja geotermalnog projekta**

Razvoj geotermalnog projekta obuhvaća sve radove koji su potrebni za proizvodnju električne energije. U radove spada: izrada bušotina i njihovo testiranje, projektiranje i izgradnja postrojenja, odabir odgovarajuće infrastrukture i priključenje na naponsku mrežu. Troškovi bušenja razlikuju se od ležišta do ležišta zbog različitih parametara svakog ležišta. Na iznos troškova bušenja ponajviše ima utjecaj dubina ležišta. Ovisno o dubini ležišta određuje se koliko će trajati bušenje, veća dubina znači i dulje vrijeme bušenja. Također, ovisno o dubini određuje se i promjer bušotine te potreban broj zaštitnih cijevi. Dok, kemijski sastav vode određuje koji će biti materijal cijevi. S obzirom da su parametri bušenja za svako ležište drugačiji iznos troškova je promjenjiv i kreće se od  $500$  do  $1200\$/kW_e$  [7]. Za gradnju postrojenja potrebno je izdavanje dozvola, no prije izdavanja potrebna je studija utjecaja na okoliš. Nakon izrađene i prihvaćene studije utjecaja na okoliš moguće je izdavanje građevinske i lokacijske dozvole kako bi se moglo pristupiti razradi projekta. Proizvodne i utisne bušotine potrebno je povezati s elektranom, to se čini

pomoću sabirnog sustava. Sabirni sustav čini mreža cjevovoda, a troškovi sabirnog sustava ovisni su o udaljenosti proizvodnih i utisnih bušotina od elektrane, odnosno ta udaljenost određuje duljinu cjevovoda pa tako ti cijenu sabirnog sustava. Najpogodniji materijal za cijevi sabirnog sustava su cijevi od ugljikovog čelika, a cijena takvih cijevi kreće se od 50 do 80\$/kW<sub>e</sub> po inču promjera i metru duljine [7]. Uz cjevovod potrebna je i kontrola oprema. Kontrolu opremu čine ventili i mjerači protoka, a njihov trošak iznosi od 150 do 250\$/kW<sub>e</sub> [7]. Da bi se elektranu priključilo na naponsku mrežu potreba je izgradnja dalekovodne mreže. Iznos troškova izgradnje dalekovodne mreže ovisi o samoj duljini mreže, kapacitetu, topografiji terena, dostupnosti lokaliteta te o instaliranoj snazi elektrane. Pošto se trošak računa prema jedinici instalirane snage, troškovi za veće elektrane su manji jer se dijele na veću proizvodnju energije. Prosječni trošak za projekte koji su ekonomski održivi iznosi oko 100 \$/kW<sub>e</sub> [7].

### **5.3. Operativni troškovi i troškovi održavanja**

U operativne troškove ubrajaju se troškovi vezani uz rad elektrane, troškovi potrošnih sirovina kao što su gorivo, rezervni dijelovi i kemikalije, porezi, te troškovi radne snage. Dok se troškovi održavanja mogu podijeliti u dva dijela, a to su troškovi održavanja opreme poput turbina, generatora, cjevovoda, vozila i objekata, te na troškove održavanja i opreme bušotina. Kod odabira tehnologije postrojenja potrebno je obratiti pozornost na parametre kao što su temperatura ležišta, kemijski sastav fluida, vremenske uvjete na lokaciji, radi odgovarajućeg odabira opreme. Temperatura ležišta utječe na trošak opreme, te veća temperatura znači i veći stupanj iskorištavanja, kemijski sastav fluida značajan je zbog mogućnosti taloženja kamenca, korozivnosti, udjela plinova i sadržaja sumporovodika. Zbog navedenih parametara moguće je zahtijevanje dodatne opreme, korištenja otpornih materijala ili obloženih cijevi što dovodi do povećanja troškova. Vremenski uvjeti utječu na odabir sustava hlađenja, moguće su dvije varijante: hlađenje vodom ili hlađenje zrakom. U područjima s lako dostupnom vodom pogodnije je hlađenje vodom, dok u sušim područjima je ekonomičnije hlađenje zrakom. Operativni i troškovi održavanja sustava hlađenja zrakom iznose 138 \$/kW<sub>e</sub> [7]. Svi navedeni troškovi su promjenjivi,

ovisno o veličini projekta, parametrima i karakteristikama ležišta. U početku troškovi relativno niski, no s godinama i starenjem opreme potrebna su veća ulaganja. Iznos troškova na temelju podataka prikupljenih iz raznih elektrane diljem svijeta, prosječno iznose oko 20 \$/MWh<sub>e</sub> te se smanjuju s porastom instalirane snage [7], [8].

#### 5.4. Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske

Tablica 4. Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske.

Hidrotermalno ležište	GT Zagreb	Velika Ciglena	Draškovec	Lunjkovec-Kutnjak	Bizovac
Temperatura (°C)	75-80°C	170°C	95°C	120-130°C	85-90°C
Mogući kapacitet električne energije (MW <sub>e</sub> )	-	10	18	19,5	-
Primjena	-	Proizvodnja električne energije	Proizvodnja električne energije	Proizvodnja električne energije	-
Kapitalni troškovi (USD/kW <sub>e</sub> )	-	2468	2420	2410	-
Ukupni kapitalni trošak (USD/kW)	-	24 680000	43 560000	46 995000	-
O&M troškovi (USD/MWh)	-	19,75	19,30	19,28	-
Moguća proizvodnja električne energije (GWh/god)	-	87	157	170	-

U Hrvatskoj prevladavaju hidrotermalna ležišta s temperaturom od 50-120°C. Iz tablice je vidljivo da ležišta GT Zagreb i Bizovac imaju manje temperature te su takva ležišta pogodna za ekonomično iskorištavanje samo toplinske energije. Dok ležišta Velika Ciglena, Draškovec i Lunjkovec-Kutnjak imaju mogućnost proizvodnje električne energije i toplinske energije. Ukupni troškovi



geotermalnih elektrana ovise o širokom rasponu uvjetu stoga su i jako varijabilni. Najveći postotak troškova otpada na istraživanje i potvrđivanje ležišta (60-80%), dok su troškovi rada i održavanja (O&M) osjetno manji i u odnosu na ostala postrojenja zbog toga što geotermalne elektrane ne zahtijevaju gorivo za pogon. Usporedno s konvencionalnom elektranom gdje su kapitalna ulaganja niska, a troškovi rada i održavanja visoki kroz vremenski vijek geotermalne elektrane koji je u prosjeku oko 30 godina troškovi geotermalne elektrane su približno slični troškovima konvencionalne elektrane.

Prema Sanyal-u kapitalni troškovi s rasponom kapaciteta od 5 do 150 MW<sub>e</sub> smanjuju se eksponencijalno u odnosu na svoj kapacitet prema jednadžbi [30]:  
 $C_d = 2500e^{-0.0025(P-5)}$

gdje je:

$C_d$ - kapitalni troškovi [USD/kW<sub>e</sub>]

P- instalirana snaga [MW<sub>e</sub>].

Troškovi rada također se eksponencijalno smanjuju porastom instalirane snage prema jednadžbi [30]:  $C_0 = 2e^{-0.0025(P-5)}$

gdje je:

$C_0$  – troškovi rada i održavanja [USc/kWh]

P- instalirana snaga [MW<sub>e</sub>].

Prema navedenim jednadžbama dobiveni su kapitalni troškovi i troškovi rada i održavanja (O&M) za hidrotermalna ležišta GT Zagreb, Draškovec i Lunjkovac-Kutnjak. Vidljivo je da su troškovi s porastom instalirane snage manji. U tablici je prikazana i maksimalna moguća proizvodnja električne energije. Uzeto je u

obzir da će se instalirani kapacitet maksimalno iskoristavati tijekom cijele godine. Stoga ako se električna energija proizvodi 24h na dan kroz cijelu godinu moguće je dobiti električne energije na lokalitetu Velika Ciglena oko 87 GWh/god, na lokalitetu Draškovec oko 157 GWh/god, te na lokalitetu Lunjkovec-Kutnjak 170 GWh/god.

Iako je proizvodnja električne energije iz geotermalnih elektrana fizički pouzdana i ekološki prihvatljivija od tradicionalnih fosilnih goriva, njezini visoki troškovi pokretanja obeshrabruju privatna ulaganja u geotermalnu energiju. Napredak tehnologija i povećana potražnja na tržištu vjerojatno će smanjiti potrebu za subvencijama i geotermalnu energiju učiniti ekonomski isplativijom. Veći dio geotermalnih investicija oslanja se na državnu potporu te zbog visokih troškova kapitalnih ulaganja za istraživanje, bušenje i instalacije postrojenja, geotermalna energija nije privlačna za investitore, koji se boje niskog povrata ulaganja. Državne subvencije nadoknađuju ove visoke troškove za proizvođača energije. Međutim, nakon što se geotermalno postrojenje uspostavi i počne s radom, može biti isplativo desetljećima zbog niskih troškova rada i održavanja.

## 6. Utjecaj na okoliš

Sva proizvodnja energije uzrokuje neke promjene u okolišu i zahtijeva neku vrstu inženjerstva i građevinskih aktivnosti, koje uzrokuju neke vrste utjecaja na okoliš. Utjecaji na životnu sredinu znatno se razlikuju od jednog do drugog geotermalnog polja, ovisno o posebnim karakteristikama dotičnog polja. Glavnu ulogu imaju geologija i struktura podzemlja, kao i vrsta ležišta. Vrsta upotrebe je također važna, no od najveće je važnosti znanje o prirodnom ponašanju područja. Također se geotermalna polja moraju pažljivo nadgledati nekoliko godina prije razvoja kako bi se osiguralo najisplativije polje u ekološkom smislu, kao i održiva proizvodnja energije i najmanji utjecaj na okoliš. Visokotemperaturna ležišta koja se koriste za proizvodnju električne energije imaju veće proizvodne količine pa su tako i utjecaji izraženiji u odnosu na niskotemperaturna ležišta. Niskotemperaturna ležišta koja se koriste za proizvodnju toplinske energije imaju manje proizvodne količine fluida i topline pa su stoga i utjecaji manji. Utjecaji na okoliš se očituju kroz [7]:

- slijeganje terena
- emisijom topline
- emisijom buke
- emisijom otpadnih voda
- emisijom otpadnih plinova.

Intenzitet navedenih utjecaja na okoliš ovisi o nizu čimbenika koji su određeni geološko-strukturnim i hidrogeološkim svojstvima ležišta, fizičko-kemijskim svojstvima fluida te o tehničko-tehnološkim svojstvima postrojenja [7].

Korištenje zemljišta također je jedan od utjecaja na okoliš. Taj utjecaj očituje se već kod istražnih radova, od uklanjanja raslinja do izgradnje pristupnih puteva jer su geotermalna postrojenja često smještena izvan naselja, u područjima poljoprivrednih zemljišta. Postrojenja za bušenje, cjevovodi te geotermalna postrojenja zauzimaju prostor iako u usporedbi s postrojenjima fosilnih ili nuklearnih goriva, područje djelovanja je relativno malo. Potrebna površina

zemljišta za geotermalna postrojenja je od 400 do 3000 m<sup>2</sup>/MW, dok je za nuklearna postrojenja potrebno od 2000 do 4000 m<sup>2</sup>/MW [7], [8].

Geotermalna postrojenja mogu uzrokovati slijeganje terena, vađenjem geotermalne vode iz dubine zemlje može se poremetiti ravnoteža koja postoji među slojevima Zemlje. Slijeganje jedna je od geoloških opasnosti koja se događa tijekom procesa geotermalnog razvoja i korištenja, a uzrokovana je eksploatacijom geotermalnih fluida. Osim o geološkim značajkama tla, slijeganje ovisi o veličini, obliku i dubini ležišta. S obzirom da su stijenske strukture u Hrvatskoj ispunjene vodom, a da bi se spriječila pojava slijeganja potrebno je održavanje ležišta pod određenim tlakom. Održavanje tlaka se postiže na način da se geotermalni fluid utiskuje u ležište kako bi nadomjestio proizvedenu vodu. Osim što slijeganje uzrokuje klizišta može uzrokovati i velike materijalne štete od oštećenja bušotine do oštećenja objekata na površini. Budući da su u Hrvatskoj ležišta na većim dubinama nema prekomjerne opasnosti od slijeganja [7], [8].

Energetska učinkovitost geotermalnih elektrana je jako mala pa se zbog toga emitira velika količina topline u okoliš. No, ako postoje postrojenja koja koriste otpadnu vodu kao što su toplice, staklenici, emisije topline se smanjuju. Toplina se ponajviše emitira iz rashladnih tornjeva i kondenzatora ili ako se postrojenje ne nalazi u blizini bušotine pa se tada fluid mora transportirati putem cijevi za transport fluida. Učinkovitost pretvorbe energije ovisi o temperaturi geotermalnog fluida [7]. Elektrana s binarnim ciklusom ima manju učinkovitost, a time i veliku količinu otpadne topline. Emisija otpadne topline u okoliš iz binarne elektrane iznosi otprilike oko 9 MW<sub>t</sub>/MW električne energije, dok emisija topline u okoliš iz elektrane na ugljen iznosi oko 1,7MW<sub>t</sub>/MW električne energije.

Geotermalne elektrane grade se u skladu s važećim zakonima i propisima te se samim time ne smatraju smetnjama buke. Također, svi elektroenergetski objekti moraju zadovoljavati lokalnim propisima o buci tijekom faze izgradnje i faze rada. Zagađenje bukom iz geotermalnih elektrana moguće je tijekom tri faze: faze bušenja i ispitivanja, faze izgradnje i faze rada elektrane. Buka koju stvara

geotermalna upotreba sastoji se prije svega od buke koja je privremena i rijetko prelazi 90 dB. Kada postrojenje započne s radom, zvučne barijere mogu zadržati buku u okolišu ispod granice od 65 dB [31].

Geotermalna postrojenja ispuštaju vrlo malo emisija u zrak jer izbjegavaju utjecaje na okoliš povezane s izgaranjem goriva kao i one povezane s transportom i preradom goriva. No, sama ležišta osim vode i vodene pare sadrže i otopljene plinove. Moguće emisiju plinova u najvećoj mjeri čine ugljikov dioksid, dušik, sumporovodik te u manjim količinama amonijak, metan, živa, radon i brom. Ugljikov dioksid je najzastupljeniji staklenički plin koji se oslobađa iz geotermalnih postrojenja, no u usporedbi s emisijom elektrane na fosilna goriva te su količine male. Također, binarne elektrane uopće ne emitiraju CO<sub>2</sub>. Koncentracija ugljikovog dioksida veća je u ležištima koja se nalaze u karbonatnim stijenama. Također, geotermalna ležišta s visokim temperaturama u karbonatnim stijenama imaju značajno veću koncentraciju CO<sub>2</sub> u odnosu na ležišta nižih temperatura [7]. Buduća elektrana Draškovec vadit će toplu vodu, ali i sve otopljene plinove u vodi, te će kao energiju koristiti osim vode i energiju plinova. Emisija CO<sub>2</sub> bit će nula dok ekvivalentna elektrana na ugljen, snaga od 10 MW, emitirala bi od 96000 t/g do 150000 t/g CO<sub>2</sub> [25]. Budući da geotermalna postrojenja ne sagorijevaju fosilno gorivo, emisija dušikovih oksida je na vrlo niskoj razini, odnosno u većini slučajeva uopće ne emitiraju dušikove okside. Emisije SO<sub>2</sub> većinom dolaze iz emisija H<sub>2</sub>S. Zapravo, geotermalne elektrane ne emitiraju SO<sub>2</sub> izravno u atmosferu, već H<sub>2</sub>S reagira na sumpor i sumpornu kiselinu i tako se širi u atmosferu. Od manje zastupljenih plinova najgori je radioaktivni radon s 4,85 Bq/l do 17 Bq/l na hrvatskom teritoriju, ali ove vrijednosti u okolišu nisu opasne za ljudsko zdravlje [25].

Najveći dio otpadnih voda geotermalnih postrojenja je geotermalna tekućina koja se koristi u procesu. Mali dio otpadne vode također se sastoji od vode koja se stvara tijekom bušenja, opremanja i proizvodnog bušenja. Ako se geotermalni fluid utiskuje natrag u ležište, na kraju procesa, dolazi do smanjenja otpadnih voda i nema rizika od onečišćenja kvalitete pitke vode. Sastav geotermalne vode ovisi geološkoj strukturi ležišta, dok je udio pojedinih spojeva

u geotermalnoj vodi izravno povezan s temperaturom vode. Najčešći su kloridi, natrij, kalij i kalcij, dok su u manjim količinama prisutni karbonati, sulfati, magnezij, litij te ponekad i arsen, živa, bor te spojevi koji mogu generirati fenole [7], [8]. U tablici 5 je prikazana analiza geotermalne iz bušotine DR-2 na geotermalnom ležištu Draškovec. Prikazane su dvije analize, od kojih se jedna odnosi na vodu iz ležišta „Pješčenjaci“, a druga analiza na vodu iz ležišta „Vapnenci“.

*Tablica 5. Količina otopljenih minerala u geotermalnom fluidu iz bušotine Dr-2 na geotermalnom ležištu Draškovec [25].*

Bušotina	DR-2	
Ležište	Pješčenjaci	Vapnenci
Kationi	mg/l	
Natrij	5,435	6,710
Kalij	65,7	67,6
Kalcij	173	286
Anioni	mg/l	
Klorid	7,255	9,233
Sulfat	220	470

## 7. Rasprava

S obzirom na značajan geotermalni potencijal na području Hrvatske geotermalne energija se nedovoljno iskorištava. Iz većine ležišta energija se može iskorištavati za sustave grijanja zdravstveno-turističke komplekse, gdje se već geotermalna voda koristi, ali s obzirom na kapacitete proizvodnja se može povećati, zatim za zagrijavanje staklenika posebno u dijelovima gdje postoji poljoprivredna proizvodnja i na nekoliko lokacija gdje su ležišta viših temperatura za proizvodnju električne energije. Toplinska snaga geotermalne energije niskotemperaturnih ležišta (do 100°) iz već postojećih bušotina iznosi oko 26 MW<sub>t</sub> dok je uz razradu ležišta moguća snaga od 72 MW<sub>t</sub>. Toplinska snaga geotermalne energije ležišta s temperaturom vode većom od 100°C iz postojećih bušotina je 188 MW<sub>t</sub>, a uz razradu ležišta moguća snaga od 740 MW<sub>t</sub>. Dok je moguća snaga proizvedene električne energije iz postojećih bušotina 7,2 MW<sub>e</sub>, a uz razradu ležišta moguća je snaga od 45,8 MW<sub>e</sub>. Geotermalni energetske potencijal na području Hrvatske iznosi 815 MW<sub>t</sub> i 45,8 MW<sub>e</sub> uz pretpostavku da bi se geotermalna energija koristila na samom ležištu u svrhe grijanja te s iskorištavanjem energije do temperature od 50°C. Uz pretpostavku o faktoru opterećenja za proizvodnju električne energije od 80% to predstavlja potencijal za 3,5\*10<sup>6</sup> MWh godišnje. Za direktno korištenje to je potencijal od oko 7\*10<sup>6</sup> MJ godišnje [7].

Potencijal korištenja geotermalne energije do 2050. godine procijenjen je prema Energetskom institutu Hrvoje Požar na temelju svih javnodostupnih podataka (tablica 6) [32]. Za procjenu uzeti su u obzir sljedeći parametri :

- prema podacima temperatura te izmjerenih i procijenjenih protoka, procijenjena je izlazna temperatura na 80°C,
- procjena broja bušotina,
- procijenjena termička iskoristivost proizvodnje električne energije i procijenjen broj radnih sata godišnje koji iznosi 7900h za električnu energiju, a za toplinsku 4000h,

- 17 lokacija u Panonskom dijelu, 15 se odnosi na toplinsku i električnu energiju te 2 lokacija samo za toplinsku energiju.

Tablica 6. Procjena korištenja geotermalne energije u Hrvatskoj do 2050. [32].

Županija	Moguća neto snaga proizvodnje električne energije ( $MW_e$ )	Procijenjena moguća proizvodnja električne energije (GWh/god)	Moguća neto snaga proizvodnje toplinske energije ( $MW_t$ )	Procijenjena neto snaga proizvodnje toplinske energije (TJ/god)
Bjelovarsko-bilogorska	10,0	86,0	35,4	509,2
Grad Zagreb	-	-	13,1	188,5
Karlovačka	0,8	6,5	8,5	122,4
Koprivničko-križevačka	12,8	110,1	115,9	1669,4
Međimurska	19,5	167,8	155,6	2240,6
Osječka-baranjska	1,2	10,2	17,0	244,8
Sisačko-moslovačka	1,2	10,2	17,0	244,8
Varaždinska	4,8	41,6	27,2	391,7
Virovitičko-podravska	2,7	23,2	17,0	244,8
Vukovarska-srijemska	2,4	20,2	32,3	465,1
Zagrebačka	1,2	10,2	17,0	244,8
<b>Ukupno</b>	<b>56,5</b>	<b>486,0</b>	<b>456,0</b>	<b>6566,3</b>

Geotermalno ležište Zagreb obiluje geotermalnom energijom, ali ona se iskorištava samo za grijanje bazena (športsko-rekreacijski centar Mladost), grijanje radnih i skladišnih prostora na lokaciji Blato (KBNZ) te dogrijavanje poslovnih objekata unutar poslovne zone Lučko. Ukupan stupanj iskorištenja toplinske energije manji je od 2% što čini samo 0,34  $MW_t$ , od ukupne izlazne snage oko 20  $MW_t$ , što je neracionalno, također i ekonomski neopravdano [20], [21]. U tablici 7 prikazani su podaci sadašnje proizvodnje toplinske energije na geotermalnu polju Zagreb i maksimalna moguća proizvodnja. Na temelju tablice



može se zaključiti da je dosadašnja proizvodnja i iskorištavanje geotermalne energije daleko manje u odnosu na mogućnosti.

*Tablica 7. Proizvodnja toplinske energije na geotermalnom ležištu Zagreb [21].*

Parametri proizvodnje topline	Jedinica	Sadašnja proizvodnja i snaga	Maksimalna moguća proizvodnja i snaga
Proizvodnja bušotina	l/s	6,10	122
	m <sup>3</sup> /d	527	10 400
Korištena i/ili ukupna snaga bušotina	MW <sub>t</sub>	0,34	29
Proizvodnja geotermalne vode	m <sup>3</sup> /god	176 035	3 484 000
Proizvodnja topline	TJ/god	10,02	829
Iskorištavanje topline	%	1,21	-

Budući da je na geotermalnom ležištu Zagreb iskorištavanje geotermalnog potencijala započeto 1987. godine, postoji sva potrebna rudarsko-tehnološka dokumentacija. Tijekom dosadašnjih ispitivanja i proizvodnje uzeti su svi potrebni uzroci geotermalne vode za njezino klasificiranje. Temeljem svih analiza, uključujući i dosadašnju proizvodnju, zaključeno je da se na lokalitetu uz dva postojeća tehnološka sustava Mladost i Klinička bolnica Novi Zagreb može intenzivirati proizvodnja geotermalne energije, predlaže se stupnjevito korištenje energije, uz sadašnji Športski park Mladost, mogli bi koristiti energiju i okolni stambeni blokovi, Sveučilišna bolnica Zagreb, centar za hortikulturu te rekreacijski sklopovi, prije svega radi povećanja prihoda.

Također, vrlo značajno geotermalno polje je Kutnjak-Lunjkovec, predviđeno je koncipiranja geotermalnog programa prema raspoloživoj toplinskoj snazi geotermalnog izvora u prvoj fazi od 30 MW i u drugoj fazi od dodatnih 125 MW. Parametri ležišta navedeni u tablici 8, odnose se na prvu fazu iskorištavanja geotermalne energije. Dok se u drugoj fazi predviđa se izgradnja dodatnih bušotina kako bi se izdašnost povećana na 300 l/s s temperaturom geotermalne vode 140°C. Uz to, planirana je izgradnja dodatnog postrojenja za proizvodnju električne energije od 4 MW, a na taj način dobit će se i dodatne količine

toplinske energije. Dodatne količine toplinske energije koristit će se za podmirivanje većih potreba objekata iz prve faze, te se s ostatkom toplinske energije može omogućiti i opskrba grada Koprivnice. Na geotermalnom polju očekuje se proizvodnja električne energije do 10 MW<sub>e</sub> u dvije faze i izravno iskorištavanje topline za sušenje poljoprivrednih proizvoda, individualni prostor i daljinsko grijanje, kupanje i druge svrhe do 125 MW<sub>t</sub>. Energetski projekti obuhvaćaju iskorištavanje geotermalne vode za proizvodnju električne i toplinske energije, opskrbljivanje toplinskom energijom plastenički uzgoj cvijeća i povrća, bazenski uzgoj ribe i linije za sušenje povrća, Toplice Kutnjak i zone individualne turističke namjene, te isporuka toplinske energije za Koprivnicu. Investicijska ulaganja u prvoj fazi bi iznosila 625.210 000 kn, a u drugoj fazi 1.140.000 000 kn [33].

*Tablica 8. Prva faza iskorištavanja geotermalne vode [33].*

Bušotine	KT-1 – proizvodna	Lun-1- utisna
Dubina	2430 m	2201m
Temperatura	140°C	
Tlak u ležištu	217 bar	
Tlak na ušću	6 bar	
Izdašnost	70l/s	
Svrha	proizvodnja električne energije i distribucija toplinske energije za: sušare povrća, toplice, ribogojilište i plastenike	

Iskorištavanje geotermalne energije na geotermalnom polju Bizovac koristi se za grijanje i balneološke svrhe u Bizovačkim toplicama. Proizvodnjom iz dviju bušotina nedovoljno se iskorištava geotermalna voda s protokom oko 7l/s i temperaturom 90°C na ušću. Povećanje iskorištavanje geotermalne energije moguće je postići proširenjem hotela Termia. S obzirom da geotermalna voda sadrži otopljen plin (1m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), korištenjem plina moguće je podići temperaturu vode te bi bilo moguće proizvoditi i električnu energiju [7].

U odnosu na iskorištavanje ostalih obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj, geotermalna energija je najmanje zastupljenija. Maksimalni kapacitet iskorištavanja s obzirom na geotermalni potencijal lako je dostići, no s obzirom na trenutni stupanj iskorištavanja geotermalne energije u Hrvatskoj i vrijeme potrebno za pokretanja novih projekata, dobivanja svih potrebnih dozvola i ispunjavanja svih ostalih procedura smatram da će se maksimalni kapacitet teško dostići. Geotermalna energija potražuje velike investicijske troškove pa se trenutno ne može integrirati na ekonomski isplativ način. Napretkom tehnologije i smanjenjem troškova bušenja troškovi bi se znatno smanjili te bi takve investicije postale ekonomski dostupnije.

## 8. Zaključak

Uzimajući u obzir da je fosilnih goriva u svijetu sve manje, a i njihova štetnost o kojoj se uveliko raspravlja, geotermalna energija perspektivan je izvor energije u budućnosti. S obzirom da se posljednjih godina stavlja fokus na obnovljive izvore energije, a iskorištavanje obnovljivih izvora energije povećava se sigurnost opskrbe energijom, promiče energetska učinkovitost te smanjuje emisiju stakleničkih plinova u atmosferu. Uz geotermalnu energiju možemo vezati pojam obnovljiv koji se odnosi na prirodu resursa, dok se pojam održiv veže uz geotermalnu proizvodnju i odnosi se na to kako se koristi. Održivi razvoj uključuje zadovoljavanje sadašnjih potreba bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da udovolje svojim potrebama. Također, potencijal zemaljskih geotermalnih resursa je ogroman u usporedbi s njihovom današnjom uporabom i budućim energetskim potrebama čovječanstva. Stoga postoji dovoljno prostora za ubranu i povećanu upotrebu geotermalnih resursa širom svijeta. S obzirom na kapacitet, dostupnost energije 24 sata i pozitivne ekološke čimbenike, kako u Hrvatskoj tako i u svijetu, geotermalna energija se koristi relativno malo.

U Hrvatskoj postoji mnogo interesa za geotermalne projekte, kako za proizvodnju električne energije tako i za direktno korištenje toplinske energije. Osim hidrotermalnog ležišta na lokalitetu Velika ciglana, još na nekoliko lokacija se odvijaju aktivnosti kako bi u budućnosti Hrvatska imala značajnije iskorištavanje geotermalne energije. Uz investicije domaćih i stranih investitora pokrenuto je, ali i napravljeno puno analiza i projekata za razumijevanja prirode i potencijala geotermalnog resursa što bi u budućnosti moglo rezultirati značajnijim povećanjem korištenja geotermalne energije, te dovesti i do potpunog iskorištenja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske. Potrebna su veća ulaganja u razvoj geotermalnih ležišta i bušotine kako bi proizvodnja električne energije postala isplativija. Može se postaviti i pitanje da li u Hrvatskoj postoji naslijeđeni stav o troškovima energije, te se smatra da su oni stalni i nepromjenjivi, da li postoji nedostatak motivacije za ostvarenje ušteda energije, nemogućnost preusmjeravanja proračunskih sredstava u projekte energetske učinkovitosti bez kompliciranih procedura, te nepostojanje organizacijske

strukture gospodarenja energijom koja će uključivati osobe zadužene za gospodarenje energijom.

## Literatura

- [1] Official Journal of the European Union, 2009. Directivec, L 140/16.  
Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF> Datum pristupa: 26.07.2021.
- [2] Europski parlament 2020. Energija iz obnovljivih izvora. Dostupno na: [https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/hr/FTU\\_2.4.9.pdf](https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/hr/FTU_2.4.9.pdf) Datum pristupa: 13.04.2021.
- [3] Eko Zagreb. Geotermalna energija. Dostupno na: <https://eko.zagreb.hr/geotermalna-energija/97> Datum pristupa: 13.04.2021.
- [4] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. Energija u Hrvatskoj 2018.  
Dostupno na: <http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2020/04/Energija2018.pdf> Datum pristupa: 13.04.2021.
- [5] International Renewable Energy Agency. Dostupno na: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Renewable-Energy-Balances/Final-Renewable-Energy-Consumption> Datum pristupa: 14.04.2021.
- [6] Hrvatski geološki institut. Delineacija i karakterizacija geotermalnih podzemnih tijela u Republici Hrvatskoj. Dostupno na: [https://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/delineacija\\_i\\_karakterizacija\\_tijela\\_geotermalnih\\_podzemnih\\_voda\\_u\\_rh.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/delineacija_i_karakterizacija_tijela_geotermalnih_podzemnih_voda_u_rh.pdf) Datum pristupa: 14.04.2021.
- [7] Čubrić S, Golub M, Grabovski K, i dr. Bošnjak R, GEON Program korištenja geotermalne energije-prethodni rezultati i buduće aktivnosti. Energetski institut "Hrvoje Požar", 1998.
- [8] Golub M Kurevija T. Iskorištavanje geotermijskih ležišta. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko geološki naftni fakultet. 2008. Dostupno na: <https://pdfcoffee.com/skripta-iskoritavanje-geotermijskih-leitaver11pdf-pdf-free.html> Datum pristupa: 19.04.2021.

- [9] Renewable Energy Policies Advocacy and Monitoring. Dostupno na: [https://door.hr/wp-content/uploads/2016/01/REPAM\\_studija\\_03\\_sisacko-moslavacka.pdf](https://door.hr/wp-content/uploads/2016/01/REPAM_studija_03_sisacko-moslavacka.pdf) Datum pristupa: 19.04.2021.
- [10] Renner J.L, DiPippo R. Geothermal energy- The future energy. 2004, 471-492. Dostupno na: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2006/11/MITEI-The-Future-of-Geothermal-Energy.pdf> Datum pristupa: 27.04.2021.
- [11] Lacković I, Grdić I Bošnjaković M. The greenhouses soil heating by geothermal energy. Technique, Education, Agriculture & Management Prešov, 2013. Dostupno na: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Thegreenhousesoilheatingbygeothermalenergy.pdf> Datum pristupa: 27.04.2021.
- [12] Sanner B, Rybach L, Curtis R, Hellstrom G Lund J. Geothermal (ground source) heat pumps. 2004. Dostupno na: <http://storage.ubertor.com/stephenlloydhall.myubertor.com/content/document/121.pdf> Datum pristupa: 27.04.2021.
- [13] Tomljenović B, Aljinović D. Petrologija s ekologijom II. dio -Geološke strukture. Dostupno na: [http://rgn.hr/~brunton/nids\\_brunton/PDF%20Sumarstvo/2\\_Geoloske%20strukture.pdf](http://rgn.hr/~brunton/nids_brunton/PDF%20Sumarstvo/2_Geoloske%20strukture.pdf) Datum pristupa: 27.04.2021.
- [14] Kurevija T. Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske. Doktorska dizertacija. Rudarsko-geološki-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.(2010. Dostupno na: [http://rgn.hr/~tkurevi/materijali/Kurevija\\_disertacija\\_2010\\_RGNF\\_ENERGE\\_TSKO\\_VREDNOVANJE\\_PLITKIH\\_GEOTERMALNIH\\_POTENCIJALA\\_REPUBLIKE\\_HRVATSKE.pdf](http://rgn.hr/~tkurevi/materijali/Kurevija_disertacija_2010_RGNF_ENERGE_TSKO_VREDNOVANJE_PLITKIH_GEOTERMALNIH_POTENCIJALA_REPUBLIKE_HRVATSKE.pdf) Datum pristupa: 04.05.2021.
- [15] Murgić M. Mjerenje temperature stijena uporabom temperaturnog senzora i Raspberry pi-a. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarskogeološko-naftni fakultet. 2015. Dostupno na: <https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn%3A97/datastream/PDF/v>

- [iew](#) Datum pristupa: 04.05.2021.
- [16] Lončar D, Ferdelji N Guzović Z. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy. Energy 35, 2010, 3429-3440. Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/533765.1-s2\\_0-S0360544210002434-main.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/533765.1-s2_0-S0360544210002434-main.pdf) Datum pristupa: 06.05.2021.
- [17] Energetski institut Hrvoje Požar (EIPH). Energy Utilisation Potential in Croatia - Field and Study Visits' Report. 2017. Dostupno na: <http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2017/07/Geothermal-Energy-Utilisation-Potential-in-Croatia-final-report.pdf> Datum pristupa: 06.05.2021.
- [18] Hrvatska agencija za ugljikovodike (CHA). Geothermal energy in Croatia. 2020. Dostupno na: [https://www.azu.hr/media/1793/geothermal-energy-in-croatia\\_booklet.pdf](https://www.azu.hr/media/1793/geothermal-energy-in-croatia_booklet.pdf) Datum pristupa: 06.05.2021.
- [19] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. Rješenje. 2014, Zagreb. Dostupno na: [https://mingor.gov.hr/UserDocImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20PUO/2013/11082014\\_rjesenje\\_ministarstva\\_od\\_25\\_srpnja\\_2014\\_godine.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20PUO/2013/11082014_rjesenje_ministarstva_od_25_srpnja_2014_godine.pdf) Datum pristupa: 10.5.2021.
- [20] Cazin V. Eksploatacijsko polje geotermalne vode Zagreb i mogućnosti njezinog korištenja. Nafta i Plin, Vol. 38 No. 156, 2019. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/214797> Datum pristupa: 10.5.2021.
- [21] Horvat S, Getliher A. Upotreba geotermalnih resursa na području grada Zagreba u cilju gospodarskog razvitka. Dostupno na: [https://www.academia.edu/16080992/UPORABA\\_GEOTERMALNIH\\_RESURSA\\_NA\\_PODRU%C4%8CJU\\_GRADA\\_ZAGREBA\\_U\\_CILJU\\_GOSPODARSKOGA\\_RAZVITKA\\_GEOTHERMAL\\_WATER\\_UTILIZATION\\_FOR\\_INCREASING\\_OF\\_ZAGREB\\_ECONOMIC\\_DEVELOPMENT](https://www.academia.edu/16080992/UPORABA_GEOTERMALNIH_RESURSA_NA_PODRU%C4%8CJU_GRADA_ZAGREBA_U_CILJU_GOSPODARSKOGA_RAZVITKA_GEOTHERMAL_WATER_UTILIZATION_FOR_INCREASING_OF_ZAGREB_ECONOMIC_DEVELOPMENT) Datum pristupa: 11.05.2021.
- [22] GEON d.o.o. Elaborat zaštite okoliša za pcjenu o potrebi procjene. 2016. Dostupno na:



- [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2016/elaborat\\_zastite\\_okolisa\\_586.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2016/elaborat_zastite_okolisa_586.pdf) Datum pristupa: 17.5.2021.
- [23] Hrastović inženjering d.o.o. GTE Velika Ciglena. Dostupno na: <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/energijske-tehnologije/item/1082-gte-velika-ciglena.html> Datum pristupa: 17.05.2021.
- [24] Guzović Z, Majcen B. Mogućnosti proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj iz srednjemotemperaturnih geotermalnih izvora. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Dostupno na: [file:///C:/Users/Admin/Desktop/DIPLOMSKI/Guzovic\\_Majcen\\_rad.pdf](file:///C:/Users/Admin/Desktop/DIPLOMSKI/Guzovic_Majcen_rad.pdf) Datum pristupa: 17.05.2021.
- [25] EcoMission d.o.o. Elaborat zaštite okoliša u postupku ocjene o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš eksploatacije geotermalne vode u energetske svrhe. 2016, Varaždin. Dostupno na: [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2017/elaborat\\_zastite\\_okolisa\\_732.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2017/elaborat_zastite_okolisa_732.pdf) Datum pristupa: 03.06.2021.
- [26] Hrastović inženjering d.o.o. Draškovec geotermalna elektrana. Dostupno na: <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/energijske-tehnologije/item/653-draskovec-geotermalna-elektrana.html> Datum pristupa: 03.06.2021.
- [27] MB Geothermal d.o.o. Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi utjecaja na okoliš. 2018 zagreb. Dostupno na: [https://kckzz.hr/wp-content/uploads/2018/07/elaborat\\_zastite\\_okoli%C5%A1a-Istra%C5%BE-geoterm-Lunjkovec\\_Kutnjak-srp18.pdf](https://kckzz.hr/wp-content/uploads/2018/07/elaborat_zastite_okoli%C5%A1a-Istra%C5%BE-geoterm-Lunjkovec_Kutnjak-srp18.pdf) Datum pristupa: 27.6.2021.
- [28] Srpak M, Zeman S, Sabol G. Analiza i stanje postojećeg stanja izvora geotermalnih voda na području Varažinske županije. Volumen 18, broj 35, str. 190 – 200 Koprivnica 2019. Dostupno na: <file:///C:/Users/Admin/Desktop/kutnjak.pdf> Datum pristupa: 28.06.2021.

- [29] Kolbah S Elezović I. Konstrukcije proizvodnih geotermalnih bušotina u Hrvatskoj. Nafta i Plin, Vol. 38. No. 155., 2018. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/209327> Datum pristupa: 13.7.2021.
- [30] Sanyal S.K. Cost of geothermal power and factors that affects it. Stanford University, 2004. Dostupno na: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2004/Sanyal.pdf> Datum pristupa: 02.09.2021.
- [31] Geothermal communities. Environmental impact od geothermal energy. Dostupno na: <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/8.1.GE%20vs%20Environment.pdf> 13.7.2021.
- [32] Zelena knjiga. Analize i podloge za izradu energetske strategije Republike Hrvatske, 2018, Energetski institut Hrvoje Požar. [https://www.hup.hr/EasyEdit/UserFiles/Granske\\_udruge/CRO%20industrija/Marija%20%C5%A0utina/zelena-knjiga.pdf](https://www.hup.hr/EasyEdit/UserFiles/Granske_udruge/CRO%20industrija/Marija%20%C5%A0utina/zelena-knjiga.pdf) Datum pristupa: 10.8.2021.
- [33] Komerički Z, Režek B Bruketa N. Geotermalni program Kutnjak-Lunjkovec kao demonstracijski primjer uporabe geoteralne energije u Republici Hrvatskoj. 2010, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije. Dostupno na: <http://www.ho-cired.hr/referati-umag2010/SO4-13.pdf> Datum pristupa: 10.8.2021.

## Popis slika

Slika 1. Proizvodnja električne energije 2010.-2018. [5].

Slika 2. Raspodjela temperature po dubini [3].

Slika 3. Geotermalni gradijent na području Hrvatske [9].

Slika 4. Spektar primjena geotermalne energije, temeljen na Lindal dijagramu [10].

Slika 5. Geološka građa Hrvatske [9].

Slika 6. Temperature na dubini od 1000m [9].

Slika 7. Temperature na dubini od 2000m. [9]

Slika 8. Geotermalna nalazišta u Hrvatskoj [16].

Slika 9. Aktivna istraživačka i eksploatacijska polja u Hrvatskoj [18].

Slika 10. Geotermalno polje Zagreb [19].

Slika 11. Shema binarne elektrane [7].

### **Popis tablica**

Tablica 1. Toplinska vodljivost stijena [15].

Tablica 2. Iskorištavanje geotermalne vode u Hrvatsko [16].

Tablica 3. Karakteristike lokaliteta Velika Ciglena [22].

Tablica 4. Tehnoekonomska procjena hidrotermalnih ležišta Hrvatske

Tablica 5. Količina otopljenih minerala u geotermalnom fluidu iz bušotine Dr-2 na geotermalnom ležištu Draškovec [24].

Tablica 6. Proizvodnja toplinske energije na geotermalnom polju Zagreb [21].

Tablica 7. Iskorištavanje geotermalne energije u prvoj fazi [31].

Tablica 8. Procjena korištenja geotermalne energije u Hrvatskoj do 2050. [32].

### **Popis kratica**

$^{\circ}\text{C}$  – Celzijev stupanj

K – Kelvin; SI mjerna jedinica za stupanj [ $^{\circ}\text{C}=\text{K} - 273,15$ ]

$\lambda$  – toplinska vodljivost [ $\text{W}/\text{mK}$ ]

E – količina topline koja je prošla kroz površinu A

h – debljina sloja [m]

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

$T_2 - T_1$  – razlika temperature na suprotnim plohama sloja [K]

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

$G_{\text{t}}$  – geotermalni gradijent [ $\text{K}/\text{m}$ ]

T – temperatura na određenoj dubini [K]

$T_0$  – srednja godišnja temperatura tla [ $^{\circ}\text{C}$ ]

H – dubina na kojoj je mjerena temperatura [m]

q – toplinski tok [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

TJ – teradžul; tera je prefiks mjernih jedinica  $10^{12}$ , džul [N\*s] je SI mjerna jedinica za rad, energiju i toplinu

MJ – megadžul; mega je prefiks mjernih jedinica  $10^6$ ; džul [N\*s] je SI mjerna jedinica za rad, energiju i toplinu

bar – mjerna jedinica za tlak

MW – megavat; mjerna jedinica za snagu

$MW_t$  – toplinski mega vat; proizvedena toplinska snaga

$MW_e$  – električni megavat; proizvedena električna snaga

MWh – megavatsat

$MWh_e$  – megavatsat električne energije

$kW_e$  – kilovat električne energije

USD – američki dolar [\$]; 1\$ dolar iznosi oko 6,31 kuna

$C_d$  – kapitalni troškovi [USD/ $kW_e$ ]

P – instalirana snaga električne energije

$C_0$  – troškovi rada i održavanja [USc/ $kW_e$ ]

USc/ $kW_e$  – 10 USD/ $MW_e$

Bq/l – Bekerel je SI izvedena mjerna jedinica za radioaktivnost

dB – decibel