

Geotermalna energija i primjeri iz Republike Hrvatske

Pavlak, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:321467>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

GEOTERMALNA ENERGIJA
I PRIMJERI IZ REPUBLIKE HRVATSKE

GEOTHERMAL ENERGY
AND EXAMPLES FROM REPUBLIC OF CROATIA

SEMINARSKI RAD

Nikolina Pavlak

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

Undergraduate Study in Environmental science

Mentor: prof. dr. sc. Blanka Cvetko Tešović

Zagreb, 2020.

Sadržaj

1. UVOD	2
2. GEOTERMALNA ENERGIJA.....	2
2.1. Geotermalna ležišta	3
2.2. Geotermalne elektrane.....	5
3. GEOTERMALNA ENERGIJA U REPUBLICI HRVATSKOJ	8
3.1. Geološka građa Republike Hrvatske.....	10
3.2. Geotermalni lokaliteti Republike Hrvatske	11
3.2.1. Bizovac.....	13
3.2.2. Draškovec.....	13
3.2.3. Karlovac.....	13
3.2.4. Lunjkovec-Kutnjak.....	14
3.2.5. Velika Ciglena.....	15
3.2.6. Zagreb.....	16
4. ZAKLJUČAK.....	17
5. LITERATURA.....	18
6. SAŽETAK.....	20
7. SUMMARY.....	20

1. UVOD

U današnje vrijeme raste potrošnja energije i povećava se svijest o štetnosti fosilnih goriva za okoliš, teži se pronalasku alternativnih, održivih i sigurnih izvora energije. Veliku važnost u svijetu pa tako i u Republici Hrvatskoj počinju dobivati obnovljivi oblici energije. Zadnjih nekoliko desetljeća velik broj država okreće se upravo njima kao primarnom izvoru s ciljem steći što veći udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije. Neiscrpivi izvori energije kao što su Sunce, vjetar, plima i oseka, vodotoci, biomasa i geotermalna energija postaju izvori energije sadašnjosti i budućnosti.

Tema ovog seminarskog rada je geotermalna energija koja u svijetu nije toliko zastupljena kao ostali obnovljivi izvori energije. Cilj je sažeto opisati i objasniti kako i gdje se pojavljuje, kako se koristi, koje vrste geotermalnih elektrana postoje, njihov utjecaj na okoliš te istražiti mogućnosti i dati neke primjere o trenutnom i potencijalnom stanju iskorištavanja te vrste energije u Republici Hrvatskoj.

2. GEOTERMALNA ENERGIJA

Pojam „geotermalna“ odnosi se na termalnu energiju pohranjenu ispod površine Zemlje. Količina takve energije je ogromna i potječe od planetarnih i geoloških procesa. Planet Zemlja se od svog postanka polako hladi te se toplota kreće iz središta prema površini gdje se raspršuje, a geološki procesi kao što su raspad radioaktivnih elemenata koje sadrže minerali stijena pridonose tom kretanju topline. U užem smislu to je dio energije iz dubine Zemlje koji u obliku vrućeg ili toplog geotermalnog medija (vode ili pare) dolazi do Zemljine površine i prikladan je za iskorištavanje u izvornom obliku ili za pretvorbu u druge oblike. Može se pronaći svuda po svijetu, no iskoristiva je na relativno malo mjesta.

Ovisno o geološkim uvjetima, količina oslobođene topline različita je od područja do područja i kroz vrijeme, prosječno iznosi do 57mW/m^2 (količina topline koja prolazi kroz jediničnu površinu u jedinici vremena - toplinski tok) na kontinentalnoj te 99mW/m^2 na oceanskoj kori. Kontinuirano oslobađanje topline stvara opće smanjenje u temperaturi od unutrašnjih dijelova planete prema površini, što je objašnjeno geotermalnim gradijentom, tj. varijacijom temperature s dubinom, protokom topline i toplinske vodljivosti okolnih stijena. Najviše vrijednosti, $40\text{--}80^\circ\text{C/km}$ (porast temperature po jedinici dubine), zabilježene su u vulkanskim područjima gdje je kora tanka i vruća te srednjooceanskim hrptovima gdje je magma blizu

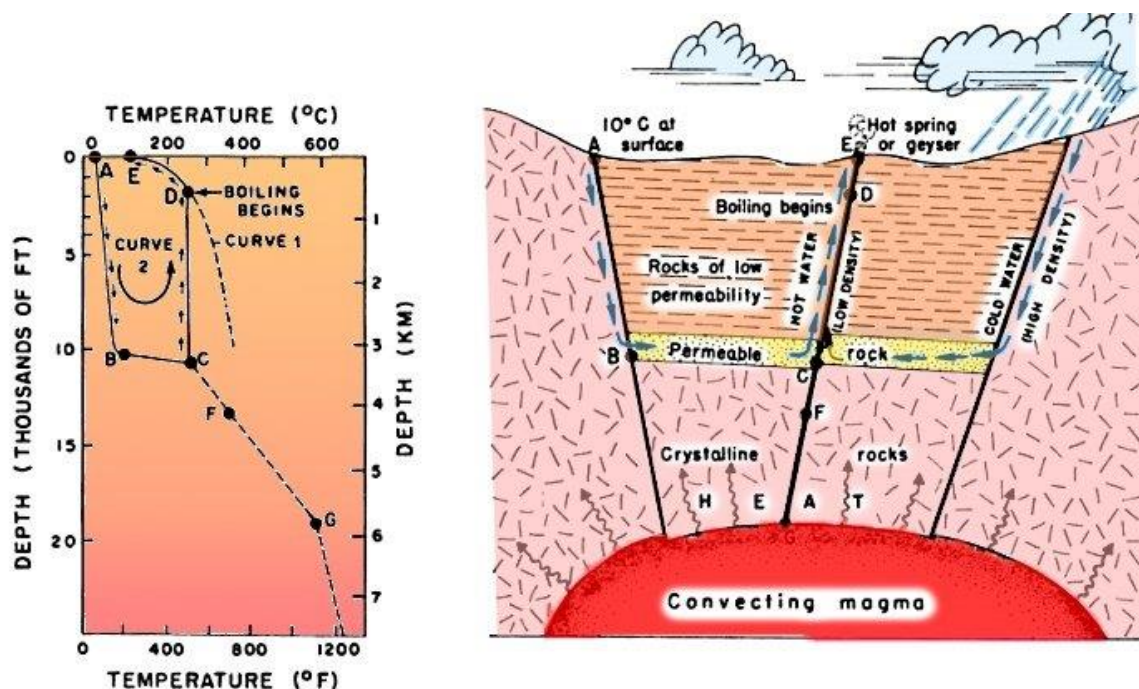
površine; u zonama subdukcije i zonama bez tektonske aktivnosti gradijent je najniži, oko 20–30 °C/km. Na površini postoji uski dio podzemlja od nekoliko metara na koji utječu vanjske temperature i podložen je sezonskim promjenama temperature zraka, tako da i geotermalni gradijent oscilira sukladno tome. Ispod te dubine temperatura tla je stabilna i odgovara temperaturi zraka, u većim dubinama glavnu ulogu preuzima geotermalni gradijent (Manzella et al., 2018).

Većina geotermalnih istraživanja odvija se tamo gdje je geotermalni gradijent veći te je stoga bušenje moguće na plićem području, a također je i jeftinije. Do geotermalnih resursa plitke dubine dolazi zbog: prodiranja rastaljenih stijena (magma) iz dubine, dovodeći velike količine topline prema gore; visoke površinske topline, zbog tanke kore i visokog temperaturnog gradijenta; uspona podzemne vode do nekoliko kilometara dubine i zagrijavanja zbog normalnog temperaturnog gradijenta; toplinskog prekrivanja ili izolacije dubokih stijena, stijenama poput škrljavca čija je toplinska vodljivost niska i anomalijskog zagrijavanje plitkih stijena raspadom radioaktivnih elemenata (Lundl et al., 2008).

2.1. Geotermalna ležišta

Geotermalni sustavi mogu se naći u područjima s uobičajenim ili malo višim vrijednostima geotermalnog gradijenta, a posebno u područjima oko ruba litosfernih ploča u kojima geotermalni gradijenti mogu biti znatno veći od prosječne vrijednosti. U prvom slučaju sustav će biti karakteriziran niskim temperaturama, obično ne višim od 100 °C, na ekonomski isplativim dubinama; u drugom slučaju temperature bi mogle obuhvatiti širok raspon od niskih do vrlo visokih, pa čak i iznad 400 °C (Dickson i Fanelli, 2005).

Postoji pet značajki koje čine hidrotermalni (topla voda) geotermalni sustav komercijalno održivim. To su izvor topline, propusni rezervoar, stalna opskrba vodom, gornji sloj nepropusne stijene te pouzdan mehanizam za ponovno punjenje. Takav sustav prikazan je na Slici. 1 gdje hladna voda za ponovno punjenje dolazi u obliku kiša (A) i prodire kroz rasjede i lomove duboko u formaciju gdje dolazi u kontakt sa zagrijanim stijenama; propusni sloj pruža manji otpor (B), a kako se tekućina zagrijava, postaje manje gusta i ima tendenciju uspona unutar formacije; ako naiđe na veliku pukotinu (C), penjat će se prema površini gubeći pritisak dok ne dosegne temperaturu vrenja (D), tada se pretvara u paru koja se može pojaviti u obliku fumarola, termalnog izvora, bazena s blatom ili gejzira (E) (DiPippo, 2005).



Slika 1. Shematski model hidrotermalnog geotermalnog sustava [19]

Geotermalni sustavi javljaju se u različitim vrstama geoloških formacija i na područjima s različitim toplinskim, hidrološkim i kemijskim svojstvima. Formacije se mogu klasificirati kao vlažne ili suhe te prema temperaturnom režimu (Tablica 1). Hidrotermalnih sustavi mogu se podijeliti na one kojima dominira para, u njima se proizvodi suha ili pregrijana para, te sustave u kojima dominira tekućina, koji proizvode toplu vodu ili mješavinu pare i vode. Hidrotermalni sustav kojim dominira para je najisplativiji jer je para proizvedena s malo vode ili bez nje izravno upotrebljiva u parnim turbinama niske učinkovitosti. Hidrotermalni sustav kojim dominira tekućina temperature između 100 °C i 180 °C obično zahtijeva korištenje sekundarnog fluida i odvajanje pare kako bi se pokrenula turbina. Proizvodnja električne energije iz sustava s tekućinom je teža, budući da samo dio tople vode pretvara u paru, toplinski učinak je nizak, a problemi s pogonom i uklanjanjem otpadnih voda su ozbiljniji, no u današnjem tehnološkom razvoju ova vrsta ležišta je jedina pogodna za komercijalnu proizvodnju električne energije. Ako je temperatura viša od 180 °C voda se na površini može pretvoriti u paru i koristiti izravno u turbini. Hidrotermalni sustavi u kojima dominira tekućina mnogostruko su obilniji od sustava kojim dominira para. Vrsta vlažne formacije za koju još nije razvijena mogućnost ekonomski isplativog iskorištavanja jest resurs pod pritiskom. Ova vrsta resursa opisuje se kao međuprostorne vode zarobljene u velikim, dubokim sedimentnim bazenima pri temperaturama od 150 °C do 180 °C i pri tlaku od 275 do 415 bara, sa stopama proizvodnje od oko milijun litara tekućine dnevno koji sadrže značajne koncentracije prirodnog plina, to bi jamčilo dvostruki izvor energije. Suhe formacije uključuju magmu i

nepropusne vruće stijene povezane s aktivnim vulkanizmom. Proučavaju se metode za korištenje geotermalne energije iz takvih resursa pomoću sustava umjetne cirkulacije (Kruger, 1976).

Tablica 1. Temperaturna klasifikacija geotermalnih sustava i karakteristike (Prilagođeno prema Kruger, 1976)

TEMPERATURA LEŽIŠTA	FLUID U LEŽIŠTU	PRIMJENA
> 180 °C visoko temperaturna ležišta	para ili voda	proizvodnja električne energije
100–180 °C srednje temperaturna ležišta	Voda	proizvodnja električne energije izravno korištenje
< 100 °C nisko temperaturna ležišta	Voda	izravno korištenje

2.2. Geotermalne elektrane

Razvijene su različite tehnologije korištenja geotermalne energije te se razlikuju dva osnovna načina, izravno i neizravno korištenje. Prvi način podrazumijeva korištenje vruće vode koja izbija ispod zemlje za npr. grijanje kućanstava, staklenika i neke industrijske procese, dok drugi način korištenja podrazumijeva transformaciju geotermalne u električnu energiju u elektranama. Prilikom korištenja geotermalne energije potrebne su minimalno dvije bušotine, utisna i proizvodna. Proizvodnom bušotinom se kroz zagrijani fluid crpi toplina dok se utisna bušotina koristi za obnavljanje geotermalnog ležišta. Za pogon turbine elektrane koristi se para (vlažna ili suha) koja može biti dobivena direktno iz ležišta ili biti umjetno proizvedena u vrućim suhim stijenama. Moguće je i posredno dobivanje pare za pogon turbine, zagrijavanjem radnog fluida s vrelištem nižim od vrelišta vode.

Specifičnosti geotermalnih elektrana jest u tome što proizvode električnu energiju 24 sata na dan, 365 dana u godini bez obzira na vremenske uvjete, rade bez sagorijevanja fosilnih goriva

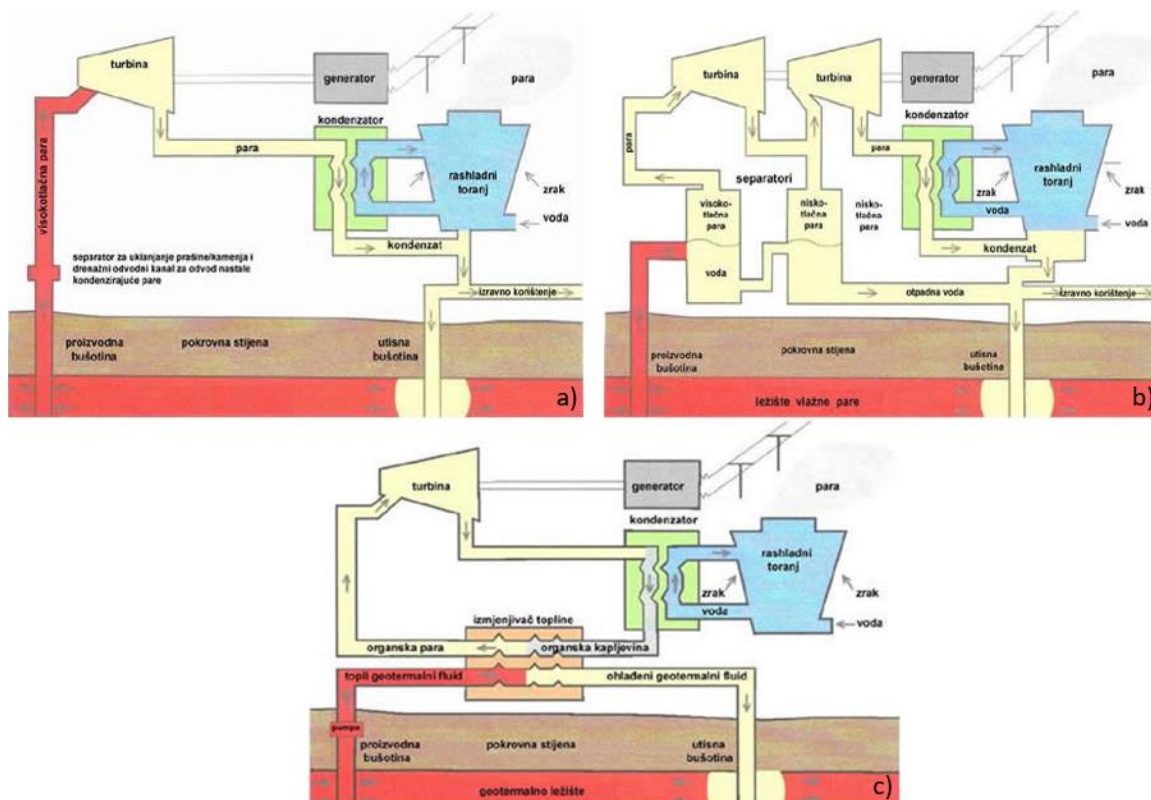
poput ugljena, plina ili nafte te zbog toga nisu ovisne o tržišnim kretanjima cijena energenata. Zahtijevaju značajna ulaganja no zahtijevaju minimalno održavanje i imaju niske operativne troškove u usporedbi s konvencionalnim elektranama. Velik dio tih troškova odnosi se na istraživanje ležišta i gradnju bušotine. Nadalje, geotermalne elektrane zahtijevaju posebno razvijene sustave grijanja i hlađenja, kao i drugu opremu koja može podnijeti visoke temperature, zauzimaju malo prostora na površini i rade s niskom razinom buke. Općenito se smatraju ekološkim no postoji nekoliko aspekata zagađivanja prilikom iskorištavanja geotermalne energije (velika potrošnja vode može uzrokovati deficit u okolišu, fluidi iz zemlje sadrže velik broj toksičnih kemikalija uključujući arsen i živu, kao i stakleničke plinove poput sumporovodika, ugljičnog dioksida, metana, amonijaka i radona. A ako se pogrešno odlože ili obrade mogu dospjeti u atmosferu ili iscuriti u podzemne vode i imati negativan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje), ali oni su neznatni u usporedbi s onečišćenjem povezanim s konvencionalnim izvorima. Postoje tri osnovna tipa geotermalnih elektrana: postrojenja sa suhom parom, postrojenja s isparavanjem (jednostrukim i dvostrukim) te binarna postrojenja (Slika 2).

Postrojenja sa suhom parom su prvi tip geotermalnih elektrana korištenih za pretvaranje geotermalne energije u električnu. Koriste suhozasićenu ili pregrijanu paru, koja sadrži nekondenzirajuće plinove, direktno iz ležišta kojim dominira para ili suha para. Para iz bušotina se cjevovodom prenosi do elektrane gdje se izravno koristi za pokretanje turbina, nakon ekspanzije ispušta se u atmosferu. Između svake bušotine i postrojenja nalazi se separator za uklanjanje čestica kao što su prašina i komadići kamenja, odvodni kanali duž cjevovoda radi uklanjanja kondenzata koji nastaje tijekom prijenosa te konačno sustav za uklanjanje vlage na ulazu u elektranu. Kod postrojenja s kondenzacijom para se na izlazu iz turbine kondenzira i hladi rashladnim tornjevima; suvišak kondenzata (obično 10–20% mase pare) obično se ubrizgava natrag u rezervoar. Dugotrajna proizvodnja može iscrpiti rezervoar i razvijaju se novi načini za povećanje količine tekućine koja se preusmjerava u njega (DiPippo, 1999).

Kada se u geotermalnom ležištu nalazi mješavina vruće vode i pare temperature više od 180 °C, postrojenje s jednostrukim isparavanjem je relativno jednostavan način pretvaranja geotermalne energije u električnu energiju. Fluid započinje kao tekućina pod tlakom u ležištu, a kako je tlak u bušotini općenito niži od tlaka u ležištu fluid pod tlakom struji prema površini gdje zbog pada tlaka određeni dio isparava te se istovremeno dobiva topla voda i para. Za pokretanje turbine koja zauzvrat pokreće električni generator koristi se para. Važno je

učinkovito razdvojiti dvije faze separatorima prije nego što para dođe u turbinu jer geotermalna voda često sadrži veliku količinu otopljenih minerala, uglavnom klorida, bikarbonata, sulfata, borata, fluorida i silicija. Tekućina uparena u paru može uzrokovati eroziju i/ili zasoljenje cjevovoda i turbine. Općenito, kvaliteta pare koja ulazi u turbinu trebala bi biti najmanje 99,995% suha. Ovakve vrste elektrana proizvode veliku količinu otpadne vode te je zbog velike količine otopljenih minerala geotermalni fluid potrebno, putem utisne bušotine, vratiti u ležište. Postrojenje s dvostrukim isparavanjem predstavlja poboljšanje u odnosu na postrojenje s jednostrukim isparavanjem u tom smislu da daje 15–25% više izlazne snage za iste uvjete geotermalnog fluida. Postrojenje je složenije, skuplje i zahtjevnije po pitanju održavanja, ali više dobivene izlazne snage najčešće opravdava gradnju takvih postrojenja. Temeljno novo svojstvo je dodatni postupak isparavanja koji se nameće odvojenoj tekućini koja napušta primarni separator kako bi se stvorila dodatna para, ali pod nižim tlakom od primarne pare (DiPippo, 2005).

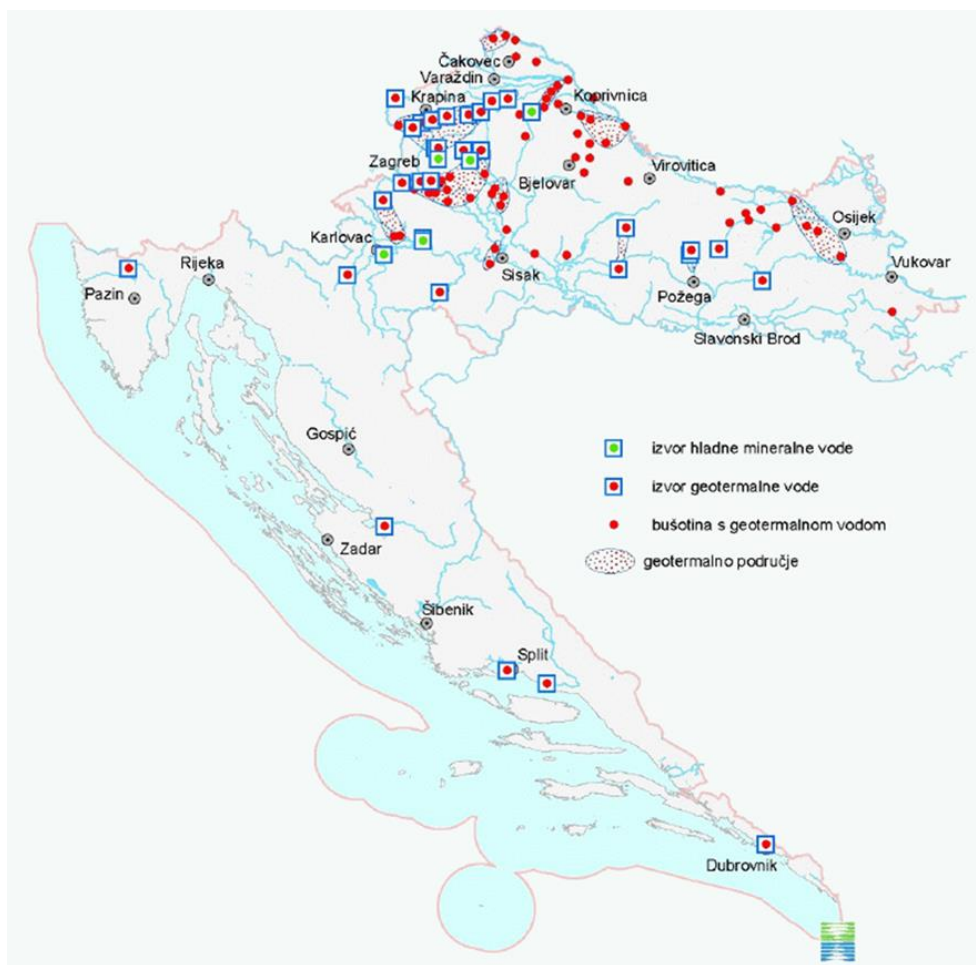
Tehnologija binarnih postrojenja je vrlo isplativ i pouzdan način dobivanja električne energije iz geotermalnih polja kojima dominira voda temperature ispod 170 °C. Binarne elektrane koriste sekundarni radni fluid, obično organske tekućine (npr. pentan, propan te ostale ugljikovodike) koja imaju nisku točku isparavanja i visok tlak pare pri niskim temperaturama u usporedbi s parom geotermalnog fluida. Radni fluid djeluje kroz Organski Rankineov Ciklus (ORC) tako da geotermalni fluid daje toplinu radnom fluidu kroz izmjenjivače topline, u kojima se on zagrijava i isparava, a proizvedena para pokreće turbinu, zatim se hladi i kondenzira u vodom ili zrakom hlađenom kondenzatoru te ciklus započinje iznova. Odabirom prikladnih radnih fluida, binarni sustavi mogu se konstruirati tako da koriste geotermalne fluide u rasponu temperature od 85–170 °C. Gornja granica ovisi o toplinskoj stabilnosti organskog radnog fluida, a donja o tehničko-ekonomskim čimbenicima; ispod određene temperature veličina izmjenjivača topline učinila bi projekt ekonomski neisplativim. Novi binarni sustav, Kalina ciklus, koji koristi smjesu voda-amonijak kao radni fluid i kroz koji se stvara dvokomponentna para (npr. 70% amonijak i 30% voda) razvijen je 1990-ih, učinkovitiji je od postojećih geotermalnih binarnih elektrana ORC, ali je složenije konstrukcije (Dickson i Fanelli, 2005).



Slika 2. Shematski prikazi tipova geotermalnih elektrana: a) postrojenje sa suhom parom, b) postrojenje s dvostrukim isparavanjem, c) binarno postrojenje [18]

3. GEOTERMALNA ENERGIJA U REPUBLICI HRVATSKOJ

U Republici Hrvatskoj postoji stoljetna tradicija iskorištavanja geotermalne vode iz prirodnih izvora u balneološke svrhe (rekreacija i rehabilitacija). Više od 20 termalnih izvora, poznatih još od Rimskog doba, ponajviše se nalaze u sjeverozapadnom i središnjem dijelu Republike Hrvatske, a nekoliko njih se nalazi i uz obalu Jadranskog mora (Slika 3). Tijekom druge polovice dvadesetog stoljeća s razvitkom naftne industrije, provođenjem naftnogeoloških istraživanja i kasnijom proizvodnjom ugljikovodika počeo je i razvoj geotermalne energije jer su istraživanjem nafte i plina otkrivena i geotermalna ležišta, te je tako stvorena tehnološka osnova za iskorištavanje geotermalne vode u energetske svrhe. Geotermalna voda uglavnom se koristi s izvora i iz plitkih bušotina, a rjeđe iz dubokih bušotina, za sada se iskorištava samo manji dio potencijalnih lokacija utvrđenih hidrogeološkim istraživanjima.



Slika 3. Poznata geotermalna nalazišta u Republici Hrvatskoj [20]

Geotermalna energija se u balneološke svrhe i za grijanje prostora trenutno koristi u 18 aktivnih toplica. Osim toga, na tri lokacije geotermalna energija koristi se za grijanje u stakleničkoj proizvodnji povrća, na dvije lokacije za individualno grijanje te u jednom manjem sustavu daljinskog grijanja (Tablica 2.). Njihova ukupna toplinska snaga iznosi oko 85 MWt (toplinski megavat-proizvedena toplinska snaga) od čega se 42,3 MWt odnosi na daljinsko grijanje, 24 MWt na toplice, 6,5 MWt na stakleničku proizvodnju 12,6 MWt na individualno grijanje (Živković et al., 2019).

Tablica 2. Iskorištavanje termalnih voda u Republici Hrvatskoj [6]

ISKORIŠTAVANJE	LOKACIJA	ISKORIŠTAVANJE	LOKACIJA
Balneološke svrhe	Bizovac Darugar Naftalan Terme Jezerčica Krapinske Toplice Lešće Lipik Istarske toplice Stubičke Toplice Sv. Martin Topusko Tuhelj Varaždinske Toplice Velika Sutinske toplice Sveta Jana Samobor – Šmidhen Zelina	Staklenici	Sv. Nedjelja Bošnjaci Krapinske Toplice
		Individualno grijanje prostora	Zagreb – Mladost Zagreb – Lučko Bizovac Krapinske Toplice Lipik Stubičke toplice Topusko Varaždinske toplice

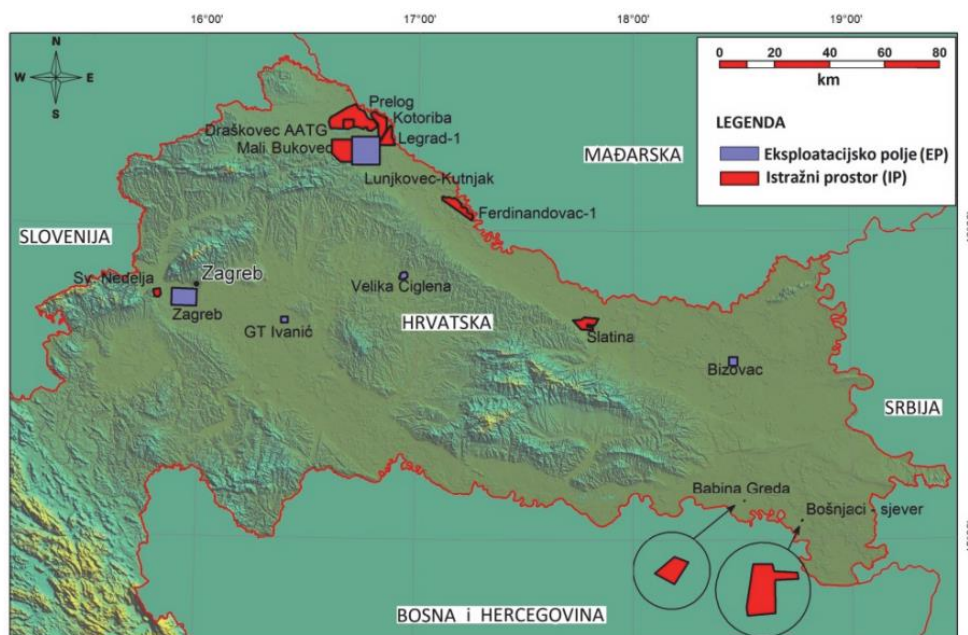
3.1. Geološka građa Republike Hrvatske

Položaj Republike Hrvatske u dvije glavne regionalne geološke jedinice, Panonski bazen na sjeveru i Dinaridi na jugu, ima izravan utjecaj na geotermalni potencijal oba područja. Dinaridi su 200–300 km široki planinski pojas koji se pruža u smjeru sjeverozapad-jugoistok uz obalu Jadranskog mora, nastali su kao rezultat konvergentnih kretanja Afričke ploče prema Euroazijskoj ploči što je uzrokovalo subdukciju kontinentalne kore i produbljivanje Moho diskontinuiteta. Panonski bazen rezultat je istih pokreta Afričke ploče, a njegovo formiranje započelo je u ranom miocenu, dok je subdukcija uzrokovala toplinske izmjene u kori i formiranje bazena; prvu fazu razvoja bazena karakteriziralo je tektonsko stanjivanje kore i izostatsko taloženje. Stoga se, zbog različitih geoloških postavki i podrijetla, značajno razlikuju u pogledu geotermalnih uvjeta. Debljina kontinentalne kore u dinaridskom području kreće se između 35 i 40 km, dok se na području Panonskog bazena kreće između 25 i 30 km što izravno utječe na gustoću toplinskog toka i geotermalni gradijent. U skladu s tim, Hrvatsku bismo mogli podijeliti u dvije geotermalne regije: područje Panonskog bazena i Dinaride. Područje Panonskog bazena ima značajan geotermalni potencijal gdje je temperaturni gradijent obično veći od 0,04 °C/m, a na mjestima dostiže vrijednosti veće od 0,07°C/m; gustoća toplinskog toka je također visoka i kreće se od 60 do preko 100 mW/m². S

druge strane, u području Dinarida temperaturni gradijent kreće se između 0,01 i 0,03 °C/m, a gustoća toplinskog toka između 20 i 60 mW/m² (Energetski institut Hrvoje Požar, 2017). Postoje dvije glavne vrste geotermalnih vodonosnika, prva vrsta se odnosi na vodonosnike s međuzrnskom poroznošću koji su prisutni u klastičnim mezozojskim i tercijarnim naslagama, dok se druga vrsta odnosi na sekundarnu poroznost prisutnu u frakturiranim mezozojskim i miocenskim karbonatima. Pregledom dostupnih podataka može se zaključiti kako naslage mezozojskih masivnih karbonata s visoko razvijenom sekundarnom poroznošću mogu sadržavati geotermalni fluid puno većeg protoka i viših temperatura. Takvi vodonosnici mogu podržavati ekonomski vrlo isplativu proizvodnju električne energije. Osim lokacija pogodnih za proizvodnju električne energije, značajan dio Panonskog bazena posjeduje povoljne karakteristike kao što su prihvatljiva izdašnost i temperature za direktno korištenje toplinske energije. U tu svrhu moguće je koristiti vodonosnike koji se nalaze na manjim dubinama gdje se geotermalna energija koristi u stakleničkoj proizvodnji povrća (Škrlec et al., 2019).

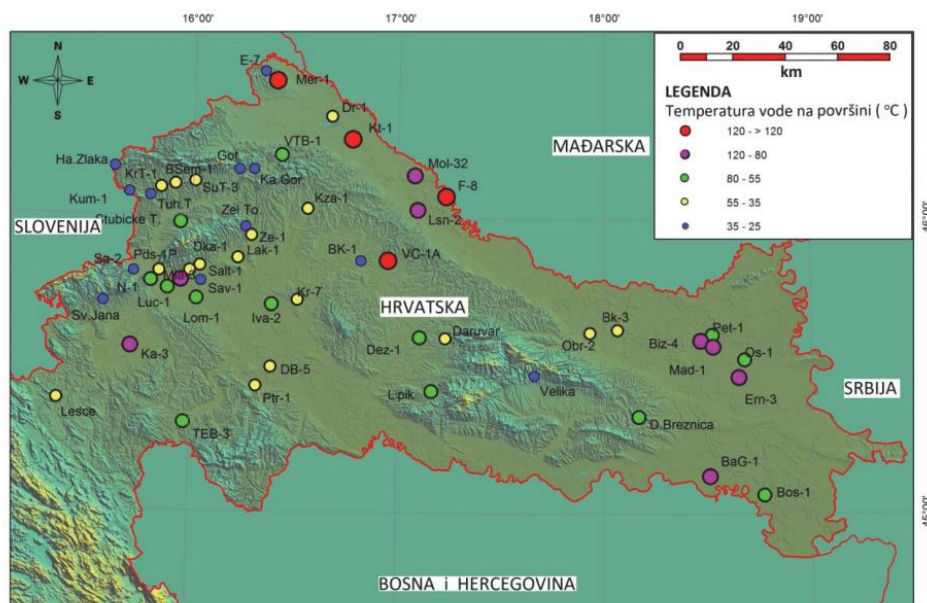
3.2. Geotermalni lokaliteti Republike Hrvatske

Krajem 2018. godine, s radom je započela prva hrvatska geotermalna elektrana Velika 1 u Velikoj Cigleni. S obzirom na to da je geotermalni potencijal na predmetnoj lokaciji poznat još od 80-ih godina prošlog stoljeća, radi se o vrlo značajnom uspjehu hrvatskog geotermalnog sektora. Osim za proizvodnju električne energije u Velikoj Cigleni, eksploatacijska dozvola je izdana za hibridnu geotermalnu elektranu koja se razvija na sjeverozapadu Republike Hrvatske (AAT Geothermae) te su izdana rješenja za odobrena eksploatacijska polja geotermalne vode Bizovac, Bošnjaci-Sjever, Ivanić i Sveta Nedelja za korištenje toplinske energije. Za još sedam lokacija je izdana istraživačka dozvola, od čega se šest odnosi na proizvodnju električne energije (Ferdinandovac, Legrad 1, Lunjkovec, Kutnjak, Kotoriba, Slatina 1 i Slatina 2), a jedna za korištenje toplinske energije (GP Zagreb) (Slika 4 i Slika 5). Na prostoru Republike Hrvatske postoji vrlo značajan potencijal za iskorištavanjem plitke geotermalne energije. To se ponajviše očituje na panonskom prostoru te uz jadransku obalu gdje postoji velika mogućnost korištenja dizalica topline koje kao izvor topline koriste tlo (engl. Ground Source Heat Pumps, GSHP; Živković et al., 2019).



Slika 4. Korišteni geotermalni izvori i upotrebljive bušotine [7]

Za proizvodnju struje na EPI: Lunjkovec-Kutnjak i IP: Mali Bukovec, Legrad-1, Kotoriba i Ferdinandovac-1, konzervativnom procjenom očekujemo daljnjih 100 MWe (električni megavat-proizvedena električna snaga) instalirane snage ili gotovo 2,5% postojećih elektrana u Hrvatskoj odnosno 29% nuklearne elektrane Krško. Tu se suvremenim tehnologijama može ekonomično proizvoditi struju iz geotermalne vode s prosječnim dotokom 100 l/sec i temperaturom $>140\text{ }^{\circ}\text{C}$, odnosno na izlazu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ koja u kogeneraciji daje 500 MWt za toplinarstvo (Kolbah et al., 2008).



Slika 5. Dodijeljena geotermalna polja - (EP) i odobreni istražni prostori (IP) [7]

3.2.1. Bizovac

Rezervoar termalne mineralne vode Bizovac otkriven je 1967. godine tijekom istraživanja nafte i plina u dravskoj depresiji. Bušotina izbušena iste godine dovela je do otkrića veće količine hidrotermalne vode, u sljedećih nekoliko godina izvršeno je još bušenja. Voda se crpi iz slojeva na dubini između 1761 i 1841 metra. Termalna voda akumulirana je u raspucanim stijenama breče i gnajsa vjerojatno miocenske starosti. Ove akumulacijske stijene prekrivene su gustim sedimentima gornjeg miocena, pliocena i kvartara. Temperatura vode na ušću bušotine je 96,8 °C. Studije koje bi potvrdile mogućnost iskorištavanja vode u komercijalne svrhe provedene su 1970-ih. Rezultati ispitivanja pokazali su da je opskrba vodom u bušotini Bizovac 4 (Biz-4) ograničena na 1,4 l/s, ali hladna voda ubrizgana u bušotinu Bizovac 2 (Biz-2) povećala je kapacitet bušotine Biz-4 na 3,3 l/s. Bušotina Slavonka-1 (Sla-1) duboka je 1667 metara s temperaturom vode od 75 °C na ušću i prinosom od 3,17 l/s. Osim za terapijsku primjenu, voda se koristi i u energetske svrhe u zagrijavanju prostora pri čemu se temperatura spušta na 43 °C. Danas se geotermalna voda dobiva preko dvije proizvodne i jedne utisne bušotine, a trenutni prinos je 5,5 l/s. (Energetski institut Hrvoje Požar, 2017.)

3.2.2. Draškovec

Na lokaciji Draškovec u tijeku je razvoj inovativne napredne geotermalne elektrane s internalizacijom ugljikovih spojeva AAT Geothermae. To je jedinstveni projekt u kojem će hibridni sustav biti osmišljen kako bi iskoristio izravnu toplinu geotermalne vode kao i nekonvencionalne ugljikovodične plinove otopljene u vodi za proizvodnju električne energije. Plinovi će se odvajati od vode i sagorijevati u plinskim elektranama. Nadalje, CO₂ (ugljikov dioksid) nastao izgaranjem, kao i sav doveden vrućom vodom, skupit će se stopom od 98% i sigurno putem utisne bušotine, vratiti u ležište. Izvršeno je bušenje prve dvije bušotine, a ostali pripremni radovi za bušenje još 6 bušotina su u tijeku; temperaturu vode od 100 °C dostupna je na dubini od samo 1900 m Daljinsko grijanje spa centra i obližnjeg grada Preloga planirano je kao sljedeća faza projekta (Živković et al., 2019).

3.2.3. Karlovac

Geotermalni lokalitet nalazi se oko 8 km sjeveroistočno od grada Karlovca, a otkriven je 1983. godine bušotinom Karlovac-2. Poslije, tijekom 1988. godine, izrađena je bušotina Karlovac-3, kojom je potvrđen geotermalni potencijal spomenutog lokaliteta. Udaljenost

između bušotina Ka-2 i Ka-3 iznosi približno 3 km. Obje bušotine su u vlasništvu Ine. Duboka istražna bušotina Ka-2 izrađena je u razdoblju od 1982. do 1983. godine te je dosegla konačnu dubinu od 4145 metara. Kanalom bušotine presječen je niz sedimenata s izraženim izolatorskim svojstvima, kao što su glinoviti lapori, lapori, siltiti i šejlovi, te stijene s dobrim kolektorskim svojstvima. Ispitano je pet intervala bušotine, ali nisu utvrđene ekonomski vrijedne akumulacije ugljikovodika. U sklopu likvidacije bušotine tijekom 2001. godine ispitana su dva intervala na proizvodnju vode i probe primanja. Istražna bušotina Ka-3 izrađena je 1988. godine te je bušenje završeno u mezozojskom sloju, na dubini od 3523 metra. Na osnovi geološkog monitoringa, testiranja i analize karotažnih dijagrama, izostala su predviđena zasićenja ugljikovodicima. Bušotina je ispitana na dotok, te je ispitivanjem eruptivno dobivena voda (20–14 l/s), saliniteta 0,99 g NaCl/l i temperature na ušću od 87 °C do 94 °C. Daljnja ispitivanja te bušotine učinjena su u sklopu programa njene likvidacije 2001. godine. Geotermalni potencijal kompleksa je velik jer se radi o znatnim raspucanim naslagama velikog rasprostiranja i debljine. Najviša izmjerena temperatura vode je 140 °C (Kurevija, Kljaić i Vulin, 2010). Tvrtka GeotermiKA za energetiku iz Karlovca, nakon provedenog natječaja iz Ministarstva zaštite okoliša i energetike, dobila je krajem 2019. godine petogodišnju dozvolu za istraživanje geotermalnih voda u istražnom prostoru Karlovac-1. [17]

3.2.4. Lunjkovec - Kutnjak

Geotermalno polje Lunjkovec-Kutnjak smješteno je na području Varaždinske i Koprivničko-Križevačke županije. Povoljni geotermalni parametri ovog područja omogućavaju pridobivanje geotermalne vode od oko 50 l/sec s temperaturom višom od 140 °C. Geotermalno ležište je ispitano s dvije istražne (naftne) bušotine, a površina ležišta je oko 100 km². U nepropusnim stijenama, između ležišta i površine, temperaturni gradijent je viši od 0.06°C/m. Na geotermalnu vodu ispitane su dvije bušotine Kutnjak-1 konačne dubine 2430 metara te Lunjkovec-1 konačne dubine 2201 metar. Tijekom 2004. godine u bušotini Kutnjak-1 su obavljeni dodatni radovi i ispitivanja. Pri tome je maksimalno davanje bušotine samo izljevom bilo 53 l/s uz temperaturu na ušću od 130 °C. Geotermalno ležište proteže se na 83 km² na području Kutnjak-Lunjkovec nalazi se na dubini 2000–2400 metara s prosječnom debljinom sloja 117 metara. Ležište sadrži oko 700 milijuna m³ geotermalne vode, a iskorištena geotermalna voda vraća se u ležište. INA-Industrija nafte d.d. (Naftaplin) je tijekom 2004. godine stekla koncesijska prava eksploatacije geotermalne vode, no Ministarstvo gospodarstva je 2013. godine (zbog neizvršavanja obaveza iz Rješenja o

odobrenju Eksploatacijskog polja) obavilo brisanje trgovačkog društva INA-industrija nafte d.d. kao ovlaštenika eksploatacijskog polja geotermalne vode Lunjkovec-Kutnjak i kao ovlaštenika upisalo Republiku Hrvatsku. U studenom 2014. godine se raspisalo javno nadmetanje za odabir najpovoljnijeg ponuditelja za dodatno istraživanje geotermalne vode radi davanja koncesije za eksploataciju geotermalne vode i odabralo ponudu trgovačkog društva Mb Geothermal d.o.o. Zagreb, kao najpovoljnijeg ponuditelja (Srpak, Zeman i Sabol, 2019).

3.2.5. Velika Ciglena

Velika Ciglena je prva hrvatska geotermalna elektrana i ujedno najveća elektrana s organskim Rankineovim ciklusom (ORC) u Europskoj uniji. Radi se o geotermalnoj elektrani snage 17,5 MW. Postrojenje se nalazi pokraj Bjelovara i iskorištava geotermalni potencijal bjelovarske subdepresije koji je otkriven 1980. godine, pri istraživanju potencijalnih nalazišta nafte za potrebe INA-e. Investitor u projekt je konzorcij hrvatske tvrtke Geoen i turske tvrtke MB Holding, a postrojenje za pogon turbine i proizvodnju električne energije pomoću ranije spomenutog procesa s ORC-om iskorištava vrelu vodu iz podzemlja na temperaturi od oko 170°C. Proizvedena električna energija isporučuje se u javnu mrežu, a postrojenje ima status povlaštenog proizvođača, izvijestila je talijanska tvrtka Turboden koja je za projekt isporučila i izvela ključne dijelove postrojenja. [16] Velika Ciglena je energetska najpovoljnije geotermalno ležište s geotermalnim potencijalom od 50 MWt. Na geotermalnom polju Velika Ciglena otkrivena je termalna voda temperature 172 °C, na dubini od 2500 metara u vrlo propusnim stijenama. Temperaturni gradijent iznosi 0,062 °C/m. Geotermalna elektrana sastoji se od dvije proizvodne bušotine Velika Ciglena 1 (VC-1) i Velika Ciglena 1A (VC-1A), međusobno udaljene nekoliko stotina metara, dok su utisne bušotine Velika Ciglena 2 (VC-2) i Patkovac 1 (Pat-1) od proizvodnih bušotina udaljene između dva do tri kilometra. Vrela se voda u proizvodnoj bušotini VC-1 crpi s dubine od 4700 metara, a u bušotini VC-1A s oko 3000 metara dubine. Utisna bušotina Pat-1 duboka je između 2800 i 3000 metara, a utisna bušotina VC-2 oko 3000 metara (Ravenščak, 2016). Dovoljna međusobna udaljenost proizvodnih, odnosno iscrpnih, i utisnih bušotina osigurava ponovno zagrijavanje geotermalne vode do potrebne temperature, ali i održavanje stabilnog tlaka unutar bušotine. Za optimalno funkcioniranje elektrane i očuvanje tlaka i temperature unutar bušotine važno je da iskorištena geotermalna voda koja se putem utisne bušotine vraća u podzemlje ne bude hladnija od 70 °C. Ako je voda hladnija, dolazi do postepenog hlađenja geotermalne vode i pada tlaka unutar bušotine, te je takva bušotina za nekoliko godina neupotrebijiva. Očekivana izdašnost ležišta

u Velikoj Cigleni, prema dosadašnjim eksperimentalnim bušenjima, ne samo da je potvrđena nego i uvelike premašena. [16]

3.2.6. Zagreb

Geotermalno polje se nalazi na jugozapadnom prilazu Zagrebu. Otkriveno je 1977. godine nakon hidrodinamičkih ispitivanja u negativnoj naftnoj bušotini Stupnik-1 koja je izrađena još 1964. godine. Polje obuhvaća prostor od oko 54 km² te je do sada ukupno izrađeno 14 bušotina. Ležište predstavljaju dolomitne i vapnenačke stijene na dubinama od 881–1374 metra. Izmjerena srednja temperatura vode u ležištu bušotine Mladost-1 iznosi 75 °C, a izmjereni tlak je 104 bara. Ispitivanjem dubljih intervala izmjerena je temperatura od 82 °C. Geotermalna energija na ovom geotermalnom polju koristi se kroz dva tehnološka sustava. Tehnološki sustav "Mladost" s proizvodnom bušotinom Mla-3, proizvodno-utisnom bušotinom Mla-2 i utisnom bušotinom Mla-1. Geotermalna voda koristi se za grijanje bazena i pripadajućih objekata u sportsko-rekreacijskom centru. Tehnološki sustav nedovršenog objekta Sveučilišne bolnice Zagreb s 4 bušotine, proizvodnim KBNZ-1B i KBNZ-1A i utisnim bušotinama KBNZ-3α i KBNZ-2A, gdje se geotermalna voda koristi za pojedinačno grijanje prostora i grijanja skladišta pri Kliničkoj bolnici Novi Zagreb na lokaciji Blato (Getliher i Horvat, 2008). U nizinskom dijelu gradskog područja Zagreba, koje karakterizira plitki aluvijalni vodonosnik Save, povoljnije je koristiti dizalice topline s podzemnom vodom kao izvorom topline (engl. Groundwater Heat Pump - GWHP), dok je na obroncima Medvednice (Podsljemenska urbanizirana zona) primjerenije instalirati dizalice topline s tlom kao izvorom topline (GSHP). Plitki geotermalni potencijal područja istražuje se u okviru Horizon 2020 projekta MUSE (Managing Urban Shallow geothermal Energy). Istraživanje će se usredotočiti na GWHP, budući da se isti vodonosnik koristi i za vodoopskrbu, a mogućnosti za postavljanje GSHP-a istraženi su prethodnim projektom GeothermalMapping. U plitkom podzemlju urbanih područja postoji konkurencija različitih korisnika (sustavi vodovoda i odvodnje, dizalice topline, duboke podzemne građevine poput hidroizoliranih podvožnjaka, podzemnih garaža i dubokih temelja), što može dovesti do sukoba. Postojeće metodologije nužno je prilagoditi potrebama urbaniziranih područja (područja s velikim brojem potencijalnih korisnika plitkog podzemlja) u lokalnom mjerilu, jer će ona predstavljati najvažnije tržište za plitku geotermalnu energiju u doglednoj budućnosti te se očekuje da će biti glavni pokretač dekarbonizacije sektora grijanja i hlađenja (Borović, Terzić i Urumović, 2019).

4. ZAKLJUČAK

Geotermalna energija predstavlja gotovo neiscrpan resurs u obliku toplinske energije koji se može izravno koristiti ili pretvarati u električnu energiju, ne ovisi o vanjskim uvjetima te se pravilnim postupanje može iskorištavati dugi niz godina; isto tako pravilnim postupanjem već zanemariv utjecaj geotermalnih elektrana (u odnosu na konvencionalne vrste elektrana) na okoliš može se svesti na potpuni minimum. Budući da geotermalna energija nije svuda lako dostupna trebalo bi ulagati i razvijati ona područja gdje je iskorištavanje moguće jer je jedan od najboljih obnovljivih izvora energija za izravno korištenje te dugoročno komercijalno isplativa.

Republika Hrvatska ima velik potencijal i mogućnosti u iskorištavanju geotermalne energije, interes od stranih ulagača za geotermalno istraživanje i razvoj geotermalnih projekata raste u posljednjih nekoliko godina, no osim stranih ulagača za razvoj zemlje važno je uključiti i domaće tvrtke. Edukacija stanovništva i mladih stručnjaka jedan su od ključnih elemenata za budućnost geotermalne energije u zemlji. Prva hrvatska geotermalna elektrana Velika Ciglena pravi je primjer puta kojim bi u budućnosti trebali krenuti i ostali projekti iskorištavanja geotermalne energije u Republici Hrvatskoj.

5. LITERATURA

- [1] Borović, S., Terzić, J., Urumović, K. (2019) *Conditions for shallow geothermal energy utilization in Dinaric karst terrains in Croatia*. Environmental Earth Sciences, 78, 245–255.
- [2] Dickson, M.H., Fanelli, M. (2005) *Geothermal Energy: Utilization and Technology*, str. 8.
- [3] DiPippo R. (1999) *Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics*, str. 1–2. Mechanical Engineering Department, University of Massachusetts Dartmouth, North Dartmouth, Massachusetts.
- [4] DiPippo R. (2005) *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, 587 str.
- [5] Getliher, A., Horvat, S. (2008) *Uporaba geotermalnih resursa na području grada Zagreba u cilju gospodarskoga razvitka*. Razvitak Zagreba. Zagreb: SECON HDGK d.o.o., 613–620.
- [6] GRUPA autora, (2017) *Geothermal Energy Utilisation Potential in Croatia, Field and Study Visits' Report*. Energetski institut Hrvoje Požar.
- [7] Kolbah S., Škrlec, M., Golub M. (2008) *Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala RH za proizvodnju električne energije*. Inženjerstvo okoliša, 5 (1-2), 61–68.
- [8] Kruger P. (1976) *Geothermal Energy*, str. 160–161. Civil Engineering Department, Stanford University, Stanford, California.
- [9] Kurevija, T., Kljaić, Ž., Vulin, D. (2010) *Analiza iskorištavanja geotermalne energije na geotermalnom polju Karlovac*. Nafta, 61 (4), 198–202.
- [10] Lund1, J.W., Bjelm, L., Bloomquist, G., Mortensen, A.K. (2008) *Characteristics, development and utilization of geothermal resources-a Nordic perspective*. Episodes, 31 (1), 140–147.
- [11] Manzella, A., Allansdottir, A., Pellizzone, A. (2018). *Geothermal Energy and Society*, 287 str.
- [12] Ravenščak J. (2016) *Proizvodni kapaciteti hidrotermalnih ležišta Republike Hrvatske*, Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. 59. str.
- [13] Srpak, M., Zeman, S., Sabol, G. (2019) *Analiza i postojeće stanje izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije*. Podravina, 18 (35), 190–200.

- [14] Škrlec, M., Živković, S., Kolbah, S., Tumara, D. (2019) *Korištenje resursa geotermalne energije u Republici Hrvatskoj*. Nafta i Plin, 39 (159–160), 51–56.
- [15] Živković, S., Kolbah, S., Škrlec, M., Tumara D. (2019) *Geothermal Energy Use, Country Update for Croatia*, European Geothermal Congress 2019. Den Haag, The Netherlands. 7 str.
- [16] URL 1: <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/energijske-tehnologije/item/1082-gte-velika-ciglena.html>, pristupila u svibnju 2020.
- [17] URL 2: <https://www.lider.media/poslovna-scena/hrvatska/geotermika-dobila-dozvolu-za-istrazivanja-geotermalnog-potencijala-uz-karlovac-129662>, pristupila u svibnju 2020.
- [18] URL 3: <http://obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju>, pristupila u svibnju 2020
- [19] URL 4: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-model-of-a-hydrothermal-geothermal-system-after-White-1973_fig15_317388065, pristupila u svibnju 2020.
- [20] URL 5: <http://zakon.poslovna.hr/public/strategija-upravljanja-vodama/456570/zakoni.aspx>, pristupila u svibnju 2020.

6. SAŽETAK

Današnje društvo svjesno je klimatskih promjena i upoznato je sa štetnim utjecajem koji fosilna goriva imaju na okoliš. U skladu s tim teži se pronalasku drugih ekonomski isplativih i ekološki prihvatljivih oblika energije. Jedan od tih je i geotermalna energija koja pripada obnovljivim oblicima energije. Posebno je zanimljiva jer ujedinjuje različite discipline kao što su geologija, hidrologija, geofizika, izrada bušotina i bunara te dizajniranja elektrana; no mali broj ljudi upoznat je s njenim prednostima. U ovom seminaru obrađena je tema geotermalne energije općenito, njene prednosti i mane, načini iskorištavanja i pojavljivanja te koje vrste elektrana postoje. Kao primjer uzeta je Republika Hrvatska, zemlja poznata po bogatstvu mineralnim i termalnim vodama koje se najviše koriste u rehabilitacijske svrhe no postoji i potencijal njihovog korištenja ne samo za već brojne hidroelektrane već i u obliku geotermalne energije.

7. SUMMARY

Today's society is aware of climate change and of the harmful effects that fossil fuels have on the environment. Accordingly, the aim is to find other economically viable and environmentally friendly forms of energy. One of these is geothermal energy, which belongs to the group of renewable forms of energy. It is particularly interesting because it unites different disciplines such as geology, hydrology, geophysics, drilling and well construction, and power plant design; but few people are aware of its benefits. This seminar deals with the topic of geothermal energy in general, its advantages and disadvantages, ways of exploitation and occurrence, and what types of power plants exist. The Republic of Croatia is taken as an example as a country known for its richness of mineral and thermal waters that are mostly used for rehabilitation purposes, but there is also the potential of their use not only for hydropower plants but also in the form of geothermal energy.