

Izrada i opremanje geotermalnih bušotina – ključ za istraživanje i eksploataciju geotermalne vode u energetske svrhe

Nediljka Gaurina-Međimurec¹, Vladislav Brkić¹, Ljiljana Zornjak²,
Borivoje Pašić¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb

²Agencija za ugljikovodike, Miramarska 24, Zagreb

Sažetak: U Republici Hrvatskoj postoji duga tradicija istraživanja i korištenja geotermalnih voda u energetske svrhe tako da na njenom području već postoji određeni broj istražnih i eksploatacijskih bušotina kojima su utvrđeni značajni geotermalni potencijali, a temeljem geološko-geofizičkih studija koje ukazuju na postojanje dubokih vodonosnika lociraju se i izrađuju nove istražne bušotine. Trenutno se ulažu veliki naponi u daljnji razvoj geotermalnog energetskeg potencijala Republike Hrvatske pa su u tijeku brojni investicijski projekti čija realizacija će pridonijeti procesu zelene tranzicije, a koji obvezno uključuju izradu istražnih i razradnih/eksploatacijskih geotermalnih bušotina. U radu će biti prikazani trenutni istražni prostori i eksploatacijska polja geotermalne vode u energetske svrhe na području Republike Hrvatske, relevantni podaci iz geotermalnih bušotina te tehnologija izrade i opremanja geotermalnih bušotina.

Ključne riječi: geotermalna voda u energetske svrhe, geotermalna bušotina, bušenje, proizvodno opremanje

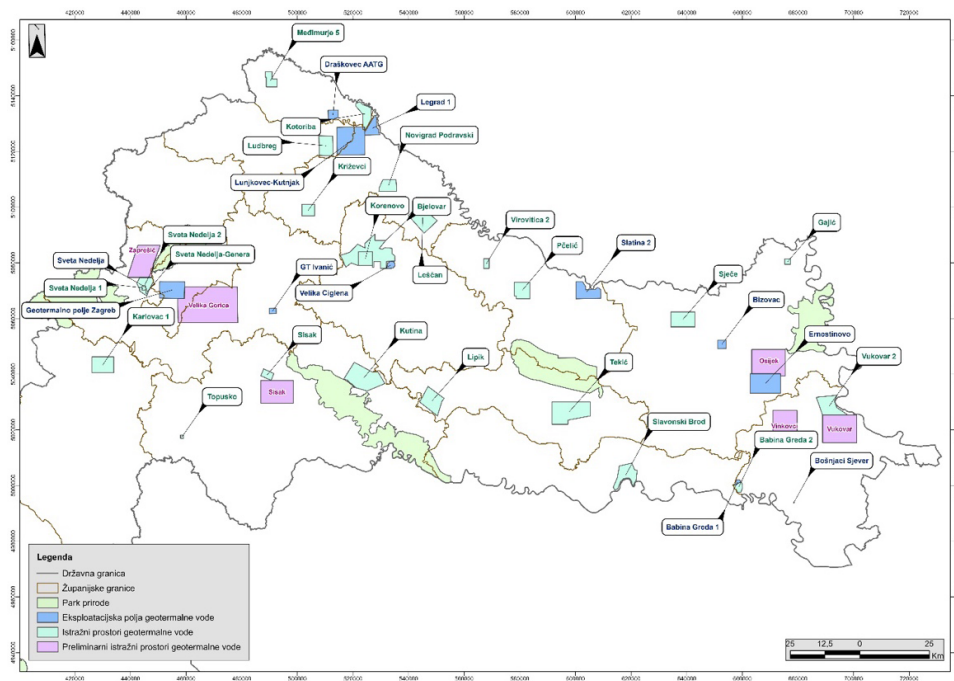
1. Uvod

Posljednjih se godina u Republici Hrvatskoj bilježi sve veći interes za razvoj geotermalnih projekata i korištenje geotermalne energije u energetske svrhe. Rezultat je to prepoznate važnosti geotermalne energije kao energenta čija implementacija može značajno pridonijeti ostvarenju ciljeva zelene tranzicije i dekarbonizaciji energetskeg sektora Republike Hrvatske.

Geotermalni potencijal utvrđen je u brojnim bušotinama izrađenim u potrazi za ležištima nafte i plina, a mogućnosti uporabe geotermalne energije su brojne. Namjena

korištenja geotermalne energije ovisi o temperaturi geotermalnog ležišta, odnosno dubini na kojoj se geotermalno ležište nalazi te njegovoj izdašnosti. Tako je geotermalni potencijal ležišta s temperaturama višima od 100 °C pogodan za proizvodnju električne energije, a potencijal ležišta s temperaturama nižima od 100 °C pogodan za izravno korištenja topline (grijanje i poljoprivreda) [1].

U Republici Hrvatskoj trenutno su dodijeljene 24 dozvole za istraživanje geotermalnih voda u energetske svrhe te je utvrđeno 12 eksploatacijskih polja geotermalne vode (EPGV) (Slika 1). Istražne naftno-rudarske aktivnosti nerijetko obuhvaćaju snimanje geofizičkih podataka te izradu geološko-geofizičkih studija na temelju kojih se lociraju i izrađuju nove istražne geotermalne bušotine ili obavljaju naftno-rudarski radovi u cilju potvrđivanja geotermalnog potencijala u postojećim bušotinama te njihova prenamjena u geotermalne.



Slika 1: Trenutno aktivni prostori na kojima se obavljaju naftno-rudarski radovi istraživanja i eksploatacije geotermalne vode u Republici Hrvatskoj [2]

Trenutno se u Republici Hrvatskoj provodi i važan projekt, projekt Razvoja geotermalnog potencijala za potrebe toplinarstva, koji za cilj ima integraciju geotermalne energije u postojeće centralne toplinske sustave na području 4 hrvatska grada. Projekt u ime Republike Hrvatske provodi Agencija za ugljikovodike, za koji su joj iz

Nacionalnog plana oporavka i otpornosti, dodijeljena sredstva od gotovo 50 milijuna eura. Cilj Projekta je utvrditi potencijal iskorištavanja geotermalne energije izradom i ispitivanjem po jedne istražne bušotine na 4 odabrana preliminarna istražna prostora: Velika Gorica, Osijek, Vinkovci i Zaprešić (Slika 1) [2].

Geotermalna energija je jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj, a kako bi se njezin potencijal u potpunosti iskoristio ključna je izrada i opremanje geotermalnih bušotina. Proces izrade i opremanja geotermalnih bušotina tehnički je složen i zahtijeva precizno planiranje, korištenje suvremene tehnologije te strogo pridržavanje sigurnosnih i ekoloških standarda.

2. Izrada geotermalnih bušotina

Naftno-rudarski projekti istraživanja geotermalnog energetskeg potencijala Republike Hrvatske te razrade i eksploatacije eksploatacijskih polja geotermalne vode obvezno uključuju izradu istražnih i razradnih/eksploatacijskih geotermalnih bušotina. Svrha izrade istražnih bušotina je utvrđivanje postojanja, položaja i oblika ležišta geotermalnih voda te količine i kakvoće rezervi geotermalnih voda, a razradnih/eksploatacijskih bušotina pridobivanje geotermalne vode u energetske svrhe.

2.1 Tehnologija izrade geotermalnih bušotina

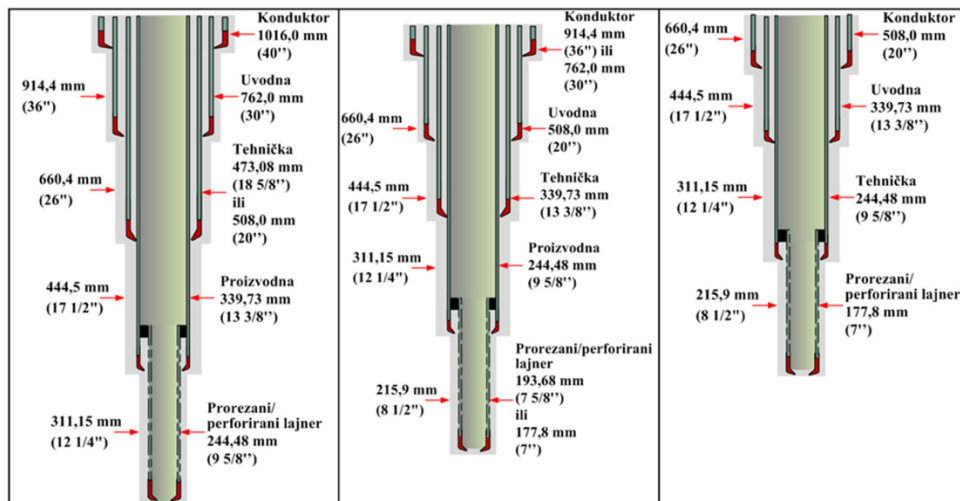
Izrada geotermalnih bušotina se konceptualno ne razlikuje od izrade naftnih/plinskih bušotina. Međutim, postoje određene razlike koje su specifične za izradu geotermalnih bušotina. To je prvenstveno visoka temperatura geotermalne vode koja utječe na: opremu koja se koristi, dizajn niza bušačkih alatki, odabir zaštitnih cijevi te dizajn sastava isplake i cementne kaše. Visoka temperatura određuje i metode kontrole tlaka u geotermalnim bušotinama za sprječavanje nekontroliranog ispuštanje fluida iz bušotine, koje se jako razlikuju od onih primijenjenih kod izrade naftnih bušotina. Geotermalne bušotine općenito su većeg promjera kako bi se omogućilo pridobivanje većih količina geotermalne vode, a time i više toplinske energije.

Tehnologija izrade razradne/eksploatacijske geotermalne bušotine ne razlikuje se od tehnologije izrade istražne geotermalne bušotine. Bušotina se izrađuje bušenjem stijena dlijetom od površine do predviđene konačne dubine (dno kanala) uz kontinuirano iznošenje krhotina razrušenih stijena na površinu cirkulacijom bušotinskog radnog fluida-isplake. Za izradu geotermalnih bušotina u pravilu se koriste žrvanjska i PDC dlijeta. Rotaciju dlijeta moguće je ostvariti s površine vrtačim stolom ili vršnim pogonom ili direktno dubinskim motorom koji se postavlja u niz bušačkih alatki neposredno iznad dlijeta. U praksi se pri izradi vertikalnih, a posebno pri izradi ho-

rizikalnih bušotina i usmjerenih bušotina velikog dosega sve češće koriste različiti upravljivi rotirajući sustavi [3, 4].

Bušenje počinje dlijetom najvećeg promjera, a za nastavak bušenja svakog sljedećeg intervala koriste se dlijeta manjeg promjera. Prema tome, s povećanjem dubine smanjuje se promjer dlijeta odnosno kanala bušotine i promjer zaštitnih cijevi koje se ugrađuju i međusobno spajaju u niz (kolonu).

Konstrukcija geotermalne bušotine uključuje ugradnju više kolona zaštitnih cijevi (konduktor, uvodna, tehnička, proizvodna) koje se nakon ugradnje cementiraju od dna do ušća. U dio kanala bušotine koji prolazi kroz geotermalno ležište obično se ugrađuje čelični proizvodni lajner (prorezani ili perforirani) koji se ne cementira. Ugradnjom lajnera štiti se otvoreni kanal od urušavanja. Primjeri nekih uobičajenih konstrukcija geotermalnih bušotina prikazani su na Slici 2.



Slika 2: Primjeri konstrukcija geotermalnih bušotina [5]

Općenito, odabir i dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi temelji se na geološkom profilu, gradijentu slojnog tlaka i tlaka frakturiranja stijena, slojnom fluidu, sigurnosnim koeficijentima, proračunima naprežanja, programiranim tehnološkim zahtjevima u najnepovoljnijim bušotinskim uvjetima te položaju i svojstvima ležišta geotermalne vode. Zaštitne cijevi moraju izdržati kombinirana naprežanja (uzdužna naprežanja te tlakove gnječenja i rasprskavanja).

Pri odabiru zaštitnih cijevi za geotermalne bušotine u obzir treba uzeti visoku temperaturu geotermalne vode uslijed koje se javljaju toplinska naprežanja u koloni zaštit-

nih cijevi. Visoka temperatura uzrokuje preveliko aksijalno naprezanje i smanjenje čvrstoće pri granici tečenja što dovodi do smanjenja otpornosti zaštitnih cijevi na gnječenje i rasprskavanje. Osim toga, smanjuju se tlačna i vlačna naprezanja koje zaštitne cijevi mogu izdržati bez da se plastično deformiraju. U geotermalne bušotine najčešće se ugrađuju zaštitne cijevi kvalitete čelika J-55 ili K-55 (na većim dubinama), N-80 i L-80 (zamjena za N-80 u prisustvu H_2S). U ekstremnim uvjetima može se koristiti i L-80 s kromom (9 Chrome L-80 i 13 Chrome L-80) [6]. Zaštitne cijevi kvalitete čelika K-55 izrađene su od niskougljičnog čelika koji je otporan na kombinirano djelovanje vlačnog naprezanja i korozije u prisutnosti vode i sumporovodika na svim radnim temperaturama. Zaštitne cijevi izrađene od čelika kvalitete L-80 su cijevi s ograničenom čvrstoćom pri granici tečenja te su velike tvrdoće i mogu podnijeti visoke temperature. Otporne su na sulfidno pucanje pod naprezanjem te se mogu koristiti u bušotinama u kojima su prisutne visoke koncentracije H_2S pri svim temperaturama [7].

Osim izbora zaštitnih cijevi, bitan je i pravilan odabir navojnih spojeva jer oni moraju zadržati čvrstoću i brtviti pri visokim temperaturama.

2.2 Isplaka za ispiranje geotermalnih bušotina

Isplaka namijenjena za ispiranje kanala geotermalne bušotine mora osigurati stabilnost bušotine, omogućiti hlađenje niza bušačih alatki i učinkovito čišćenje kanala od krhotina razrušenih stijena. Isplaka se dizajnira tako da sastavom i svojstvima odgovara uvjetima u kanalu bušotine, sastavu i svojstvima stijena kroz koje se buši, a da pritom bude ekonomski i ekološki prihvatljiva. Tijekom izrade svake bušotine koristi se nekoliko različitih tipova isplake. Za ispiranje geotermalnih bušotina trenutno se najčešće koriste isplake na bazi vode (bentonitne i polimerne), ali se može koristiti samo voda, aerizirana isplaka ili aerizirana voda te zrak i pjena [8, 9]. Pri izboru isplake za geotermalne bušotine treba imati na umu visoku temperaturu na dnu, mali ležišni tlak i prirodno raspucane ležišne stijene u koje se može tijekom bušenja gubiti isplaka. Troškovi saniranja zona gubljenja mogu iznositi i do 20 % od ukupne cijene izrade bušotine te jako utječu na ekonomičnost cijelog projekta pa su u mnogim slučajevima geotermalne bušotine napuštene zbog gubljenja cirkulacije isplake [9,10]. Ukoliko se tijekom bušenja kroz potencijalno ležište geotermalne vode pojavi gubljenje isplake u okolne stijene treba odmah pristupiti saniranju zona gubljenja kako bi se smanjili troškovi i spriječilo smanjenje prirodne propusnosti ležišnih stijena.

2.3 Cementacija geotermalnih bušotina

Nakon ugradnje do predviđene dubine, kolona zaštitnih cijevi se cementira protiskivanjem cementne kaše, kroz kolonu ili kroz bušaće šipke, u izacijevni prstenasti

prostor. Cementacijom se postiže učvršćenje ugrađene kolone zaštitnih cijevi, stabilnost kanala bušotine te sprječava komunikacija ležišnih fluida između probušenih stijena i njihova migracija prema površini. U geotermalnim bušotinama se obavezno od dna do ušća cementiraju uvodna, tehnička i proizvodna kolona zaštitnih cijevi. Pri cementiranju bušotina posebno mjesto pripada dizajnu cementne kaše jer visoke temperature u cirkulaciji na dnu bušotine djeluju na svojstva cementne kaše i cementnog kamena.

Cementne kaše za cementiranje geotermalnih bušotina najčešće su na bazi Portland cementa, a osim različitih aditiva za podešavanje njihovih svojstava, obvezno sadrže i kvarcno brašno (SiO_2) radi sprječavanja opadanja tlačne čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama ($> 110^\circ\text{C}$) [9, 11]. Kod geotermalnih bušotina posebno treba voditi računa o kvaliteti cementacije kolona zaštitnih cijevi. Problem predstavlja eventualna prisutnost vode u prstenastom prostoru između dvije kolone zaštitnih cijevi koja je zaostala nakon cementacije. Tijekom eksploatacije geotermalne vode, volumen te zaostale vode povećava se zbog povećanja temperature i stvara značajan tlak na stijenke zaštitnih cijevi uslijed čega može doći do gnječenja unutarnje kolone ili do rasprskavanja vanjske kolone zaštitnih cijevi [7].

Za eksploataciju geotermalne vode, potrebna je najmanje jedna eksploatacijska bušotina u slučaju direktnog korištenja u toplinarstvu i poljoprivredi. U slučaju potrebe za većim količinama energije, bilo da se geotermalna voda koristi u svrhu proizvodnje električne energije ili u toplinarske svrhe, za učinkovito iskorištavanje potrebna je primjena najmanje jednog para bušotina od kojih je jedna bušotina eksploatacijska i služi za pridobivanje geotermalne vode, dok je druga bušotina utisna i služi za utiskivanje ohlađene geotermalne vode natrag u ležište s ciljem podržavanja ležišnog tlaka.

Nakon izrade bušotine i pozitivnog ishoda ispitivanja ležišta geotermalne vode, slijedi opremanje geotermalne bušotine u skladu s njenom namjenom. Geotermalne bušotine po svojoj namjeni mogu biti eksploatacijske, utisne ili mjerne bušotine, ovisno o proizvodnim karakteristikama ležišta i energetske potrebama krajnjih korisnika.

3. Opremanje geotermalnih bušotina

Projektiranje bušotine koja će biti korištena za pridobivanje geotermalne vode i iskorištavanje geotermalne energije odvija se paralelno s projektiranjem izrade bušotine kao naftno-rudarskog objekta, dok se sam postupak opremanja odvija nakon uspješno završene faze izrade bušotine te prethodi fazi pridobivanja geotermalne vode. Ovakav pristup neophodan je kako bi se postigao tehničko-tehnološki i sigurnosni optimum, te osiguralo ekonomski isplativo iskorištavanje geotermalne energije. Projektiranje opremanja bušotine uključuje postupke kao što su proračun sila i tlakova u sustavu tubinga i pakera, odabir podzemne i nadzemne opreme kao i metode uspostavljanja

komunikacije s ležištem geotermalne vode. U ovoj fazi potrebno je uzeti u razmatranje i potencijalne probleme koji se očekuju kod pridobivanja geotermalne vode, kao što su izdvajanje kamenca ili pojava korozije [12, 13], kako bi se potreba za remontnim radovima u budućnosti svela na minimum. Osim navedenog, vrlo bitan podatak za fazu projektiranja opremanja bušotine je i sama namjena bušotine, odnosno hoće li se bušotina koristiti za pridobivanje geotermalne vode (eksploatacijska bušotina), njeno zbrinjavanje nakon što se iskoristi toplina (utisna bušotina) ili za praćenje stanja i promjena u podzemlju (mjerna bušotina).

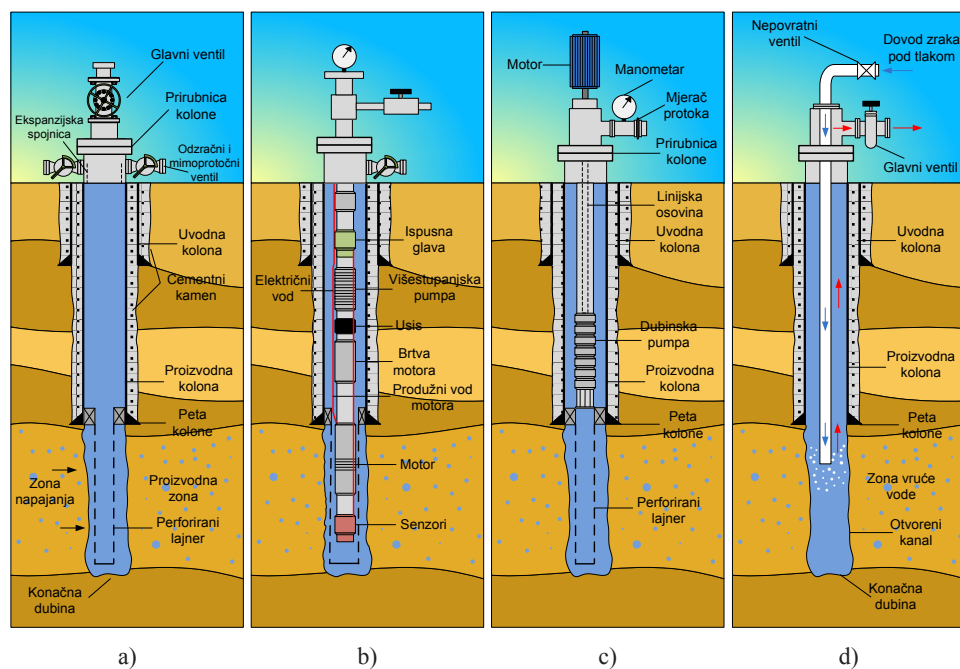
Sam postupak projektiranja opremanja geotermalnih bušotina sličan je postupku projektiranja opremanja bušotina za eksploataciju naftnih i plinskih ležišta, s iznimkom da se kod geotermalnih bušotina nastoji osigurati najveći mogu promjer bušotine za pridobivanje geotermalne vode što kod naftnih i plinskih bušotina nije slučaj. Pridobivanje geotermalne vode najčešće se odvija iz otvorenog kanala ili kroz lajner s prorezima ("slotirani lajner") i dalje prema površini kroz proizvodnu kolonu zaštitnih cijevi, čime se izbjegava trošak opremanja bušotine nizom proizvodnog tubinga.

3.1 Podzemna oprema geotermalnih bušotina

Primarno, način opremanja geotermalnih bušotina ovisi o ranije spomenutoj namjeni bušotine, ali i svojstvima ležišta geotermalne vode (dubini zalijeganja, propusnosti i poroznosti ležišnih stijena) te slojnom tlaku i temperaturi. Kod ležišta koja imaju dobru propusnost te relativno visoki ležišni tlak, pridobivanje se odvija eruptivnim načinom što podrazumijeva podizanje geotermalne vode do površine bez potrebe za sustavom prinudnog podizanja te ostvarivanje tlaka na ušću od minimalno 3 bar. Iako je kod geotermalnih ležišta ležišni tlak najčešće manji od hidrostatičkog tlaka stupca hladne vode na određenoj dubini, visoka temperatura uzrokuje djelomično ili potpuno pretvaranje vode u paru, u samom ležištu ili unutar bušotine što uzrokuje smanjenje gustoće fluida i povećanje volumena, te tečenje prema površini. Na Slici 3a [14] shematski je prikazano proizvodno opremanje eruptivne geotermalne bušotine. Ovo je ujedno i najjeftiniji način pridobivanja geotermalne vode i iskorištavanja geotermalne energije jer se postiže najveći maseni protok vode u odnosu na druge sustave.

U slučaju da tlak u ležištu i bušotini nije dovoljan za savladavanje otpora protjecanju geotermalne vode prema površini, potrebno je ugraditi neki od sustava prinudnog podizanja fluida. Najčešće se za prinudno podizanje geotermalne vode koristi uronjena dubinska električna pumpa. Uronjena dubinska električna pumpa (ESP) sastoji se od sekcija statora i rotora, a njihov broj direktno ovisi o dubini s koje je potrebno pumpati geotermalnu vodu. Osim neophodnog tlaka za savladavanje otpora protjecanju geotermalne vode, na odabir pumpe utjecat će i željeni protok fluida, sastav slojnog fluida te njegova temperatura.

Za pogon pumpe koristi se elektro motor koji se ili postavlja neposredno ispod same pumpe kao dio dubinske proizvodne opreme bušotine (Slika 3b) [15] ili na vrhu proizvodne opreme (Slika 3c) [16]. U oba slučaja bušotinu je potrebno dodatno opremiti i nizom proizvodnog tubinga kroz koji će se pumpati geotermalna voda prema površini, te električnim/kontrolnim vodovima i senzorima kod sustava s dubinskim pogonom odnosno sustavom klipnih šipki unutar niza tubinga kod pogona s površine. Potrebno je imati u vidu da se geotermalnu bušotinu može inicijalno opremiti dubinskom uronjenom električnom pumpom, ili naknadno ukoliko se za tim pokaže potreba. U potonjoj varijanti, potrebno je računati i na potencijalno manje protoke, jer će dizajn sustava ovisiti o postojećoj konstrukciji bušotine odnosno promjerima prethodno ugrađenih i zacementiranih nizova zaštitnih cijevi.



- eruptivna geotermalna bušotina (prilagođeno prema [14])
- geotermalna bušotina opremljena eklektičnom uronjenom dubinskom pumpom i dubinskim pogonom (prilagođeno prema [15])
- geotermalna bušotina opremljena eklektičnom uronjenom dubinskom pumpom i pogonom s površine (prilagođeno prema [16])
- geotermalna bušotina opremljena sustavom sa zračnim podizanjem (prilagođeno prema [17])

Slika 3: Proizvodno opremanje geotermalnih bušotina [14 -17]

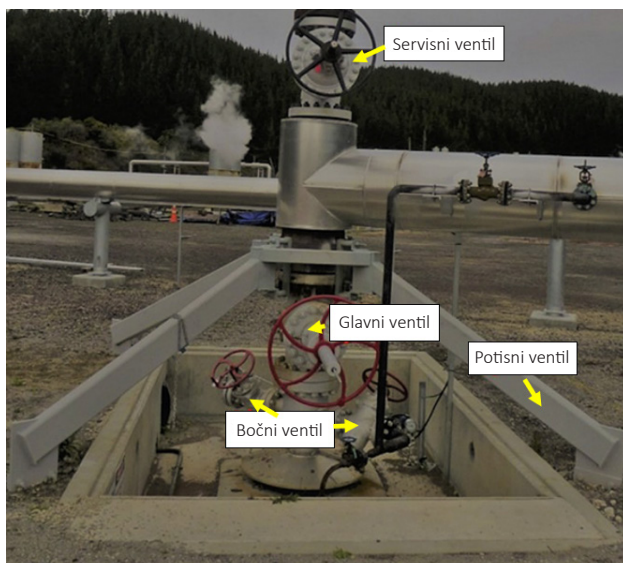
Za prinudno pridobivanje geotermalne vode na površinu može se koristiti energija komprimiranog zraka koji se kroz posebni vod malog promjer utiskuje ispod razine vode u bušotini (Slika 3d) [17]. Miješanjem komprimiranog zraka i geotermalne

Kao što je to ranije spomenuto, osim eksploatacijskih bušotina na eksploatacijskom geotermalnom polju mogu se nalaziti i utisne i mjerne bušotine, osim kod iskorištavanja geotermalne energije preko dubinskog (bušotinskog) izmjenjivača topline kada one nisu potrebne. Utiskivanje pridobivene geotermalne vode neophodno je u situacijama kada pridobivena geotermalna voda svojim kemijskim sastavom i fizikalnim svojstvima ne zadovoljava minimalne kriterije za površinsko odlaganje, ali i radi održavanja slojnog tlaka unutar geotermalnog ležišta. Bušotina za utiskivanje pridobivene geotermalne vode može biti posebno projektirana i izrađena u tu svrhu, ali isto tako može biti i prenamijenjena eksploatacijska bušotina. Utiskivanje ohlađene geotermalne vode može biti pod djelovanjem gravitacije što je s ekonomskog stajališta i najpovoljnija opcija, a po potrebi ohlađenu geotermalnu vodu može se utiskivati i pomoću pumpi instaliranih na površini.

Mjerne bušotine koriste se za praćenje parametara kao što su tlak, razina vode, temperatura i kemijski sastav, odnosno svih onih parametara koji su bitni za sigurno operativno funkcioniranje cijelog sustava. U pravilu se u ovu svrhu koriste bušotine koje su prethodno bile eksploatacijske, kako bi se izbjegao dodatan trošak bušenja i opremanja mjerne bušotine.

3.2 Površinska oprema geotermalnih bušotina

Slično kao i kod eksploatacijskih naftnih i plinskih bušotina, i eksploatacijske geotermalne bušotine potrebno je opremiti odgovarajućom nadzemnom opremom. U fazi opremanja, geotermalna bušotina se oprema odgovarajućim erupcijskim uređajem koji se postavlja na ušće bušotine, i čije tehničke karakteristike i kvaliteta materijala moraju odgovarati specifičnim uvjetima pridobivanja, odnosno izdržati sva naprezanja kojima bi on mogao biti izložen. Ušće bušotine se sastoji od prirubnica koje uključuju vješalice za odsjedanje ugrađenih nizova zaštitnih cijevi i po potrebi tubinga. Za razliku od naftnih i plinskih bušotina, površinska oprema često uključuje i ekspanzijsku spojnicu, koja omogućava vertikalni pomak proizvodne kolone zaštitnih cijevi uslijed promjene temperature, dok se postavljanje bočnih ventila na prstenastom prostoru izbjegava zbog učestale pojave propuštanja u tom dijelu. Erupcijski uređaj se standardno sastoji od glavnog ventila za zatvaranje bušotine, križnog komada, krilnog ventila za reguliranje protoka te pokrovne prirubnice s dodatnim ventilom (servisnim) za obavljanje remontnih radova te instaliranim manometrom na vrhu (Slika 5) [5]. Često se preko krilnog ventila postavlja mimoprotočni vod, koji osigurava minimalni protok iz bušotine preko bušotinske glave, kako bi se spriječila promjene temperature i hlađenje bušotinske glave tijekom obustave rada bušotine [12].



Slika 5: Površinska oprema geotermalne bušotine [5]

4. Korištenje geotermalne vode

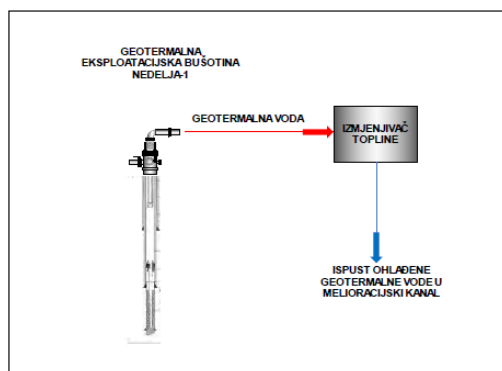
Geotermalna voda može se koristiti za proizvodnju električne i toplinske energije (za grijanje stambenih zgrada, poslovnih prostora, staklenika, te za sušenje voća i povrća). Geotermalni sustavi omogućuju i hlađenje i grijanje što je još jedna značajna prednost u odnosu na druge obnovljive izvore energije.

Pridobivanje i iskorištavanje geotermalne vode može biti kroz njenu direktnu upotrebu i kroz njeno korištenje upotrebom dubinskih izmjenjivača topline. Direktnom upotrebom topla voda (para) se iz bušotine koristi izravno uz odgovarajući površinski tehnološki sustav, ali ovisno o njenom kemijsko-fizikalnom sastavu, potrebno ju je vratiti natrag u ležište kroz drugu utisnu bušotinu s čime se dodatno podržava ležišni tlak. Upotreba dubinskih izmjenjivača topline se zasniva na korištenju proizvodne kolone zaštitnih cijevi za cirkulaciju vode koja se zagrijava i zatim pridobiva kroz uzlazni proizvodni niz, što omogućuje proizvodnju topline pomoću samo jedne bušotine (sistem cijev u cijevi).

4.1 Korištenje geotermalne vode za grijanje staklenika

Korištenje geotermalne energije za grijanje staklenika prikazano je na primjeru eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode “Sveta

Nedelja” (EPGV “Sveta Nedelja”). Pridobivanje geotermalne vode se obavlja iz jedne eksploatacijske bušotine mehaničkim podizanjem fluida dubinskom centrifugalnom sisaljkom. Pridobivena geotermalna voda se od ušća bušotine otprema, kroz toplinski izoliran cjevovod, do izmjenjivača topline, u kojem se toplina geotermalne vode više temperature u primarnom krugu prenosi na tehnološku vodu niže temperature u sekundarnom krugu, kojom se zagrijevaju grijači elementi i grije prostor objekta korisnika (Slika 6) [20]. Izmjenjivač topline se sastoji od niza paralelnih ploča te prolaza za protok fluida, pri čemu dolazi do konvekcijskog prijenosa topline. Nakon iskorištavanja topline geotermalne vode, ista se putem priključnog cjevovoda ispušta u melioracijski kanal [20].

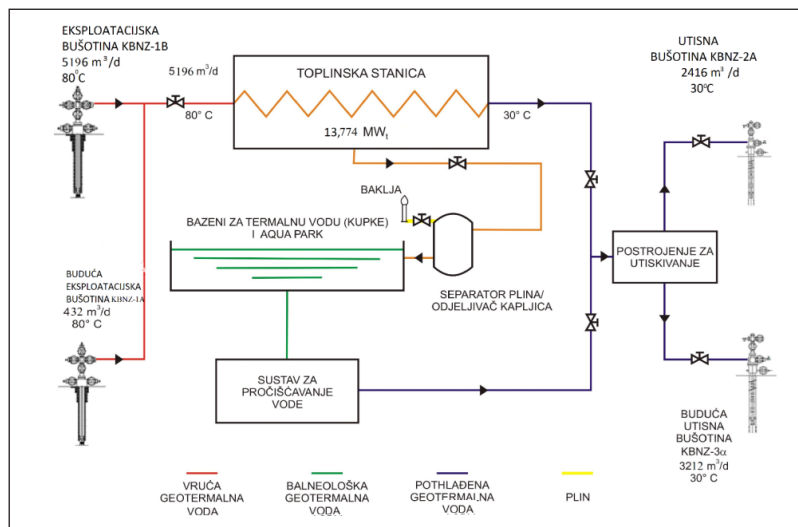


Slika 6: Tehničko-tehnološka shema pridobivanja geotermalne vode na EPGV “Sveta Nedelja” [20]

4.2 Korištenje geotermalne vode za grijanje i zagrijavanje prostora

Korištenje geotermalne vode za grijanje i zagrijavanje prostora prikazano je na primjeru nedovršene Kliničke bolnice Novi Zagreb (lokalitet Blato) koje se obavlja u zatvorenom eksploatacijsko-utisnom sustavu koji se sastoji od ukupno sedam bušotina, međutim trenutno je samo jedna bušotina u funkciji eksploatacije geotermalne vode, dok je druga bušotina utisna [21]. Voda se koristiti za grijanje montažnih zgrada pomoću izmjenjivača topline tj. toplinske stanice. Kada dođe do povećanja eksploatacijskih količina vode, za što je potrebno priključenje novih potrošača, tada će se dodatno koristiti dva para eksploatacijsko-utisnih bušotina. U tom smislu Ministarstvo zdravstva je izradilo projektni zadatak koji predviđa stvaranje uvjeta priključenja i isporuka geotermalne vode iz geotermalnog polja Zagreb prema Nacionalnoj dječjoj bolnici u Blatu koja se planira graditi na lokalitetu Blato te bi se na taj način postiglo ekonomski povoljnije grijanje od onog koje bi imala priključenjem na CTS – Centralni toplinski sustav grada Zagreba. U izradu specifikacije za priključenje navedenog objekta na geotermalnu vodu je uključen i Rudarsko-geološko-naftni fakul-

tet Sveučilišta u Zagrebu. Također u planu je izgradnja termalne rivijere. Tehnološki sustav mora sadržavati i separator plina – odjeljivač kapljica i sustav za pročišćavanje vode prije njenog povratka u ležište kroz utisne bušotine (Slika 7) [21].



Slika 7. Tehničko-tehnološka shema sportsko-rekreacionog centra Blato [21]

4.3 Korištenje geotermalne vode za proizvodnju električne energije – geotermalne elektrane

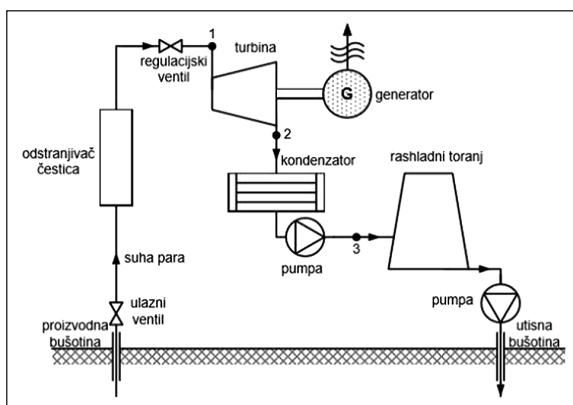
Geotermalne elektrane (geoelektrane) rade kontinuirano, neovisno o vremenskim uvjetima te mogu nadomjestiti proizvodnju električne energije u nedostatku drugih obnovljivih izvora energije. Postoje dvije glavne tehnologije za iskorištavanje geotermalne vode za proizvodnju električne energije, suha para i binarni ciklus.

4.3.1 Suha para (engl. *Flash steam*)

Ova metoda koristi vruću vodu iz geotermalnih ležišta koja su pod visokim tlakom. Pridobivanjem vode na površinu i smanjenjem tlaka dio tekućine se pretvara u paru koja pokreće turbine za proizvodnju struje. U ovakvim elektranama (Slika 8) suha para se direktno dovodi cjevovodom iz bušotine do elektrane, te se prvo usmjerava na odstranjivač čestica koji filtrira i uklanja nečistoće. Zatim dolazi do ekspanzije pare do kondenzatorskog tlaka. Ekspanzija pare pogoni turbinu, a ona pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Kada završi ekspanzija pare, para odlazi u kon-

denzator gdje se odvija kondenzacija, nakon čega je potrebno ohladiti kondenzat u rashladnom tornju. Završna faza nakon kondenzacije pare i hlađenja kondenzata je ta da se voda od rashladnog tornja pomoću crpki utiskuje natrag u geotermalno ležište kroz utisnu bušotinu [22].

Ohlađena voda se može koristiti kaskadno tj. da se preostala toplina prije povratka u ležište predaje potrošačima kao što su stambene zgrade, poslovni prostori, plastenici / staklenici u slučaju njihove blizine i rentabilnosti.



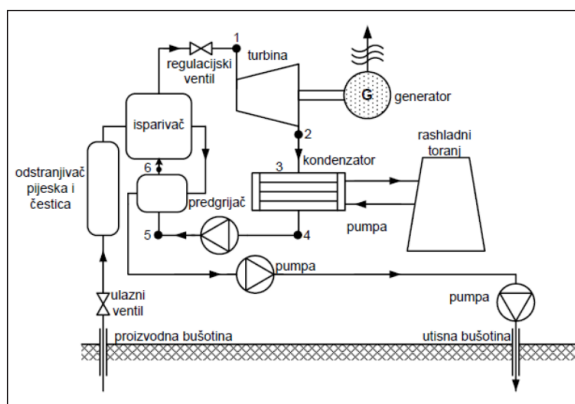
Slika 8: Geotermalna elektrana na suhu paru [22]

4.3.2 Binarni ciklus

Geotermalna ležišta koja imaju niže temperature za nastajanje pare (ispod 150 °C) koriste binarni ciklus za proizvodnju električne energije. Kod geoelektrana s binarnim ciklusom ključnu ulogu imaju izmjenjivači topline koji prenose toplinu geotermalnog izvora iz primarnog kruga radnom fluidu koji ima nisku kritičnu temperaturu, a nalazi se u sekundarnom krugu. Radni fluid mora imati dobra termodinamička svojstva, kao lako hlapljivi fluidi npr. propan, amonijak, ugljikovodici, izobutan. Radni fluid prima toplinu geotermalnog fluida, dolazi do njegovog isparavanja te ekspanzije u turbini koja pokreće generator te on proizvodi električnu energiju. Nakon toga, radni fluid odlazi u kondenzator te se u tekućem stanju vraća u isparivač. Geotermalni fluid koji je predao toplinu zatim se vraća natrag u geotermalno ležište kroz utisnu bušotinu.

Organski Rankineov ciklus (ORC) prikazan na Slici 9 predstavlja proces prijenosa topline geotermalnog fluida na radni fluid (sekundarni fluid). Veća iskoristivost i efikasnost od binarnog ciklusa postignuta je korištenjem tzv. Kalina procesa. Radni

fluid je zamijenjen mješavinom amonijaka i vode. Takva mješavina je temperaturno jako slična temperaturi fluida iz geotermalnog izvora. Veća iskoristivost se postiže na način da mješavina amonijaka i vode može ispariti pri različitim temperaturama, dok se u Rankineovu procesu isparavanje i kondenzacija odvijaju pri konstantnoj temperaturi. Upravo je to razlog veće učinkovitosti Kalina ciklusa koji dovodi toplinu pri većoj temperaturi, a odvodi toplinu pri manjoj temperaturi u odnosu na Rankinea [22].



Slika 9: Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom (ORC) [22]

Organski Rankineov ciklus (ORC) općenito je prihvaćen kao održiva tehnologija za pretvaranje geotermalne energije niske do srednje temperature u električnu energiju [23].

U praksi, referentna tehnologija za pretvaranje geotermalne energije u električnu energiju je podkritični jednostavni ORC sustav. Tijekom vremena razvijene su geotermalne ORC elektrane sa složenijim konfiguracijama (arhitekturama). Osnovna podjela naprednih konfiguracija postrojenja je na ORC sustave s dvostrukim tlakom i dvostrukim stupnjem [23].

Bez obzira o kojoj se od navedenih tehnologija proizvodnje električne energije radilo, država treba definirati poticajnu kvotu korištenja geotermalne energije (MW) kroz tzv. *Integrirani nacionalni energetski i klimatski plan do 2030. godine* radi daljnjeg razvoja ovog resursa kao i donošenje tržišnih premija (potpora) radi poticanja proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora zbog održivosti projekata tj. investicije.

5. Geotermalne bušotine u Republici Hrvatskoj

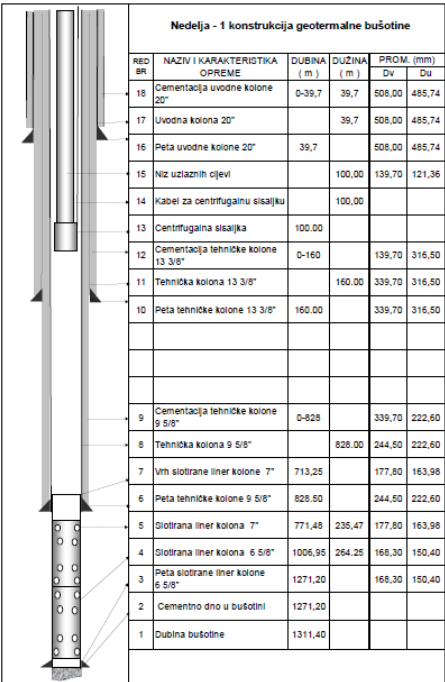
Geotermalna energija se u Republici Hrvatskoj koristi za različite namjene, u svrhu hidroponskog uzgoja rajčica te za grijanje bazena, stambenih jedinica i poslovnih prostora. Naša jedina geotermalna elektrana s binarnom tehnologijom (ORC) Velika 1 snage 16,5 MW koja se nalazi u Velikoj Cigleni kraj Bjelovara koristila je geotermalnu vodu za proizvodnju električne energije od ožujka 2019. do svibnja 2023. Nažalost, geotermalna elektrana Velika 1 je 2023. godine prestala s radom [24].

Konstrukcija eksploatacijskih geotermalnih bušotina je takva da omogućuje stabilno pridobivanje geotermalne vode u kontroliranim uvjetima. U bušotine je ugrađeno više kolona zaštitnih cijevi (konduktor, uvodna, tehnička, proizvodna/lajner) do različitih dubina te različitih kvaliteta čelika i njihovih nominalnih težina. Shematski prikaz konstrukcije eksploatacijske geotermalne bušotine prikazan je na primjeru bušotine “Nedjelja-1” (Slika 10).

U Tablici 1 su prikazani relevantni podaci eksploatacijskih geotermalnih bušotina iz kojih se geotermalna energija koristi za različite namjene, dok su tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima geotermalnih eksploatacijskih bušotina prikazani u Tablicama 2. – 4.

Tablica 1: Relevantni podaci eksploatacijskih geotermalnih bušotina u Republici Hrvatskoj

EPGV	“Sveta Nedjelja” [20]	“Geotermalno polje Zagreb” 21]	“Velika Ciglena” [25, 26]
Naziv bušotine/skraćeni naziv	Nedjelja-1 (N-1)	Klinička bolnica Novi Zagreb-1B (KBNZ-1B)	Velika Ciglena-1 (VC-1)
Trajektorija bušotine	Vertikalna	Usmjerena	Vertikalna
Dubina bušotine (m)	1 311,4	1 374,0 (1 065,9 vert.)	3 405,0
Ležište	Karbonati	Dolomiti	Dolomiti
Krovina/podina ležišta (m)	832,0 - 1 280,0	1 217,0 - 1 374,0 (959,0 - 1 066 vert.)	2 576,0 - 3 188,0
Temperatura ležišta (°C)	71,1	80	175
Tlak ležišta (bar)	103,2	104,0	301,8
Način opremanja	Centrifugalna sisaljka	Eruptivno	Eruptivno
Protok geotermalne vode (l/s)	25	50	80
Temperatura na ušću (°C)	63	80	166
Uporaba geotermalne energije	Grijanje staklenika	Grijanje poslovnih prostora	Proizvodnja električne energije



Slika 10: Shematski prikaz konstrukcije bušotine Nedelja-1 (N-1) s ugrađenom proizvodnom opremom [20]

Tablica 2: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Nedelja-1” [20]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	H-40	1371,8 (94,0)	0,0 – 39,7	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	J-55	1050,8 (72,0)	0,0 – 160,0	Do ušća
II. tehnička kolona	244,5 (9 5/8)	J-55	583,7 (40,0)	0,0 – 828,0	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	J-55	291,9 (20,0)	713,3 – 1 006,9	Nije cementirano
	168,0 (6 5/8)	J-55	350,3 (24,0)	1 006,9 – 1271,2	Nije cementirano

Tablica 3: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Klinička bolnica Novi Zagreb – 1B” [21]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	H-40	1371,8 (94,0)	0,0 – 53,0	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	H-40	700,5 (48,0)	0,0 – 199,0	Do ušća
Proizvodna kolona	244,5 (9 5/8)	H-40	471,4 (32,3)	0,0 – 1 132,0 (0,0 – 901,2 vert.)	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	H-40	291,9 (20,0)	1 114,7 – 1 217,3 (890,2 – 959,0 vert.)	Nije cementirano

Tablica 4: Tehnički podaci o ugrađenim zaštitnim cijevima eksploatacijske geotermalne bušotine “Velika Ciglena-1” [25, 26]

Zacjevljenje	Promjer kolone mm (")	Kvaliteta čelika	Jedinična težina kolone N/m (lb/ft)	Dubina ugradnje (m)	Cementacija
Uvodna kolona	508,0 (20)	J-55	1371,8 (94,0)	0,0 – 147,1	Do ušća
I. tehnička kolona	339,7 (13 3/8)	J-55	992,4 (68,0)	0,0 – 1 362,0	Do ušća
II. tehnička kolona	244,5 (9 5/8)	N-80	583,8-685,9 (40,0-47,0)	0,0 – 2 574,4	Do ušća
Lajner kolona	177,8 (7)	J-55	379,4 (26,0)	2 574,4 – 4 043,4	Nije cementirano

6. Zaključak

Geotermalna energija je na razini Europske unije prepoznata kao obnovljivi izvor energije ključan za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, dekarbonizaciju sektora grijanja i hlađenja, ali i kao ključni element u postizanju ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova u budućnosti.

Republika Hrvatska dokazano ima veliki geotermalni potencijal u području Panonskog bazena, koji je nažalost do sada bio slabo korišten. Osim svijetlih primjera poput iskorištavanja geotermalne energije za grijanje staklenika, sportsko-rekreacijskih objekata ili prve geotermalne elektrane Velika 1, do unatrag nekoliko godina nije postojala sustavna strategija na razini države za iskorištavanje postojećeg geotermalnog potencijala.

Za razliku od iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa, iskorištavanje dubljih geotermalnih resursa zahtjeva veća financijska ulaganja kao i naftno-geološka znanja i iskustva koje svakako Republika Hrvatska ima s obzirom na višedesetljetnu tradiciju eksploatacije ugljikovodika na kopnu i moru. Unatoč znanju i iskustvu, zbog specifičnosti eksploatacije geotermalne vode, nužno je usvajanje novih tehnologija koje bi trebale osigurati brže iskorištavanje ovog prirodnog resursa na siguran i isplativ način.

Investicije u istraživanje i eksploataciju geotermalnih resursa, koje provode domaće i strane tvrtke te lokalne zajednice, pokazuju atraktivnost korištenja geotermalnih izvora. Međutim, za proizvodnju električne energije nužno je definirati adekvatnu kvotu kroz Integrirani nacionalni energetske i klimatski plan za razdoblje od 2021. do 2030. godine radi daljnjeg razvoja ovog resursa kao i donošenje tržišnih premija (potpora) radi poticanja proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora.

7. Literatura

- [1] Agencija za ugljikovodike (2023.): Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, *Dostupan na*: <https://mingo.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/naftno-rudarstvo-i-geotermalne-vode-za-energetske-svrhe/plan-razvoja-geotermalnog-potencijala-rh/8315>, *Pristupljeno*: 2025-02-14
- [2] <https://www.azu.hr/hr-hr/npoo-projekti/>, *Pristupljeno*: 2025-02-14
- [3] Gaurina-Medimurec, N.; Pašić, B.; Mijić, P.: Nove tehnologije izrade naftnih i plinskih bušotina. *Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2016.*, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), (2017.), 101-128
- [4] Hudoletnjak, M.; Gaurina-Medimurec, N.: Razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje i njihova primjena u praksi, *Nafta i Plin*, **39** (2019) 159–160, 73-82
- [5] Gaurina-Medimurec, N.: Elaborat o tehnologiji izrade i opremanja geotermalnih bušotina i mogućim utjecajima izrade bušotina na okoliš (dio Strateške studije procjene utjecaja na okoliš Plana razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske), Zagreb, 2020. *Dostupan na* <https://www.azu.hr/hr-hr/zastita-okolisa/studije/>, *Pristupljeno*: 2025-03-03
- [6] Teodoriu, C.; Falcone, G.: Comparing completion design in hydrocarbon and geothermal wells: The need to evaluate the integrity of casing connections subject to thermal stresses, *Geothermics*, **38** (2009) 2, 238-246, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.11.006>
- [7] Torres, A.: Challenges of Casing Design in Geothermal Wells. *Proceedings of Asia Pacific Drilling Technology Conference*, Bangkok, Thailand, 25.-27. August 2014. (IADC/SPE-170480-MS) 13, <https://doi.org/10.2118/170480-MS>
- [8] Hole, H.: Drilling Fluids for Drilling of Geothermal Wells, Petroleum Engineering Summer School, Workshop, Dubrovnik, Croatia. 26 June 9 – 13, (2008.), 1-8

- [9] Gaurina-Medimurec, N.; Pašić, B.; Mijić, P.; Medved, I.: Drilling Fluid and Cement Slurry Design for Naturally Fractured Reservoirs, *Applied Sciences-Basel*, **11** (2021) 2, 767, 1-31, <https://doi.org/10.3390/app11020767>
- [10] Saleh, F. K.; Teodoriu, C.; Ezeakacha, Ch. P.; Salehi, S.: Geothermal Drilling: A Review of Drilling Challenges with Mud Design and Lost Circulation Problem, *Proceedings of 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-8, Stanford University, Stanford, California, February 10-12, (2020) SGP-TR-214
- [11] Gaurina-Medimurec, N.; Matanović, D.; Krklec, G.: Cementne kaše za cementiranje geotermalnih bušotina, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, **6** (1994) 1, 127-134, <https://hrcak.srce.hr/13715>
- [12] Thorhallsson, S.: *Geothermal Well Operation and Maintenance*. The United Nations University, Geothermal Training Programme, IGC2003 Short Course, September 2003., 1-3, 11-12, 23. 48 12.
- [13] Karlsdottir, S. N.; Thorbjornsson, I. O.: Hydrogen Embrittlement and Corrosion in High Temperature Geothermal Well, *Proceedings of NACE International Conference & Expo – CORROSION 2012*, Salt Lake City, Utah, March 11 (2012).
- [14] Zarrouk S. J.; Mclean, K.: *Geothermal Well Test Analysis: Fundamentals, Applications and Advanced Techniques*. Academic Press, Elsevier, 978-0-12-819266-5 (2019), <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02723-4>
- [15] Elezović, I.; Škrlec, M.; Kolbah, S.: Konstrukcije proizvodnih geotermalnih bušotina u Hrvatskoj, *Nafta i plin*, **38** (2018) 155, 60-78, <https://hrcak.srce.hr/209327>
- [16] Niyazi, A.: Optimization of downhole pump setting depths in liquid dominated geothermal systems: a case study on the Balcova-Narlıdere field, Turkey, *Geothermics*, **36** (2007) 5, 436-458
- [17] Thain, I.; Reyes, A. G.; Hunt, T.: *A Practical Guide to Exploiting Low Temperature Geothermal Resources*, GNS Science Report 2006/09., 2006., 76p.
- [18] Louis Jr. C.; Huh, M.; Swanson, R.; Raymond, D. W.; Finger, J. T.; Mansure, A.; Polsky, Y.; Knudsen, S. D.: *Enhanced Geothermal Systems (EGS) Well Construction Technology Evaluation Report*, Sandia Report (SAND2008-7866) December 2008, <https://doi.org/10.2172/947299>
- [19] McSpadden, A. R.; Coker, O. D.; Bohlander, S.: Closed-Loop Geothermal Well Design with Optimization of Intermittent Circulation and Thermal Soak Times, *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, October 3-5 (2022.), <https://doi.org/10.2118/210307-MS>
- [20] Projekt razrade i eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode „Sveta Nedelja“, EKO PLODOVI d.o.o. (2019.), 152.
- [21] Projekt razrade i eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode „Geotermalno polje Zagreb“, GPC INSTRUMENTATION PROCESS d.o.o. (2020.), 194.

- [22] Šljivac, D.; Topić, D.: *Obnovljivi izvori električne energije*, sveučilišni udžbenik, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera, 978-953-6032-96-9, Osijek (2018.), 199.
- [23] Mustapić, N.; Brkić, V.; Duić, Ž.; Kralj, T.: Thermodynamic Optimization of Advanced Organic Rankine Cycle Configurations for Geothermal Energy Applications, *Energies*, **15** (2022) 19, 6990, 34, <https://doi.org/10.3390/en15196990>
- [24] https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=en&c=HR&stacking=stacked_absolute_area&interval=year&legendItems=jy7&year=2023, *Pristupljeno: 2025-02-02*
- [25] Dopunski rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Velika Ciglena“ (Prva dopuna), GEOen d.o.o. (2017.)
- [26] Rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju „Velika Ciglena“, GEOen d.o.o (2012.)