

Održiva energetska tranzicija ugljikovodika i geotermalne vode Varaždinske županije

Sustainable Energy Transition of Hydrocarbons and Geothermal Waters of Varaždin County

izv. prof. dr. sc. Darko Pavlović
Savjetnik predsjednika Uprave
Plinacro d.o.o., Zagreb
darko.pavlovic@plinacro.hr

dr. sc. Melita Srpak
Stručna savjetnica za okoliš, resurse i krajobraz
Zavod za prostorno uređenje Varaždinske županije
melita.srpak@gmail.com



Ključne riječi: energetska tranzicija, geotermalni resursi, geotermalni potencijal, Lunjkovec – Kutnjak, okolišni utjecaj

Key words: energy transition, geothermal resources, geothermal potential, Lunjkovec – Kutnjak, environmental impact

Sažetak

U suvremenom kontekstu, globalni rast potrošnje energije i sve izraženija svijest o ekološkim posljedicama fosilnih goriva potiču intenzivna istraživanja i napore u pronalaženju alternativnih, održivih i sigurnih izvora energije. Ovaj trend je naročito izražen u Republici Hrvatskoj, gdje se sve više prepoznaje važnost prelaska na obnovljive izvore energije kako bi se umanjili ekološki utjecaji i osigurala energetska sigurnost. Cilj ovog rada proizlazi iz težnje naglašavanja ključne uloge obnovljivih izvora energije u kontekstu poboljšanja energetske efikasnosti, dekarbonizacije plinske industrije te šireg okvira energetske tranzicije. Posebna pažnja usmjerena je na povezivanje tih izvora s očekivanim klimatskim promjenama, ističući njihovu značajnu ulogu kao kritičnog elemenata u osiguravanju energetske sigurnosti, promicanju

održive energetike te ublažavanju utjecaja klimatskih promjena. Ovaj znanstveni rad temelji se na analizi geotermalne energije, obrađujući njezino prirodno pojavljivanje, tehničke aspekte iskorištavanja, raznolikost geotermalnih elektrana, njihov utjecaj na okoliš, te istražujući trenutno i potencijalno stanje iskorištavanja ove obnovljive energije kako u Republici Hrvatskoj, tako i u Varaždinskoj županiji, Metodologija rada uključuje prikupljanje podataka putem analize znanstvenih članaka, relevantne literature, te terenskih i laboratorijskih istraživanja. Proučavamo geološke karakteristike koje doprinose pojavi geotermalne energije, te primjenjujemo kvantitativne i kvalitativne metode za procjenu njezina utjecaja na okoliš.

Abstract

In the contemporary context, global growth in energy consumption and an increasing awareness of the ecological consequences of fossil fuels stimulate intensive research and efforts to find alternative, sustainable, and secure energy sources. This trend is particularly pronounced in the Republic of Croatia, where the importance of transitioning to renewable energy sources is increasingly recognized to reduce ecological

impacts and ensure energy security. The goal of this paper arises from the aspiration to emphasize the crucial role of renewable energy sources in improving energy efficiency, decarbonizing the gas industry, and within the broader framework of energy transition. Special attention is focused on connecting these sources with expected climate changes, highlighting their significant role as critical elements in ensuring energy security, promoting sustainable energy, and mitigating the impacts of climate change. This scientific paper is based on the analysis of geothermal energy, addressing its natural occurrence, technical aspects of exploitation, the diversity of geothermal power plants, their environmental impact, and exploring the current and potential state of utilizing this renewable energy both in the Republic of Croatia and in Varaždin County. The research methodology involves data collection through the analysis of scientific articles, relevant literature, as well as field and laboratory research. We examine geological characteristics contributing to the occurrence of geothermal energy and apply quantitative and qualitative methods to assess its environmental impact.

1. Uvod

U današnjem globalnom okruženju, jasno se uočava izrazit porast potrošnje energije, istovremeno s povećanom sviješću o negativnom utjecaju fosilnih goriva na okoliš. Suočeni s ovim izazovom, međunarodna zajednica aktivno istražuje i razvija alternativne, održive i sigurne izvore energije. Naime, EU je prepoznala važnost obnovljivih izvora energije i smanjenja emisija stakleničkih plinova kako bi se postigao cilj neutralnosti ugljika do sredine stoljeća i u tom kontekstu geotermalna energija pruža pouzdan i održiv izvor energije koji može značajno doprinijeti ostvarivanju ovog cilja (Tumara i Pavlović, 2018.). Geotermalna energija se izdvaja kao iznimno stabilan i održiv energetska izvor, sposoban zadovoljiti čak i bazne energetske potrebe, što ga razlikuje od drugih oblika obnovljivih izvora poput energije vjetra, Sunčeve energije i energije valova. Europska unija (u nastavku: EU) je 2009. godine donijela ambiciozan programski paket poznat kao 20-20-20, koji postavlja obveze za članice u kontekstu klimatskih promjena i postizanja energetske neovisnosti. Ovaj paket zahtijeva ostvarivanje tri ključna cilja: smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20 % u odnosu na referentnu godinu, povećanje udjela obnovljivih izvora energije na 20 % od ukupne potrošnje, te povećanje energetske

učinkovitosti za 20 %. U skladu s tom usmjerenosti, Direktivom 2009/28/EZ propisano je poticanje upotrebe obnovljivih izvora energije. Nakon 2020. godine, u nastavku prvog paketa, stupio je na snagu energetska paket 2030, koji je definiran dokumentom Europske komisije iz 2014. godine (EUCO 169/14). Ovaj paket je detaljno razrađen u dokumentu „*Green paper – A 2030 framework for climate and energy policies*“ te postavlja okvire zahtjeva za razdoblje od 2020. do 2030. godine. Cilj je postići daljnje smanjenje emisija stakleničkih plinova od najmanje 40 %, povećanje udjela korištenja obnovljivih izvora na otprilike 32 %, te povećanje energetske učinkovitosti na razinu od otprilike 32,5 %. U kontinuitetu, treći programski paket, čiji su okviri definirani za razdoblje od 2030. do 2050. godine, ambiciozno predviđa smanjenje emisija čak do 80 %. Ovaj paket je u skladu s ciljem postizanja klimatske neutralnosti EU do 2050. godine, kako je predviđeno Zelenim planom. Ova dugoročna vizija ukazuje na potrebu za značajnim transformacijama u energetska sektoru, postavljanjem EU-a kao lidera u održivom pristupu energiji na globalnoj razini. EU je razvila poseban okvir kako bi potaknula i promicala korištenje geotermalne energije. Taj okvir uključuje smjernice, zakonodavstvo i financijske instrumente koji potiču investicije u geotermalne projekte i istraživanje tehnologija povezanih s ovim izvorom energije. Ovaj okvir osigurava stabilnost i podršku za razvoj geotermalnih projekata širom EU. Republika Hrvatska, poput mnogih drugih država, prepoznaje ključnu ulogu koju obnovljivi izvori energije (u nastavku: OIE) igraju u zadovoljenju rastućih energetska potreba. Tijekom posljednjih desetljeća, svjedoci smo sveprisutnog prelaska mnogih država prema obnovljivim izvorima energije, s ciljem postizanja značajnog udjela u ukupnoj energetska potrošnji. Očito je da izvori poput Sunca, vjetra, plime i oseke, vodotoka, biomase i geotermalne energije zauzimaju ključno mjesto u energetska portfelju, kako u sadašnjosti, tako i u budućnosti (Škrlec i dr., 2019.). Ova temeljita transformacija energetska sektora ne samo da predstavlja nužan odgovor na rastuće potrebe za energijom već i ključni korak prema postizanju održivosti i smanjenju negativnih ekoloških utjecaja. Navedeni globalni trend odražava zajednički napor u izgradnji energetska sustava koji minimaliziraju emisije stakleničkih plinova, smanjujući tako ovisnost o ograničenim resursima i podržavajući dugoročnu stabilnost i otpornost energetska sektora (Pavlović i dr. 2018). Ove inicijative ne samo da odražavaju potrebu za diverzifikacijom energetska izvora već i

usmjeravaju ka stvaranju održivog modela za globalnu energetska budućnost.

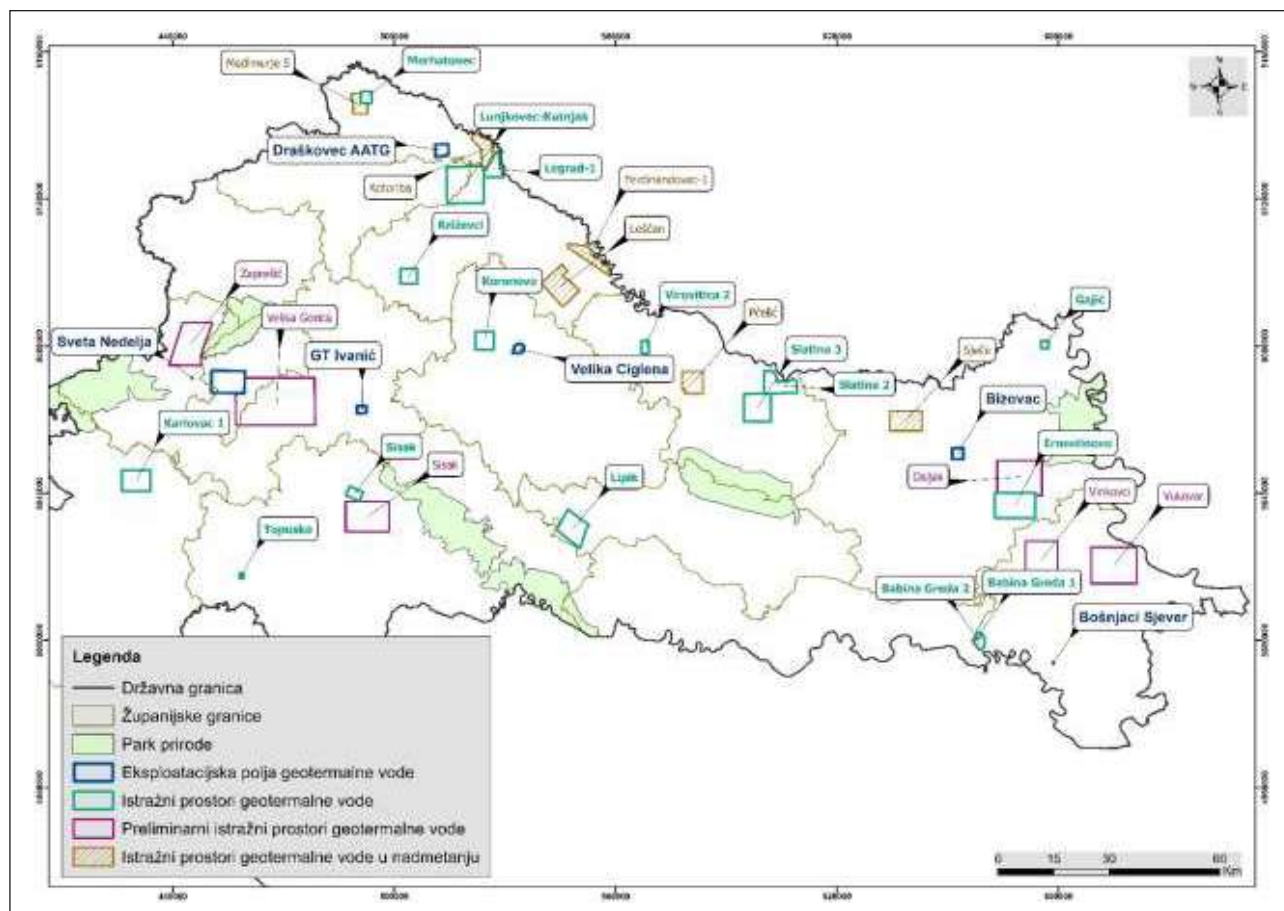
2. Uloga geotermalne energije u niskougličnoj energetska tranziciji

Geotermalna energija, kao obnovljiv izvor, igra ključnu ulogu u ostvarivanju ciljeva Strategije i tranzicije prema niskougličnom gospodarstvu. Njen doprinos se ogleda u oblikovanju nacionalne zelene politike odnosno dekarbonizaciji, energetska učinkovitosti, energetska sigurnosti, unutarnjem energetska tržištu te istraživanju, inovacijama i konkurentnosti. Plan razvoja geotermalnog potencijala Hrvatske do 2030. godine naglašava važnost geotermalne energije u ostvarivanju nacionalnog cilja od najmanje 36,6 posto udjela obnovljivih izvora energije u konačnoj potrošnji energije do 2030. godine. Geotermalna energija omogućuje kaskadno korištenje toplinske energije geotermalne vode tijekom cijele godine, uključujući proizvodnju električne energije, grijanje prostora, sušare, plastenike, turističke sadržaje i druge

svrhe. Njezina primjena rezultira smanjenjem potrošnje konvencionalnih energenata, pozitivno utječući na okoliš. U kontekstu zakonodavstva, poticaji za iskorištavanje geotermalne energije su naglašeni, budući da Republika Hrvatska raspolaže temperaturnim gradijentom koji je 60 posto veći od europskog prosjeka, posebice u panonskom dijelu zemlje. Agencija za ugljikovodike (u nastavku: AZU) igra ključnu ulogu u prikupljanju geoloških i geofizičkih podataka, što povećava učinkovitost državnog sustava u privlačenju potencijalnih investitora.

Istraživanje geotermalne vode u energetska svrhe sadržano je u Strategiji energetska razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, koja definira poticanje istraživanja i eksploatacije geotermalne vode za energetska svrhe. U skladu s navedenim istraživanje geotermalnih voda u energetska svrhe dozvoljeno je na prostoru kopna Republike Hrvatske, a u skladu s geotermalnim potencijalom svakog pojedinog područja na kopnu (Slika 1.).

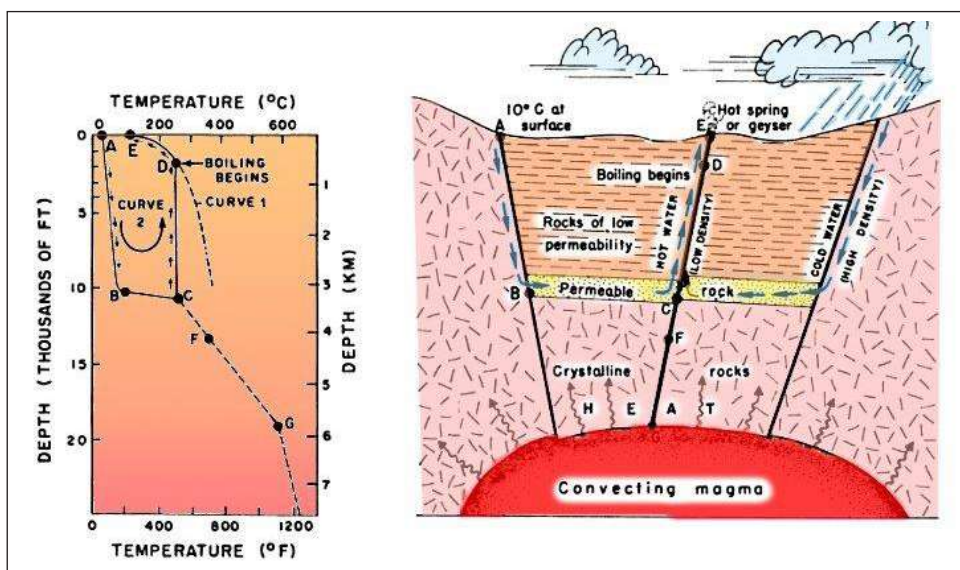
Korištenje geotermalnih voda u energetska svrhe definirano je i Zakonom o rudarstvu (NN 56/13., 114/14., 98/19. i 83/23.) i Zakonom o istraživanju i ek-



Slika 1. Trenutno aktivni prostori na kojima se obavlja gospodarska djelatnost eksploatacije i istraživanja geotermalne vode u energetska svrhe u Republici Hrvatskoj. (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.)

sploataciji ugljikovodika (NN 52/18., 52/19. i 30/21.), dok je upotreba mineralnih i geotermalnih voda u ljekovite i balneološke svrhe propisana Zakonom o vodama (NN 66/19., 84/21. i 47/23.). Prema Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, geotermalne vode su u vlasništvu RH, te je za njihovo korištenje potrebno pribaviti zakonima propisane dozvole (dozvola za istraživanje geotermalnih voda; dozvola za eksploataciju; dozvola za pridobivanje geotermalnih voda, ugovor o eksploataciji geotermalnih voda, itd.) od nadležnih državnih, regulatornih i/ili tijela regionalne i lokalne samouprave. Pravno-regulatorne odredbe za iskorištavanje geotermalne energije vezane su uz eksploataciju ugljikovodika ili voda (u slučaju kada se ona ne koristi u energetske svrhe). U narednim razdobljima primjene energetske paketa očekuje se porast korištenja obnovljivih izvora energije, među kojima geotermalni resursi imaju važnu ulogu. Porast korištenja obnovljivih izvora energije vezan je uz Direktivu 2009/28/EC (gdje je geotermalna energija definirana kao „energija pohranjena u obliku topline ispod tvrde Zemljine površine“) te programske klimatske i energetske pakete 2030 i 2050. Geotermalni potencijal određenog područja često je usko povezan s njegovom geološkom građom. Geotermalna energija je obnovljivi izvor energije koji koristi toplinu Zemlje (količina takve energije ogromna i potječe od planetarnih i geoloških procesa) za proizvodnju električne energije i grijanja. Ima ključnu ulogu u tranziciji prema klimatski neutralnom energetske sustavu. Toplina koja se koristi za geotermalnu energiju pohranjena je duboko u Zemlji, sve do Zemljine jezgre na dubini od 6400 km (Bassam i dr., 2013). Toplinski tok Zemlje rezultat je djelovanja dva ključna faktora:

geotermalnog gradijenta i toplinske vodljivosti stijena. Većina geotermalnih istraživanja odvija se tamo gdje je geotermalni gradijent veći te je stoga bušenje moguće na plićem području. Geotermalni gradijent, koji mjerimo u bušotinama, predstavlja nagib temperature prema dubini. S druge strane, toplinska vodljivost stijena, najbolje izmjerena u laboratoriju na uzorcima poznatim kao jezgre, odnosi se na sposobnost stijena da provode toplinu. Važno je napomenuti da se ovi faktori međusobno povezuju, budući da je geotermalni gradijent izmjeren u određenom dijelu bušotine, gdje se također prikupljaju uzorci za laboratorijska ispitivanja toplinske vodljivosti stijena. Ova međusobna veza omogućava sveobuhvatno razumijevanje toplinskog toka Zemlje i ključnih faktora koji ga oblikuju što znači da je geotermalni gradijent direktno proporcionalan toplinskom toku, i obrnuto proporcionalan toplinskoj vodljivosti, koja se mijenja s dubinom, jer se s dubinom mijenja i gustoća stijene (Barbier, 1997., Golub i Kurevija, 2008.). Geotermalni sustavi javljaju se u različitim vrstama geoloških formacija i na područjima s različitim toplinskim, hidrološkim i kemijskim svojstvima. Stoga komercijalno održivi geotermalni sustav čini pet ključnih značajki: izvor topline, propusni rezervoar, stalna opskrba vodom, gornji sloj nepropusne stijene i pouzdan mehanizam za ponovno punjenje. DiPippo (2005) je sustav prikazao na način da hladna voda za ponovno punjenje dolazi u obliku kiše (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



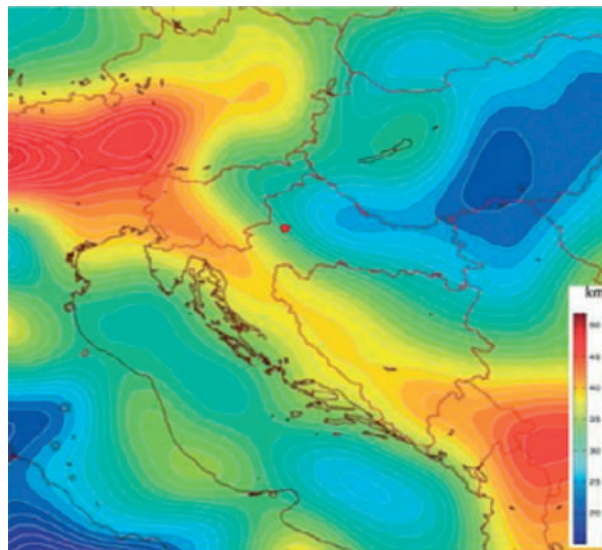
Slika 2. Shematski model hidrotermalnog geotermalnog sustava, (DiPippo R., 2005).

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) (Slika 2.).

U kontekstu istraživanja, treba napomenuti da ne postoje standardne međunarodne klasifikacije za geotermalna ležišta rezultira raznovrsnim pristupima njihovoj kategorizaciji. Ti pristupi uključuju različite podjele temeljene na stupnju istraženosti fluida, vrsti geotermalnih ležišta te temperaturi ležišnog fluida. Prvi parametar klasifikacije je stupanj istraženosti fluida koji pruža uvid u sastav fluida, njihovu kemijsku i fizikalnu prirodu, što je ključno za procjenu potencijala eksploatacije geotermalnih resursa. Drugi pristup klasifikaciji odnosi se na vrstu geotermalnih ležišta, što uključuje različite geološke i hidrogeološke formacije. Identifikacija i razumijevanje tih tipova ležišta nužno je za određivanje optimalnih tehnologija eksploatacije i održavanje održivosti geotermalnih izvora. Treći aspekt klasifikacije, temperaturni raspon ležišnog fluida, ključan je za određivanje energetskog potencijala geotermalnog ležišta. Različite temperature fluida imaju direktan utjecaj na izbor tehnologije eksploatacije, odnosno, primjenu u grijanju, hlađenju ili proizvodnji električne energije.

3. Geotermalni potencijal u Republici Hrvatskoj

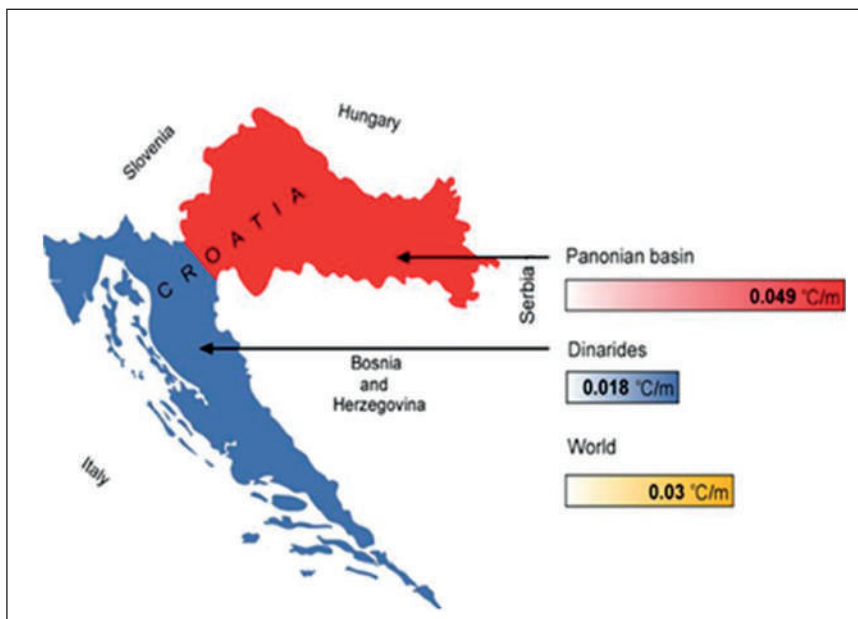
Prva sustavna istraživanja geotermalnog potencijala na teritoriju Republike Hrvatske predstavio je Jelić (1979), čije metodologije su se pretežito oslanjale na podatke prikupljene tijekom ili nakon provedbe dubokih istražnih ili proizvodnih bušotina, lociranih prvenstveno unutar Savske i Dravske depresije. Manji dio podataka obuhvatio je informacije iz plitkih bušotina. Progresivnim istraživanjima i proširivanjem obuhvata na cijelom teritoriju Republike Hrvatske, 1995. godine objavljena je prva karta geotermalnih gradijenata, kao i procjena toplinskog toka (Jelić et al., 1995). U Republici Hrvatskoj, geotermalni potencijal ima značajnu vezu s karakteristikama kontinentalne kore, a posebno s dubinom Mohorovičićevog diskontinuiteta, koji označava granicu između Zemljine kore i plašta. Geotermalni potencijal se najčešće izražava pomoću vrijednosti geotermalnog gradijenta i/ili gustoće toplinskog toka (Hurtig et al., 1992.). Analiza geoloških parametara, posebice dubine Mohorovičićevog diskontinuiteta, pruža ključne informacije o dostupnosti i intenzitetu geotermalnih izvora na određenom području. U kontekstu Republike Hrvat-



Slika 3. Karta dubine Mohorovičićeva diskontinuiteta na području jugoistočne Europe (Grad i suradnici, 2009.)

ske, geotermalni potencijal posebno dolazi do izražaja u Panonskom području, gdje se Mohorovičićev diskontinuitet lokalno nalazi na dubinama manjim od 30 km (Slika 3.). Ova karakteristika ukazuje na relativno plitak položaj granice između kore i plašta, što može rezultirati povećanom dostupnošću geotermalne energije na tim lokacijama. Geotermalne anomalije, prisutne na nekoliko lokacija, mogu se pripisati izraženim toplinskim tokovima uslijed konvektivnih strujanja, te su već ta područja prepoznata kao dobre potencijalne lokacije za iskorištavanje geotermalnih resursa npr. Velika Ciglena, Lunjkovec-Kutnjak, Draškovec, Babina Greda, Ferdinandovac i Ivanić.

Geotermalni potencijal Republike Hrvatske identificiran je putem bušotina izvedenih tijekom druge polovice 20. stoljeća, namijenjenih istraživanju i eksploataciji nafte i plina. Podaci prikupljeni iz ovih bušotina koriste se kao temelj za projektiranje i planiranje geotermalnih projekata unutar teritorija Republike Hrvatske (Pavlović i Banovac, 2020). Petrofizikalne karakteristike ležišnih stijena, uključujući poroznost, propusnost i zasićenje vodom, procijenjene su pomoću laboratorijskih analiza jezgara i interpretacija karotažnih mjerenja dok su fizikalne karakteristike ležišta su procijenjene analizom rezultata testiranja ležišta. Podaci o geotermalnom fluidu unutar ležišta, obuhvaćajući salinitet, kemijski sastav vode, početni ležišni tlak, ležišnu temperaturu te proizvodne karakteristike ležišta poput kapaciteta i uvjeta proizvodnje, dobiveni su putem navedenih testiranja. Republika Hrvatska dijeli se na dva područja, jedno područje su Dinaridi i Jadran koji imaju geotermalni gradijent između 0,015 – 0,025 °C/m, a drugo je Panonski dio



Slika 4. Geotermalni gradijent Republike Hrvatske (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.)

na kojemu je geotermalni gradijent veći od $0,04 \text{ °C/m}$ (Slika 4.) (Borović i Marković, 2015.). Od te dvije regije, poznato je da Panonski bazen ima potencijal za iskorištavanje geotermalne energije (Jelić, 1979; Jelić et al., 2005). Dinaridi su pretežno izgrađeni od karbonatnih stijena (vapnenca i dolomita), a Panonski dio karakterizira izgrađen je od sedimentnih stijena (konglomerat, pješčenjak, breča).

U Hrvatskoj postoji višestoljetna tradicija iskorištavanja geotermalne energije iz prirodnih izvora u medicinske svrhe i za kupanje. Povijesno gledano, proizvodnja geotermalne vode za spomenute toplice odvijala se putem prirodnih izvora, no suvremene prakse uključuju i korištenje geotermalne vode iz plitkih bušotina uz prirodni tok. U Tablici 1. prikazani su prirodni izvori s protokom i temperaturom vode, gdje je vidljivo da temperatura vode prirodnih izvora u panonskoj regiji doseže 65 °C , dok temperatura prirodnih termalnih izvora u dinarskom području ne prelazi 28 °C , kao što je slučaj s toplicama u Istri (Borović i Urumović, 2018.).

Pri proučavanju pojave geotermalnih voda, što je rezultiralo razvojem medicinsko-rekreacijskih objekata, važno je naglasiti da su, istovremeno s istraživanjem nafte i plina u Panonskom području, identificirana i geotermalna ležišta koja obuhvaćaju širok spektar dinamike podzemnih voda, termalnih karakteristika tla te mehanizama koji su doveli do raznolikosti temperatura i količina geotermalnih fluida. Geotermalni sustavi imaju značajne prednosti u odnosu na ostale obnovljive sustave energije i jedan su od rijetkih izvora koji pruža hlađenje, grijanje i toplu vodu iz iste instalacije. Ovisno o karakteristikama geotermalnog ležišta,

prilagođava se odgovarajuća tehnologija za izgradnju geotermalne elektrane. Za ležišta s izrazito visokim temperaturama ($>220 \text{ °C}$) najčešće se koristi parna turbina, pri čemu se razlikuju postrojenja sa suhom parom za ležišta bogata parom te elektrane s isparavanjem ili dvostrukim isparavanjem za ležišta vode pod visokim pritiskom. U primjeru ležišta s geotermalnom vodom nižih temperatura ($100 - 220 \text{ °C}$), preferiraju se binarne elektrane. U ovim elektranama, para potrebna za pokretanje turbine generira se posrednim zagrijavanjem radnog fluida čije vrelište nadmašuje vrelište vode. Binarni sustavi često predstavljaju najrasprostranjeniji tip geotermalnih elektrana na globalnoj razini, a pokazuju se prikladnima i za primjenu na geotermalnim ležištima u Republici Hrvatskoj, gdje se temperatura geotermalne vode na potencijalnim lokacijama pogodnima za izgradnju geotermalnih elektrana kreće između 105 °C i 175 °C . Tehnologija iskorištavanja geotermalne energije u energetske svrhe ovisi o vrsti ležišta koja se razlikuju prema temperaturi, odnosno termodinamičkim i hidrološkim obilježjima izvora, kako je navedeno u Tablici 2.

Slika 5. prikazuje neke od geotermalnih lokacija u Republici Hrvatskoj na kojima su već provedena ciljana istraživanja, na nekima se geotermalna energija koristi, ali u maloj količini, a na nekima je korištenje prestalo, dok na ostalima predstoji provesti daljnja istraživanja.

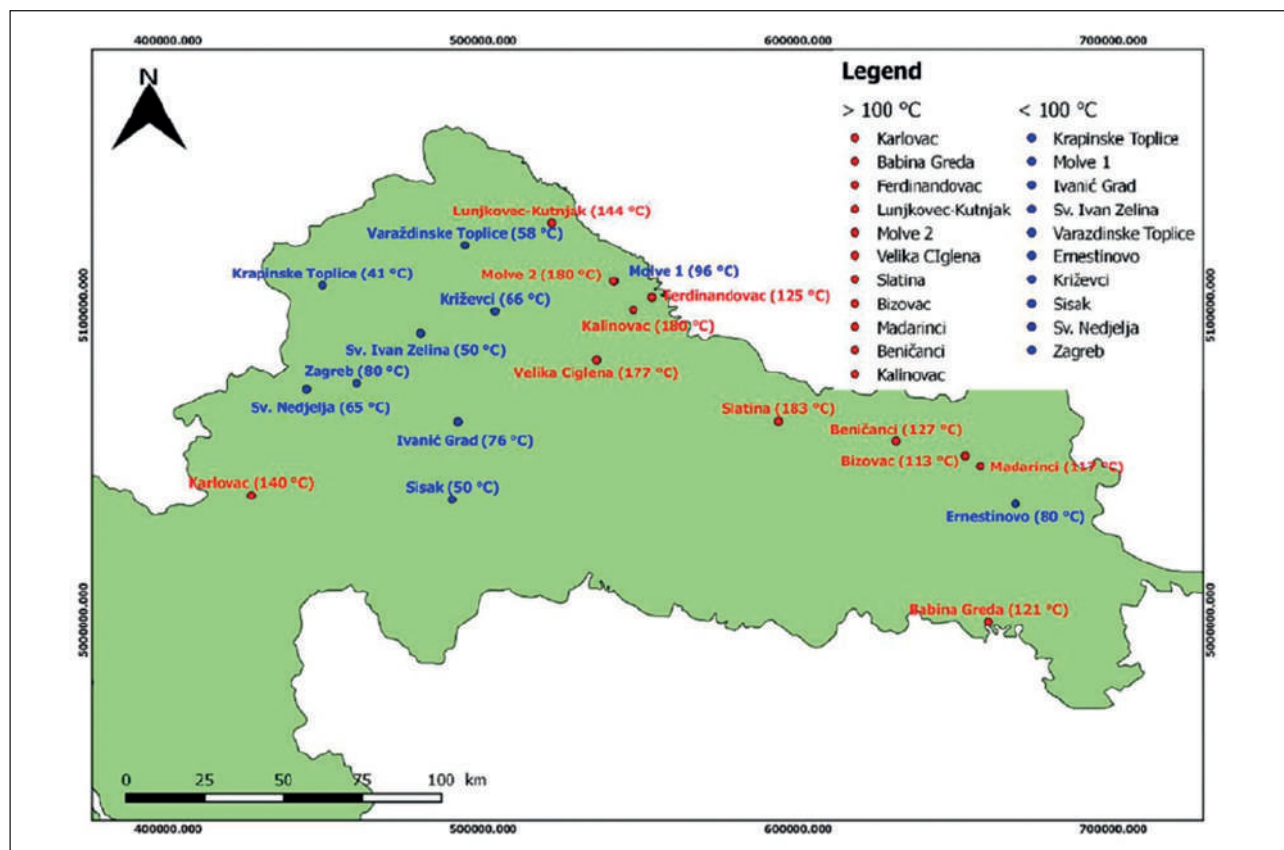
Na području Republike Hrvatske trenutno se identificira prisutnost 7 eksploatacijskih polja geotermalne vode (Tablica 3), a istražna područja obuhvaćaju 28 lokacija raspoređenih regionalno u Međimurju, Podravini, Pokuplju i Slavoniji.

Tablica 1. Hrvatski prirodni izvori s protokom i temperaturom vode (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.)

Geotermalna regija	Prirodni izvor – lokacija	Protok (l/s) Temp. °C 2022.	Protok (l/s) Temp. °C 2030.
Panonska regija	Daruvarske toplice	21,0	46,6
	Harina Zlaka	3,7	32,8
	Jezerčica – Donja Stubica	34,2	38
	Krapinske Toplice	41	40,8
	Lešće	15	34,0
	Lipik	6,8	58,3
	Podevčevo	n/a	18,7
	Podsused – Zagreb	2,0	20,0
	Stubičke Toplice	17	65
	Sutinske Toplice	10	37,4
	Sv. Helena – Samobor	19,7	25,8
	Sv. Ivan Zelina	35	24,1
	Sv. Jana	40	24,6
	Šemničke toplice – D. Šemnica	6	31
	Topličica – Gotalovec	10	25,7
	Topličica – Madžarevo	n/a	22,5
	Topličina – Marija Bistrica	3,5	17,8
	Topusko	100	65
	Tuheljske Toplice	85	41
Varaždinske Toplice	95	57,6	
Velika	3,6	28,6	
Dinarska regija	Istarske toplice – Livade	2,0	28
	Mokošica	n/a	16,0
	Splitske toplice – Split	24,0	21,3

Tablica 2. Tehnologije za iskorištavanje geotermalne energije ovisno o temperaturi ležišta (Ener supply – Priručnik o obnovljivim izvorima energije, 2016.)

Temperatura ležišta	Fluid u ležištu	Primjena	Tehnologija
>220 °C (visokotemperaturna ležišta)	Voda ili para	Proizvodnja električne energije	Parna turbina (Flash Steam) – Kombinirani ciklus (parna turbina i binarni proces) – Izravno korištenje fluida – Izmjenjivač topline – Toplinska crpka
100 °C – 220 °C (srednjotemperaturna ležišta)	Voda	Proizvodnja električne energije – Izravno korištenje	– Binarni proces – Izravno korištenje fluida – Izmjenjivač topline – Toplinska crpka
50 °C – 150 °C (niskotemperaturna ležišta)	Voda	– Izravno korištenje	– Izravno korištenje fluida – Izmjenjivač topline – Toplinska crpka



Slika 5. Geotermalne lokacije u Republici Hrvatskoj (Živković i dr., 2019.)

Tablica 3. Trenutno aktivni prostori na kojima se obavlja gospodarska djelatnost eksploatacije geotermalne vode u energetske svrhe u Republici Hrvatskoj (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.)

R. br.	Naziv eksploatacijskog polja (EPGTV)	Površina km ²
1.	Bošnjaci Sjever	0,05
2.	Draškovec AATG	11,18
3.	Geotermalno polje Zagreb	54,00
4.	GT Bizovac	9,00
5.	GT Ivanić	5,00
6.	Velika Ciglena	5,94
7.	Sveta Nedjelja	0,01

Tablica 4. Trenutni prostori na kojima se obavljaju istražne aktivnosti s ciljem eksploatacije geotermalne vode u energetske svrhe u Republici Hrvatskoj (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.)

R. br.	Naziv prostora (IPGTV)	Površina km ²
1.	Babina Greda 1	2,64
2.	Babina Greda 2	7,70
3.	Ernestinovo	76,66
4.	Karlovac 1	44,98
5.	Korenovo	25,00
6.	Križevci	18,45
7.	Legrad-1	20,89
8.	Lunjkovec-Kutnjak	99,97
9.	Merhatovec	9,59
10.	Slatina 2	38,77
11.	Slatina 3	55,26
12.	Virovitica 2	7,00
13.	Sisak	10,78
14.	Topusko	1,42
15.	Lipik	47,53
16.	Gajić	4,00

Od ukupnog broja istražnih područja, 16 ih pripada privatnim investitorima, čija primarna interesna sfera usmjerava na proizvodnju električne energije. Preostalih 12 istražnih područja u vlasništvu su jedinica lokalne samouprave, koje su prepoznale potencijal iskorištavanja geotermalne energije (Tablica 4).

Trenutno je u Republici Hrvatskoj aktivno 10 istražnih prostora geotermalne vode za energetske svrhe na kojima je fokus usmjeren na istražne aktivnosti s ciljem pridobivanja električne energije te u manjoj mjeri za proizvodnju toplinske energije, a koje se većinom odnose na lokalne zajednice koje imaju planove koristiti toplinsku energiju za grijanje naselja. Projekti koji su trenutno u istražnoj fazi mogu proizvesti 59 MWe električne energije i oni mogu biti u punoj implementaciji od 2022. godine do 2025. godine.

Projekti u fazi eksploatacije:

- Velika Ciglena – električna energija (najveća ORC geotermalna elektrana u Europi)
- Draškovec – električna energija
- Bizovac – toplinska energija
- Ivanić – toplinska energija
- Sveta Nedjelja – toplinska energija – poljoprivreda
- Bošnjaci sjever – toplinska energija – poljoprivreda

Danas, u okviru globalnih inicijativa za povećanje udjela geotermalne energije u energetsom miks, nastoje se razviti nove tehnologije koje će unaprijediti njezino korištenje i prevladati prepreke koje ograničavaju njezinu širu implementaciju u usporedbi s drugim obnovljivim izvorima energije. Ključne prepreke, identificirane kao glavni čimbenici ograničenja šire primjene geotermalne energije, uključuju visoke troškove istraživanja, razvoja i eksploatacije geotermalnih resursa. Stoga se usredotočuju na razvoj novih, poboljšanih, ekonomski prihvatljivijih tehnika istraživanja podzemnih struktura i bušenja, s ciljem smanjenja rizika i troškova vezanih uz pristup geotermalnim ležištima. Istraživanja o potencijalima korištenja geotermalnih resursa, koja se provode u blizini naftnih i plinskih polja, često nakon završetka eksploatacije ugljikovodika, usredotočena su na strategije poput ponovne uporabe postojećih bušotina. Takva praksa omogućuje produženje životnog vijeka bušotina i daljnje iskorištavanje već izgrađene infrastrukture. Primjerice, u Republici Hrvatskoj, gdje se na eksploatacijskim poljima pridobiva nafta i/ili prirodni plin, trenutna prenamjena za primjenu u geotermalne svrhe nije moguća. Međutim, nakon prestanka pridobi-

vanja ugljikovodika, za svaki od navedenih prostora bit će potrebno provesti detaljnu analizu potencijala i primjene eksploatacijskih polja u geotermalne svrhe. Ova procjena će ovisiti o različitim čimbenicima, uključujući geološke, ležišno-inženjerske, tehničko-tehnološke i sigurnosne aspekte primjene. U 2021. godini, izmjenama i dopunama Zakona o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, te Zakona o Agenciji, uvedena je odredba kojom se Agencija ovlašćuje izvoditi istražne radove radi procjene geotermalnog potencijala Hrvatske. Projekt Razvoja geotermalnog potencijala, izrađen neposredno nakon navedenih zakonskih promjena, uvršten je u Nacionalni plan oporavka i otpornosti (NPOO). Kroz mjeru C1.2. R1-I2 unutar NPOO-a, Agenciji za ugljikovodike je ključni cilj ovog tehnički i kapitalno zahtjevnog projekta povećanje udjela geotermalne energije, kao obnovljivog izvora, u sektoru toplinarstva – od grijanja stambenih zgrada, poslovnih prostora i bazena do poljoprivrede u kojoj geotermalna voda služi za grijanje plastenika, sušenje voća i povrća, ribogojilišta itd.

4. Ugljikovodici i geotermalne vode iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe na području Varaždinske županije

Na području Varaždinske županije istražuju se i iskorištavaju i energetske mineralne sirovine (ugljikovodici/nafta, plin) i geotermalna voda iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe. Eksploatacija energetskih mineralnih sirovina ugljikovodika, plina i nafte, uključuje pridobivanje ugljikovodika iz ležišta, oplemenjivanje ugljikovodika, transport ugljikovodika cjevovodima, kad je u tehnološkoj svezi s odobrenim eksploatacijskim poljima i skladištenje ugljikovodika u geološkim strukturama (Srpak i Pavlović, 2020.).

4.1. Ugljikovodici

U Republici Hrvatskoj, eksploatacija ugljikovodika je pažljivo regulirana i dopuštena samo unutar strogo definiranih eksploatacijskih polja za ugljikovodike (EPU), sukladno odobrenim naftno-rudarskim projektima, uz poštivanje mjera zaštite okoliša i sigurnosnih standarda propisanih u Okvirnom planu i programu istraživanja i eksploatacije ugljikovodika na kopnu. Ograničenja i smjernice proizlaze iz provedene Strateške procjene utjecaja

Tablica 5. Planirane površine za iskorištavanje energetskih mineralnih sirovina – Ugljikovodici

Mineralna sirovina – energetska UGLJIKOVODICI				
R. br.	Lokacija	JLS	Obuhvat	Površina (km ²)
1.	CVETKOVEC	Grad Ludbreg	obuhvaća odobreno EPU Cvetkovec, u dijelu koji se nalazi na području Varaždinske Županije, veći dio EPU Cvetkovec nalazi se na području Koprivničko-križevačke županije	423,01 – ukupno (191,36 na području Varaždinske županije)
2.	DRAVA – 02	obuhvaća dijelove područja Grada Ludbrega i Općina Mali Bukovec i Veliki Bukovec	obuhvaća odobreni IPU u dijelu koji se nalaze na području Varaždinske županije	136.100,00 – ukupno (79.043,64 na području Varaždinske županije)
3.	SJEVEROZAPADNA HRVATSKA – 01	obuhvaća dijelove područja svih Gradova i svih Općina Varaždinske županije, osim Općina Breznički Hum, Breznica i Visoko	obuhvaća odobreni IPU u dijelu koji se nalaze na području Varaždinske županije	136.100,00 – ukupno (79.043,64 na području Varaždinske županije)
4.	SJEVEROZAPADNA HRVATSKA – 05	obuhvaća dijelove područja Gradova Lepoglave, Ivanca i Novog Marofa i Općina Bednja, Ljubešćica, Breznički Hum, Breznica i Visoko	obuhvaća prijedlog IPU u dijelu koji se nalaze na području Varaždinske županije	

Izvor: Prostorni plan Varaždinske županije („Službeni vjesnik Varaždinske županije“ br. br. 08/00., 29/06., 16/09. i 96/21.).

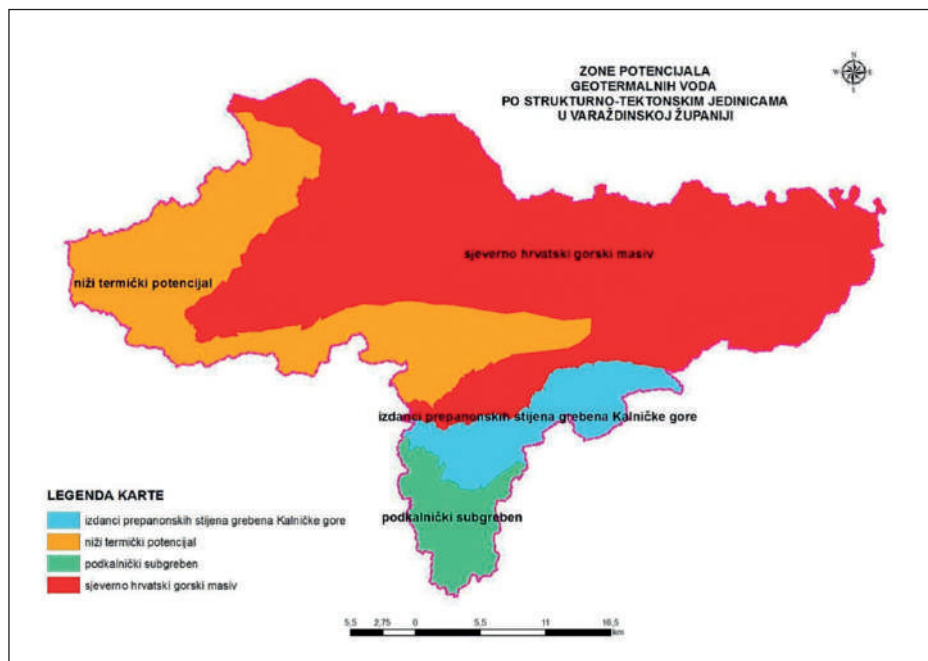
na okoliš, koja se temelji se na ocjeni potencijalnih utjecaja na okoliš. Cilj istraživanja ugljikovodika je poticanje energetske neovisnosti Republike Hrvatske, a pritom se usklađuje s odredbama Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske. Tijekom provedbe istraživanja ugljikovodika primjenjivat će se zaključci proizašli iz Okvirnog plana i programa, osiguravajući tako detaljno i odgovorno upravljanje eksploatacijom tih resursa (Srpak, 2022). Ovakav pristup promovira planski i koordinirani razvoj sektora ugljikovodika uzimajući u obzir potencijalne utjecaje na okoliš, istraživanje potencijala nafte i plina, te dosljedno poštivanje važećih smjernica i zakonskih odredbi. Na prostoru Varaždinske županije, planirane predmetne površine za iskorištavanje energetskih mineralnih sirovina ovise o situaciji i lokaciji te obuhvaćaju postojeća eksploatacijska polja i istražne prostore, područja njihovog mogućeg proširenja, ranija eksploatacijska polja i istražne prostore koji bi se mogli reaktivirati, te vrlo malim dijelom nova područja na kojima se još nije istraživalo niti eksploatiralo (Tablica 5).

4.2. Geotermalne vode iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe

Istraživanje geotermalnih voda iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe (uključivo formiranje istražnih prostora) dozvoljeno je na prostoru Varaždinske županije na temelju i u skladu s geotermalnim potencijalom utvrđenim Rudarsko-geološkom studijom Varaždinske županije (utvrđene zone potencijala prema strukturno-tektonskim jedinicama, no ukupni geološki potencijal mineralne sirovine hidro-geotermalnih ležišta visoke i niske entalpije utvrđen je na gotovo cijelom području Varaždinske županije i kao takav je u cijelosti interesantan za istraživanje i korištenje) (Slika 5.).

Aktivnosti koje se provode za potrebe istraživanja geotermalnih voda u energetske svrhe identične su aktivnostima koje se provode za istraživanje ugljikovodika, a provode se na temelju važećeg propisa (Srpak, 2017). Treba naglasiti da eksploatacijska polja ugljikovodika, odnosno geotermalne vode iz koje se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe

Slika 6. Prikaz prostiranja strukturno-tektonskih jedinica s nosiocima geotermalne vode u Varaždinskoj županiji, (Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije, lipanj 2016. godine)



Tablica 6. Planirane površine za iskorištavanje energetskih mineralnih sirovina – Geotermalna voda iz koje se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe

Mineralna sirovina – energetska GEOTERMALNE VODE iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe			
R. br.	Lokacija	JLS	Obuhvat
1.	LUNJKOVEC-KUTNJAK	dijelovi područja Općine Mali Bukovec i Veliki Bukovec i Grada Ludbrega	obuhvaća prijedlog IP na području Varaždinske županije (ranije EP)
2.	MALI BUKOVEC	dijelovi područja Općina Mali Bukovec, Veliki Bukovec i Sveti Đurđ i Grada Ludbrega	obuhvaća prijedlog IP na području Varaždinske županije (raniji IP)

Izvor: Prostorni plan Varaždinske županije, („Službeni vjesnik Varaždinske županije“ br. br. 08/00., 29/06.,16/09. i 96/21.).

mogu se formirati samo unutar definiranih i odobrenih istražnih prostora, te svojom površnom mogu biti ista ili manja od istražnih prostora, a unutar jednog istražnog prostora može biti formirano više eksploatacijskih polja ugljikovodika, odnosno geotermalne vode iz koje se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe (Tablica 6).

4.3. Geotermalne vode za druge namjene (rekreacijske, turističke, lječilišne i dr.)

Geotermalne vode se koriste i za druge namjene (rekreacijske, turističke, lječilišne i dr.) na lokacijama izvorišta u Varaždinskim Toplicama (Grad Varaždinske Toplice) i Topličica (Grad Novi Marof). Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije na području Varaždinske županije navodi i postojanje izvora geotermalne vode u Podevčevu (Grad Novi Marof)

na istočnoj strani ceste Remetinec – Podevčevo i na Ivančici (lokacija Belec u Gradu Ivancu), no nema podataka koji bi ukazivali na značajnije istraživanje i korištenje geotermalne vode iz ovih izvora (Tablica 7).

Tablica 7. Izvorište/vrelo geotermalne vode

Mineralna sirovina – GEOTERMALNE VODE za ljekovite, turističke i rekreativne svrhe i druge namjene			
R. br.	Lokacija	JLS	Obuhvat
1.	VARAŽDINSKE TOPLICE	Grad Varaždinske Toplice	–
2.	TOPLIČICA	Grad Novi Marof	–
3.	PODEVČEVO	Grad Novi Marof	–
4.	BELEC	Grad Ivanec	–

Izvor: Prostorni plan Varaždinske županije, („Službeni vjesnik Varaždinske županije“ br. br. 08/00., 29/06.,16/09. i 96/21.).

5. Zaključak

Kao članica Europske unije, Republika Hrvatska je usmjerena na ispunjavanje direktiva koje propisuju integraciju obnovljivih izvora energije, povećanje energetske učinkovitosti te ostvarivanje energetske neovisnosti. U skladu sa strateškim ciljevima EU do 2030. godine, Republika Hrvatska se zalaže za smanjenje emisije stakleničkih plinova, povećanje udjela obnovljivih izvora energije te postizanje energetske učinkovitosti. Ova usklađenost pridonosi globalnim naporima zaštite okoliša. U dugoročnoj perspektivi, do 2050. godine, Republika Hrvatska teži znatnom smanjenju emisija stakleničkih plinova, čime doprinosi globalnim ciljevima održivog razvoja. Ovaj angažman ukazuje na stratešku viziju države u postizanju energetske tranzicije i smanjenju negativnog utjecaja na klimatske promjene. Implementacija navedenih ciljeva odražava predanost Republike Hrvatske prema znanstveno utemeljenim pristupima održivom energetskom razvoju. Treba naglasiti da revitalizacija i korištenje toplinske

energije iz napuštenih bušotina svakako je jedan od izvora koji mogu doprinijeti navedenim strateškim ciljevima. Istraživanje geotermalnih voda s potencijalom za akumulaciju toplinske energije u energetske svrhe, uključujući formiranje istražnih prostora, dopušteno je na području Varaždinske županije, sukladno identificiranom geotermalnom potencijalu utvrđenom Rudarsko-geološkom studijom Varaždinske županije. Unutar te studije, zone potencijala su određene prema strukturno-tektonskim jedinicama, pri čemu je ustanovljen ukupni geološki potencijal mineralnih sirovina hidrogeotermalnih ležišta visoke i niske entalpije na gotovo cijelom području Varaždinske županije. Taj potencijal čini područje zanimljivim za daljnje istraživanje i eksploataciju. Prema rezultatima istraživanja, u slučaju otkrića ugljikovodika ili geotermalne vode s potencijalom akumulacije toplinske energije za energetske upotrebu, moguće je, u skladu s Prostornim planom Varaždinske županije i odgovarajućim zakonskim propisima, utvrditi i formirati eksploatacijska polja za navedene resurse.

Literatura

1. Bassam, N. El., Maegaard, P., Schlichting, M. L. (2013). "Geothermal Energy". In Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, 2013, pp. 185–192.
2. Barbier, E. (1997). "Nature and technology of geothermal energy: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 1, no. 1–2. Elsevier Ltd, pp. 1–69, Mar. 01, doi: 10.1016/S1364-0321(97)00001-4.
3. Borović, S., Urumović, K. (2018). Geološke, hidrogeološke i geotermijske značajke izvorišta u Topuskom // 200 godina suvremenog lječilišta Topusko – Znanstveni skup „Na izvoru zdravlja“ – Programska knjižica sa sažetcima izlaganja / Mosler, Domagoj (ur.). Topusko: Lječilište Topusko, str. 14–15
4. 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.
5. Borović, S., Marković, I. (2015). "Utilization and tourism valorisation of geothermal waters in Croatia", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 44, pp. 52–63, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.022.
6. DiPippo R. (2005). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, 578
7. DiPippo R. (1999). *Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics*, str. 1–2. Mechanical Engineering Department, University of Massachusetts Dartmouth, North Dartmouth, Massachusetts.
8. Jelić, K. (1979). *Termičke osobine sedimentacionog kompleksa jugozapadnog dijela Panonskog bazena*. Doktorska disertacija Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
9. Jelić, K., Kevrić, I. & Krasić, O., (1995). *Temperatura i toplinski tok u tlu Hrvatske*. U: Vlahović, I., Velić, I. & Šparica, M. (ur.): 1. Hrvatski geološki kongres, 18. – 21. 10. 1995., Zbornik radova, 1, 245–249, Zagreb.
10. Grad M., Tiira T., ESC Working Group (2009). "The Moho depth map of the European Plate". *Geophys. J. Int.*, 176, 279–292, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03919.
11. Hurtig, E., Čermak, V., Haenel, R. & Zui, V. (1992). "Geothermal atlas of Europe", Working group, Geothermal atlas of Europe of the International Heat Flow Commission (Yugoslavia: Ravnik, D., Kolbah, S., Jelić, K., Milovanović, M., Miošić, N., Tomić, S., Rajver, D.; 102–105), Kartographischer Dienst Potsdam, Hermann Haack Verlagsgesellschaft mbH Gotha, Germany.
12. IEA i OECD, Renewables 2018 Analysis and Forecasts to 2023. International Energy Agency (IEA), Organisation for Economic Cooperation i Development (OECD). 2018.
13. Kurevija, T. Golub, M. (2008). „Iskorištavanje geotermijskih ležišta“, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

14. Kolbah S., Škrlec, M., Golub M. (2008). *Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala RH za proizvodnju električne energije*. Inženjerstvo okoliša, 5(1–2), 61–68.
15. Pavlović, D., Banovac, E. (2020). „*Natural gas as a geopolitical factor of energy transition*“. In Banovac, E. & Pudić, D. (Eds.) Zbornik radova 35. Međunarodnog znanstveno – stručnog susreta stručnjaka za plin (Proceedings of the 35th International Scientific & Expert Meeting of Gas Professionals).
16. Pavlović, D.; Banovac, E.; Vištica, N. (2018). „*Defining a composite index for measuring natural gas supply security – The Croatian gas market case*“. Energy Policy 114, 30–38
17. Prostorni plan Varaždinske županije, („Službeni vjesnik Varaždinske županije“ br. 08/00., 29/06., 16/09. i 96/21.).
18. Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2022.
19. Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije („Službeni vjesnik Varaždinske županije“ br. 29/16.)
20. Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu
21. Srpak, M., Pavlović, D. (2020). „*Mogućnosti i potencijal geotermalnih voda u funkciji gospodarskog razvoja Varaždinske županije*“. Nafta i Plin, 40(163–164), 58–70.
22. Srpak, M., Zeman, S., Sabol, G. (2019). „*Analiza i postojeće stanje izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije*“. Podravina, 18(35), 190–200.
23. Srpak, M. (2017). „*Ekološka održivost*“. Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec. Dostupno na: <https://www.mev.hr/wp-content/uploads/2018/02/Ekološka-održivost.pdf>
24. Srpak, M. (2022). „*Nova metodologija izračuna modela agregiranoga kompozitnoga indeksa za održivo gospodarenje mineralnim sirovinama na primjeru Varaždinske županije*“. Doktorski rad, Varaždin.
25. Škrlec, M., Živković, S., Kolbah, S., Tumara, D. (2019). „*Korištenje resursa geotermalne energije u Republici Hrvatskoj*“. Nafta i Plin, 39(159–160), 51–56.
26. Tumara, D., Pavlović, D. (2019). „*Geotermalna energija i njezin potencijal u vremenu energetske diversifikacije i tranzicije Republike Hrvatske*“. Nafta i Plin, 39(161. – 162.), 53–62.
27. Zakonom o rudarstvu (NN 56/13., 114/14., 98/19. i 83/23.)
28. Zakonom o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18., 52/19. i 30/21.)
29. Zakonom o vodama (NN 66/19., 84/21. i 47/23.)
30. Živković, S., Kolbah, S., Golub, M., Škrlec, M. (2015). „*Croatia Geothermal Resources Updates 2015 and On*“. Proceedings, World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
31. Živković, S., Kolbah, S., Škrlec, M., Tumara, D. (2019). „*Geothermal Energy Use, Country Update for Croatia 2019*“. European Geothermal Congress, Hague, Nizozemska.