Dekarbonizacija i geotermalna energija u kontekstu energetske tranzicije – studija slučaja „Lunjkovec – Kutnjak“

Decarbonization and geothermal energy in the context of energy transition – case study „Lunjkovec – Kutnjak“

Alen Požgaj, mag. geol., Bukotermal d.o.o.
izv. prof. dr. sc. Darko Pavlović, Plinacro d.o.o. Zagreb
Darko Marković univ. mag. ing. el., Općina Mali Bukovec

dr. sc. Melita Srpak
Zavod za prostorno planiranje Varaždin
e-mail: melita.srpak@gmail.com



Ključne riječi: energetska tranzicija, geotermalna energija, „Lunjkovec – Kutnjak“, opskrba toplinskom energijom, proizvodnja električne energije

Keywords: energy transition, geothermal energy, „Lunjkovec – Kutnjak“, heat energy supply, electricity production

Sažetak

Ulaskom Republike Hrvatske u Europsku uniju, definirani su specifični energetski ciljevi koji uključuju smanjenje emisija stakleničkih plinova i povećanje udjela obnovljivih izvora energije, što predstavlja imperativ suvremenih globalnih energetskih praksi. Ovaj rad fokusira se na analizu geotermalne energije kao perspektivnog obnovljivog izvora koji može ključno doprinijeti ostvarivanju tih ciljeva. Posebna pažnja posvećena je istraživanju i potencijalnom iskorištavanju geotermalnih resursa u istočnom dijelu Varaždinske županije, s naglaskom na Studiju slučaja „Lunjkovec – Kutnjak“. Cilj rada temelji se na integriranom multidisciplinarnom pristupu i znanstveno-stručnom istraživanju koji obuhvaća analizu geoloških, ekonomskih i ekoloških aspekata, pružajući tako dublje razumijevanje, koristi, izazova i potencijala ovog specifičnog geotermalnog projekta. U tom kontekstu, analiziran je i razvijen dinamički model koji odražava mogućnosti i ograničenja iskorištavanja geotermalne energije na lokaciji „Lunjkovec – Kutnjak“.

Svrha ovog rada je analizirati i procijeniti potencijal geotermalne energije kao obnovljivog resursa koji može značajno doprinijeti ciljevima dekarbonizacije i energetske tranzicije Republike Hrvatske. Istraživanje i eksploatacija geotermalnih voda u energetske svrhe (uključivo formiranje istražnih prostora i eksploatacijskih polja) dozvoljena je i na drugim prostorima Varaždinske županije temeljem i u skladu s geotermalnim potencijalom utvrđenim rudarsko-geološkom studijom Varaždinske županije, te uvjetima propisanim Prostornim planom Varaždinske županije, posebnim propisima i zahtjevima nadležnih javnopravnih tijela, odnosno rudarskim projektima. U kontekstu primjene, geotermalna energija sa lokacije studije slučaja „Lunjkovec – Kutnjak“ neće služiti samo za tradicionalnu proizvodnju električne energije, već ima širok spektar primjena od agrokulture i industrijske prerade do održivog turizma, demonstrirajući njezin integralni potencijal u prelasku prema održivijem energetskom modelu na razini lokalne zajednice.

Abstract

With the accession of the Republic of Croatia to the European Union, specific energy goals were defined, including the reduction of greenhouse gas emissions and the increase in the share of renewable energy sources, which represent an imperative of modern global energy practices. This paper focuses on analyzing geothermal energy as a promising renewable source that can significantly contribute to achieving these goals. Special attention is given to the exploration and potential utilization of geothermal resources in the eastern part of Varaždin County, with an emphasis on the case study „Lunjkovec – Kutnjak". The aim of the paper is based on an integrated multidisciplinary approach and scientific-professional research, which includes an analysis of geological, economic, and ecological aspects, thus providing a deeper understanding of the benefits, challenges, and potential of this specific geothermal project. In this context, a dynamic model was also analyzed and developed, reflecting the possibilities and limitations of utilizing geothermal energy at the „Lunjkovec – Kutnjak" site.

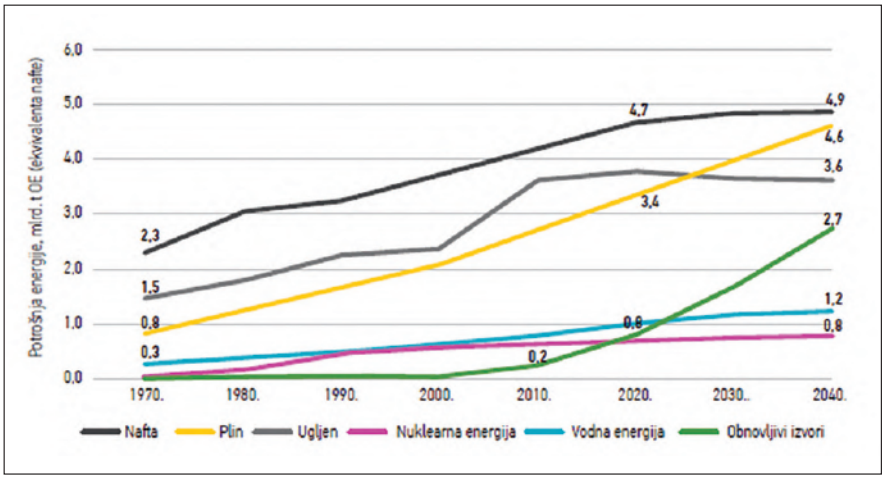
The purpose of this paper is to analyze and assess the potential of geothermal energy as a renewable resource that can significantly contribute to the decarbonization goals and energy transition of the Republic of Croatia. The exploration and exploitation of geothermal waters for energy purposes (including the formation of exploration areas and exploitation fields) is also permitted in other areas of Varaždin County based on and in accordance with the geothermal potential determined by the Mining-Geological Study of Varaždin County, as well as the conditions prescribed by the Spatial Plan of Varaždin County, specific regulations, and requirements of the competent public authorities, i.e., mining projects. In the context of application, geothermal energy from the case study location „Lunjkovec – Kutnjak" will not only be used for traditional electricity production but also has a wide range of applications from agriculture and industrial processing to sustainable tourism, demonstrating its integral potential in the transition towards a more sustainable energy model at the local community level.

1. Uvod

U suvremenom kontekstu globalnih izazova vezanih uz klimatske promjene i održivi razvoj, energetska tranzicija postaje ključna komponenta koja oblikuje međunarodne i nacionalne energetske politike. U svrhu ispunjenja energetskih ciljeva, razvoj obnovljivih izvora energije ima sve veće zahtjeve za prostorom, pri čemu njihovo korištenje često dolazi u sukob s tradicionalnim korištenjem prostora. Često količina energije koja se dobiva iz obnovljivih izvora ovisi o mnogim faktorima, uključujući dostupnost izvora, tehnološki napredak, ulaganja u infrastrukturu i potražnju za energijom.

Na Slici 1. vidi se da je potrošnja nafte u 50 godina porasla za 100%, plina u 50 godina za 300%, dok je potrošnja obnovljivih izvora u samo 20 godina porasla za 300%. Ova slika jasno ilustrira značajne promjene u globalnom energetskom miksu, s jasnim trendom prema čišćim izvorima energije u budućnosti. Navedene projekcije prikazane na grafu ukazuju na to da trenutni trendovi nažalost nisu dovoljni za ispunjavanje ciljeva Pariškog sporazuma i da su potrebne „agresivnije mjere" za smanjenje potrošnje fosilnih goriva i ubrzanje prijelaza na obnovljive izvore energije kako bi se postigli ciljevi ograničenja globalnog zagrijavanja. Obnovljivi izvori raznoliki su i njihov potencijal varira ovisno o regiji.

Energetski krugovi različitih zemalja sve više prepoznaju važnost provođenja tranzicije prema održi-



Slika 1. Potrošnja primarne energije po vrsti energenata u vremenskom horizontu 1970. – 2040. godine

Izvor: Pavlović i suradnici, Energetska tranzicija – vodikova paradigma, 2024.

vim energetskim sustavima kao ključnog faktora za postizanje dugoročne energetske stabilnosti i smanjenja globalnih emisija stakleničkih plinova. Tranzicija prema neutralnom energetskom sustavu[1] odnosi se na proces prelaska s tradicionalnih izvora energije, koji generiraju emisije stakleničkih plinova i doprinose globalnom zagrijavanju, na obnovljive i održive izvore energije koji ne proizvode neto emisije stakleničkih plinova. Cilj tranzicije jest postići klimatsku neutralnost ili nultu neto emisiju stakleničkih plinova. Geotermalna energija (obnovljivi izvor energije) ima jednu od vrlo važnih uloga u tranziciji prema neutralnom energetskom sustavu u Europskoj uniji (Kojaković, A. i dr., 2019a. i Kojaković, A. i dr., 2019b.)

Uspostavljanje i implementacija mjera za postizanje energetskih ciljeva često se odražava kroz formalizirane međunarodne instrumente kao što su direktive, protokoli i sporazumi. Ovi dokumenti služe kao okviri za koordinaciju i suradnju među državama, a njihov zajednički imperativ leži u promicanju strategija dekarbonizacije i težnji ka energetskoj neovisnosti. Potpisivanjem Pariškog sporazuma (u Parizu na 21. zasjedanju Konferencije stranaka (COP 21) Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama (UNFCCC)), vlade država su se obvezale na dugoročni cilj zadržavanja povećanja svjetske prosječne temperature na 2 ˚C ispod temperatura u predindustrijskom razdoblju. Naime, Pariški sporazum, koji je trenutno na snazi, postavlja hitne klimatske obveze za vlade kako bi se globalno povećanje temperature ograničilo na znatno ispod 2 °C u odnosu na predindustrijske razine, s ambicijom da se ograniči na 1,5 °C.

Prema Sporazuma, države su obvezne postići vrhunac u emisijama stakleničkih plinova što je prije moguće te osigurati ravnotežu između antropogenih emisija i uklanjanja tih plinova u drugoj polovici ovog stoljeća. U svjetlu rastuće svijesti o klimatskim promjenama i potrebi za smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima, Direktiva 2009/28/EC predstavlja ključni pravni instrument Europske unije (EU) koji artikulira strateške ciljeve u pogledu obnovljivih izvora energije (OIE). Ovaj dokument, donesen od strane Europskog parlamenta i Vijeća, postavlja precizne i mjerljive ciljeve s ciljem promicanja održive energetske budućnosti unutar EU. Kako bi se mogao mjeriti napredak i ostvarenje ciljeva, razvijeni su daljnji klimatski i energetski planovi do 2030. i 2050. godine. Strateški ciljevi do 2030. godine obvezuju EU na 40 postotno smanjenje ispusta stakleničkih plinova s obzirom na referentnu 1990. godinu te ostvarenje najmanje 27% energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji kao i povećanje energetske učinkovitosti u rasponu od 27 – 30% (Kojaković i dr., 2019.).

U kontekstu globalnih nastojanja za ublažavanjem klimatskih promjena, Republika Hrvatska se angažirala u sveobuhvatnom pristupu koji obuhvaća uporabu obnovljivih izvora energije, promicanje povećanja energetske učinkovitosti i osiguranje sigurnosti opskrbe energijom kako je definirano u Strategiji energetskog razvoja i Akcijskim planovima Republike Hrvatske u kojoj su kreirana su tri scenarija koji su različiti u pogledu smanjenja emisija stakleničkih plinova:

- *Scenarij 0* koji propagira politiku „*Bussines as usual*“ te zagovara razvoj strategije i ciljeva uz primjenu postojećih mjera u transformaciji energetskog sektora;
- *Scenarij 1* koji predstavlja scenarij užurbane energetske tranzicije na temelju međunarodne suradnje s ciljem dostizanja ciljeva Pariškog sporazuma u pogledu stvaranja puteva za široku primjenu obnovljivih izvora energije te posljednji;
- *Scenarij 2* koji predviđa umjereni tempo energetske tranzicije i identičan je Scenariju 1, ali s nižim očekivanim ciljevima i manje zahtjevnim investicijama. Geotermalna energija, koja koristi toplinsku energiju pohranjenu ispod površine Zemlje, ima značajan doprinos u ukupnom potencijalu obnovljivih izvora energije. Ovaj potencijal uključuje izgrađene i neizgrađene objekte i iznosi 56,5 – 67,6 MWe i 456 MWt na poznatim lokacijama.

Dodatno, procjenjuje se da bi istraživanje novih lokacija moglo donijeti dodatnih 100 MWe. Primjećuje se konstantan rast iskorištavanja geotermalne energije prema Scenariju 1 i Scenariju 2 do 2030. i 2050. godine. Ovi scenariji predstavljaju različite staze

1 Kada govorimo o „neutralnom energetskom sustavu“, prvenstveno se misli na sustav u kojem se emisije stakleničkih plinova uravnotežuju ili neutraliziraju različitim mehanizmima koji apsorbiraju ili uklanjaju te emisije iz atmosfere. Taj je koncept ključan u borbi protiv klimatskih promjena i postizanju cilja globalne klimatske neutralnosti. Primjerice, u radu „Analiza tehnologija održive energije za postizanje neutralnosti ugljika: perspektiva energetske tranzicije“ objavljenom u časopisu „Renewable and Sustainable Energy Reviews“ 2019. godine autor A. Johnson istražuje potencijal obnovljivih izvora, uključujući geotermalnu energiju u postizanju neutralnosti ugljika te navodi: „Obnovljivi izvori energije, kao što su geotermalna energija, Sunčeva energija i vjetroenergija imaju ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova i postizanju globalne klimatske neutralnosti.“

energetske tranzicije, s različitim brzinama implementacije i ciljevima smanjenja emisija. Za Panonski prostor su karakteristične povišene vrijednosti gustoće toplinskog toka, koje iznose oko 76 mW/m^2, i visoki geotermalni gradijent koji iznosi preko 4°C/100 m (Kurevija i dr., 2018.). Ove vrijednosti ukazuju na visoki geotermalni potencijal ovog područja, što ga čini idealnim za daljnje istraživanje i razvoj geotermalne energije. U kontekstu klimatskih promjena, iskorištavanje geotermalne energije može pružiti održivu alternativu fosilnim gorivima, smanjujući emisije stakleničkih plinova i pridonoseći globalnim naporima za ublažavanje klimatskih promjena.

Osim za elektroenergetski sektor, geotermalna energija može biti izrazito bitna za toplinarstvo i poljoprivredu. Geotermalni izvori koji zbog nižih temperatura nisu pogodni za proizvodnju električne energije mogu se koristiti za daljinsko grijanje i za niz drugih industrijskih i poljoprivrednih aktivnosti. Geotermalna energija predstavlja izuzetno važan i održiv izvor energije koji koristi prirodnu toplinu iz unutarnjih slojeva Zemlje kako bi se proizvela električna energija ili pružila toplinska energija za grijanje i hlađenje. Korištenje geotermalne energije u balneološke svrhe i grijanje prostora poznato je već tisućama godina, a početak proizvodnje električne energije iz geotermalne energije veže se uz 1913. godinu i malo talijansko mjesto Larderello[2].

Ova elektrana predstavlja ključan trenutak u povijesti geotermalne energije jer je bila među prvim primjerima korištenja geotermalnog resursa za proizvodnju električne energije na komercijalnoj razini i označila je važan korak u razvoju tehnologije geotermalne energije. Danas se geotermalna energija koristi diljem svijeta, ali još u prilično ograničenom obujmu, s obzirom na njezin potencijal i u usporedbi s drugim obnovljivim izvorima. Međutim, važno je napomenuti da će uspjeh ovih napora ovisiti o nizu tehničko-tehnoloških faktora, kao i faktorima koji uključuju političku volju, dostupnost financiranja i javnu podršku.

Zaključno, ova vrsta energije nudi pouzdanu i stabilnu alternativu fosilnim gorivima, čime se smanjuje energetska ovisnost i potiče energetska sigurnost a što može imati dalekosežne pozitivne učinke na energetski sektor i okoliš, pružajući stabilan i ekološki prihvatljiv izvor energije za budućnost. Republika Hrvatska se može s obzirom na geotermalni gradijent podijeliti na dva osnovna područja: Panonsko, koje karakteriziraju visoke vrijednosti gustoće toplinskog toka i visoki geotermalni gradijent i područje Dinarida karakterizirano s niskim vrijednostima. U području Panona te u središnjoj Hrvatskoj geotermalni gradijent iznosi preko 4 °C na 100 m, dok u Dinaridima doseže samo do 2,5 °C/100 m (Analiza prostornih kapaciteta i uvjeta za korištenje potencijala obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj, 2020). Svako od ovih područja ima svoje jedinstvene specifičnosti i karakteristike u pogledu geotermalnog gradijenta i potencijala. „Panonsko područje“, s obzirom na svoje izrazito visoke geotermalne gradijente, trenutno je najatraktivnije područje za razvoj geotermalnih projekata. Ovi „vrući“ Panonski prostori pružaju ne samo značajne resurse za korištenje geotermalne energije, već i potencijal za gospodarenje dubokim vodnim tijelima.

U kontekstu predmetnog područja, ključno je osvrnuti se na transgranični projekt pokrenut 2006. godine, koji je značajno pridonio razumijevanju i valorizaciji geotermalnih vodnih resursa Republike Hrvatske duž granice s Mađarskom (Kolbah, 2010.). Kroz taj projekt identificirane su dvije primarne vrste vodonosnika *krški vodonosnici* (nalaze se u rezervoarima s sekundarnim pukotinskim i kavernoznim šupljinama, dominirajući karbonatnom građom, karakterizirani su svojstvima tipičnim za krško područje) i *porozni vodonosnici* (smješteni su u konglomeratima, pješčenjacima i pijescima, s primarnom intergranularnom šupljikavošću, njihova struktura pruža jedinstvene mogućnosti za pristup geotermalnoj energiji) (Kolbah i dr., 2018.). Ova vodna tijela mogu pružiti održive izvore energije, smanjujući ovisnost o fosilnim gorivima i pridonoseći globalnim naporima za ublažavanje klimatskih promjena.

Geotermalna energija predstavlja važan resurs za Republiku Hrvatsku u kontekstu energetske tranzicije i borbe protiv klimatskih promjena. U konačnici, prepoznavanje i razumijevanje ovih geotermalnih područja i njihovih specifičnosti ključni su za daljnji razvoj geotermalne energije u Hrvatskoj, a posebno za integraciju trans-graničnih projekata koji mogu pružiti dodatne resurse i prilike za održivi razvoj. Varaždinska županija se ističe kao značajno područje

2 Godine 2023. obilježena je 110. godišnjica prve geotermalne elektrane u Larderellu u Italiji. Elektrana, koja je počela s radom 1913. godine, ima poseban značaj u povijesti geotermalne energije jer predstavlja jedan od prvih komercijalnih primjera njezinog korištenja za proizvodnju električne energije. Larderello, smješten u regiji Toskani, ima bogate geotermalne resurse i oduvijek je bio poznat kao područje s velikim geotermalnim potencijalom. Prva geotermalna elektrana u Larderellu označila je prekretnicu u korištenju geotermalne energije za proizvodnju električne energije i postavila temelje za daljnji razvoj tog obnovljivog izvora energije.

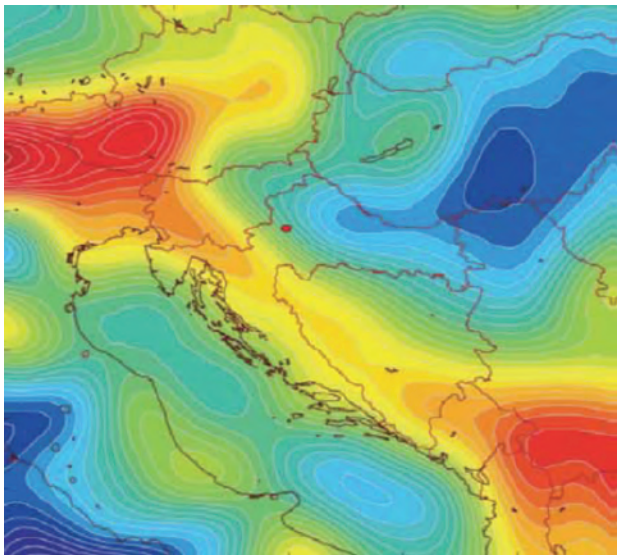
unutar Panonskog sektora, s obilježjima visokog geotermalnog gradijenta. Ovaj intenzivni geotermalni gradijent u kombinaciji s visokom gustoćom toplinskog toka čini Varaždinsku županiju izuzetno perspektivnom za potencijalne geotermalne aktivnosti i istraživanja. Razumijevanje ovakvih geotermalnih značajki ne samo da pruža dublji uvid u geološku strukturu Hrvatske, već postavlja temelje za razvoj održivih energetskih rješenja i strategija za budućnost (Kurevija i Gregurić, 2018.). Put ka razvoju održivih energetskih rješenja je složen, ali uz odgovarajući pristup i predanost, moguće je postići ravnotežu između rastuće potražnje za energijom i imperativa očuvanja okoliša.

2. Geološke karakteristike i potencijali Varaždinske županije

Varaždinska županija geološki pripada nekadašnjem Panonskom bazenu, bogatom sedimentnim naslagama poput klastita i vapnenaca oligocenske i miocenske starosti te trijaskih karbonata. Magmatske stijene iz mezozoika također su prisutne. Tektonska aktivnost značajno je oblikovala geološke strukture ovog područja, što se vidi kroz brojne rasjede koji presijecaju formacije. Ovi rasjedi omogućili su pojavu mineralnih i termalnih izvora s različitim sastavom i temperaturom, naglašavajući složenost geoloških procesa. Ovi termalni izvori ne samo da su geološki intrigantni, već imaju i značajnu ulogu u ekološkom i ekonomskom kontekstu Varaždinske županije. Geotermalni potencijal Hrvatske je značajan resurs povezan s debljinom kontinentalne kore i dubinom Mohorovičićevog diskontinuiteta (Slika 2). Prema istraživanjima Škrleca i dr. (2019.), dubina ovog diskontinuiteta u Hrvatskoj varira, osobito u Panonskoj nizini, gdje se procjenjuje na 25-30 km ispod površine (Grad i dr., 2009.; Hurtig i dr., 1992.).

Panonska nizina, rezultat složenih tektonskih procesa, ima jedinstvena geofizička svojstva i visoki geotermalni potencijal pojačan prisutnošću geotermalnih voda. Ove vode, zagrijane prirodnim geotermalnim gradijentom, mogu se koristiti za grijanje, hlađenje i proizvodnju električne energije. Geotermalni gradijent označava porast temperature s dubinom, dok gustoća toplinskog toka predstavlja količinu toplinske energije koja prolazi kroz određenu površinu.

Na području Dinarida geotermalni gradijent prosječno iznosi 0,018 °C/m što ne čini prosperitetni geotermalni potencijal. Za razliku od Dinarida, Panonski

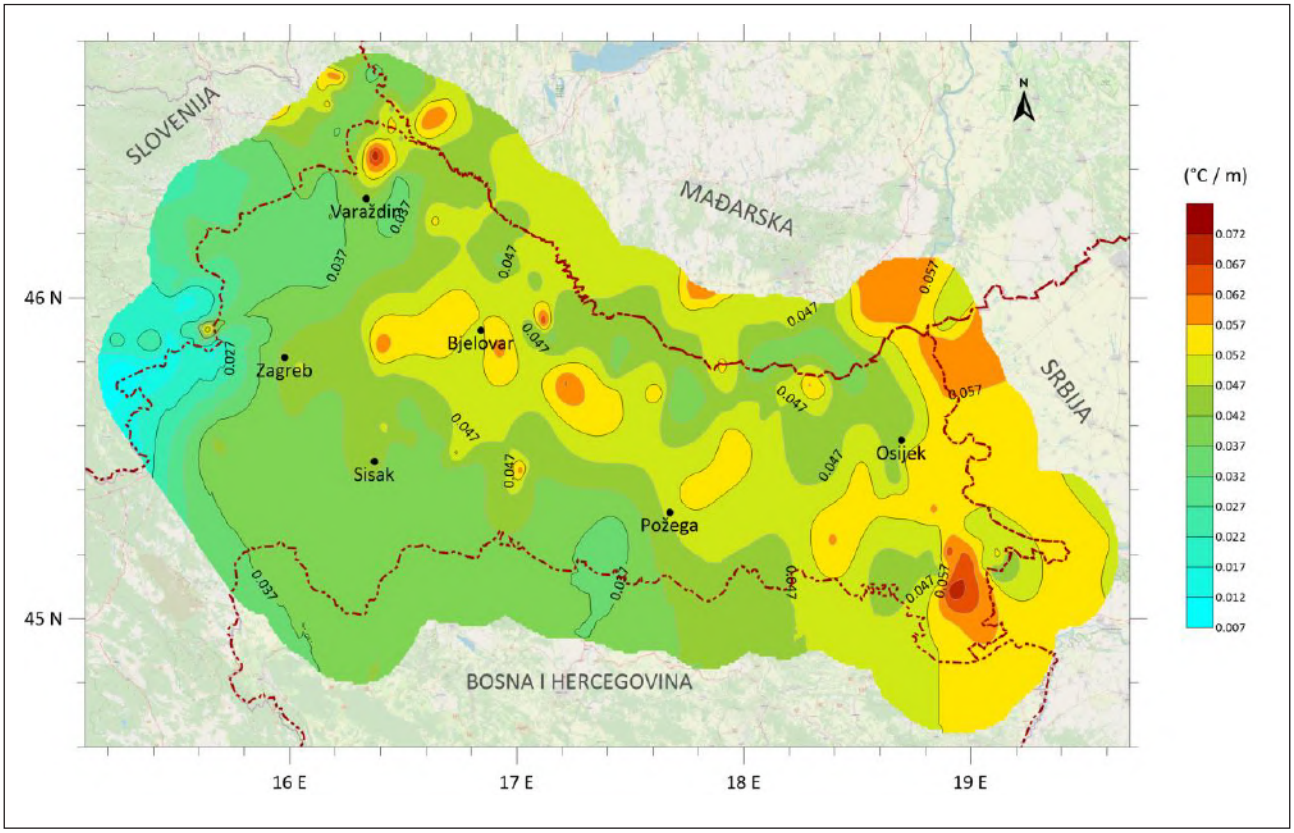


Slika 2. Karta dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta u jugoistočnoj Europi
Izvor: Hrvatski geološki institut, 2009.

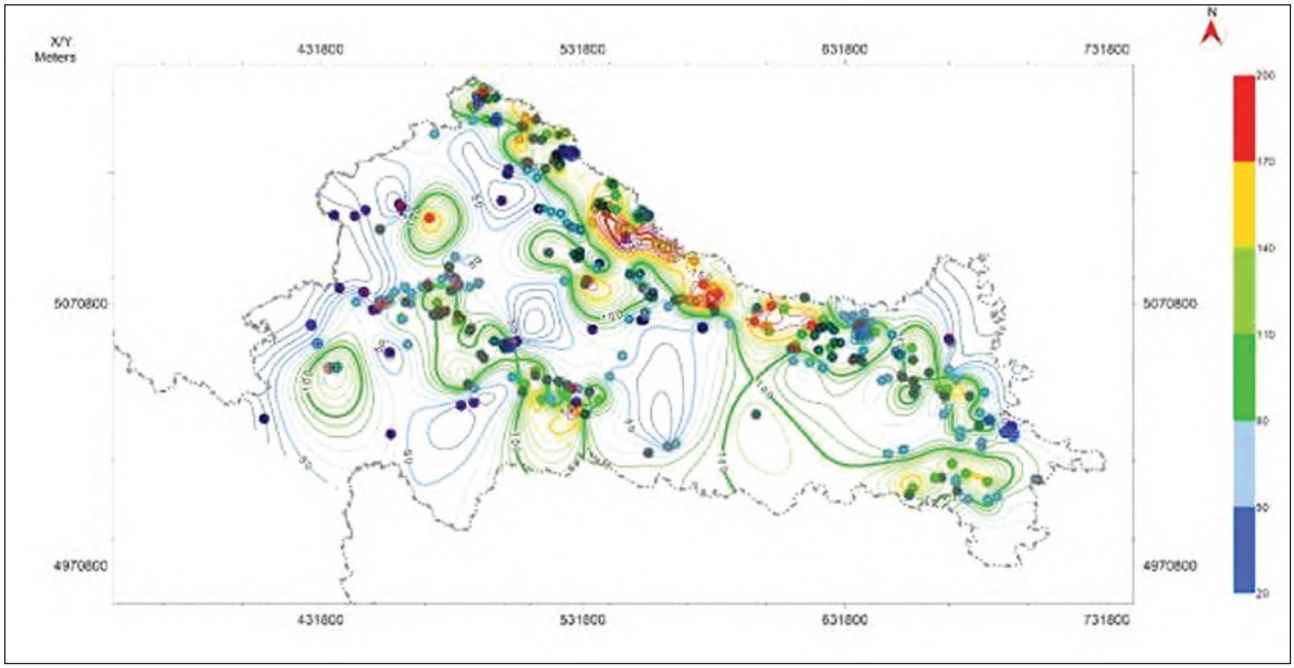
bazen ima prosječni geotermalni gradijent od 0,049 °C/m te stoga ima natprosječni geotermalni potencijal u Europi (Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2023.). Prva istraživanja geotermalnog potencijala na području Republike Hrvatske predstavio je Jelić (1979) pa je tako objavljena je prva karta geotermalnih gradijenata kao i procjena toplinskog toka. Istraživanje se temeljilo na podatcima prikupljenim tokom ili nakon izvođenja dubokih istražnih i proizvodnih bušotina na području Savske i Dravske depresije, dok je manji dio podataka bio povezan s rezultatima iz plitkih bušotina.

Geotermalni potencijal Republike Hrvatske prepoznat je kroz bušotine za istraživanje nafte i plina iz druge polovice 20. stoljeća, čiji podaci služe kao temelj za geotermalne projekte (Pavlović i Banovac, 2020.). Posljednjih desetljeća smanjenje istraživanja i proizvodnje ugljikovodika rezultiralo je napuštenim bušotinama, koje predstavljaju priliku za iskorištavanje geotermalne energije. Slika 3 prikazuje novu geotermalnu kartu Republike Hrvatske (predstavljena 2020. godine) koja je izrađena na temelju prikupljenih podataka iz 154 duboke istražne bušotine (Macenić, 2020.).

Takve bušotine mogu igrati ključnu ulogu u energetskoj tranziciji prema obnovljivim izvorima energije, budući da ih je moguće prilagoditi za geotermalne svrhe. Revitalizacija tih bušotina predstavlja inovativan i održiv pristup korištenju postojeće infrastrukture za proizvodnju čiste energije, usklađene s politikama Europske unije koje teže smanjenju uporabe fosilnih goriva, poboljšanju energetske učinkovitosti i



Slika 3. Nova karta geotermalnih gradijenata na području kontinentalne Hrvatske
Izvor: Macenić, 2020.



Slika 4. Karta maksimalnih temperatura izmjerenih na bušotinama
Izvor: Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2023.

postizanju održive i niskougljične budućnosti (Tuschl, 2024. i Macenić i dr., 2022.).

Republika Hrvatska je regija s visokim potencijalom za iskorištavanje geotermalne energije, čak 60% većim od europskog prosjeka, prema podacima iz dubokih istražnih bušotina u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Na temelju utvrđenih temperaturnih profila i detaljne analize bušotinskih podataka, identificirano je više od 70 lokaliteta unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena s značajnim geotermalnim potencijalom (Slika 4.). Ovi lokaliteti nude mogućnosti za različite primjene geotermalne energije, uključujući proizvodnju električne energije, grijanje i hlađenje, te poljoprivredu. Geotermalna energija ima široku primjenu, uključujući centralne toplinske sustave, balneologiju, poljoprivredu i industrijske procese. Centralni toplinski sustavi koriste geotermalnu energiju za grijanje i hlađenje zgrada, dok balneologija koristi geotermalne vode u terapeutske svrhe (Živković i dr. 2019.).

U poljoprivredi se geotermalna energija koristi za grijanje staklenika, sušenje usjeva i grijanje ribnjaka. Industrijski procesi koriste geotermalnu energiju za grijanje, hlađenje i generiranje pare. Korištenje geotermalnih karata ključan je za strategije održivog razvoja i diversifikacije energetskih izvora, pridonoseći energetskoj sigurnosti i smanjenju emisija stakleničkih plinova. Studija geotermalnog polja „Lunjkovec-Kutnjak“ pokazala je da duboka bušenja do 2000 metara otkrivaju vodene naslage s temperaturama do 140 °C. Ovi nalazi potvrđuju računalne modele i otvaraju značajne mogućnosti za geotermalnu eksploataciju, pružajući perspektive za korištenje geotermalne energije u raznim sektorima.

3. Gospodarsko korištenje geotermalne energije studija slučaja „Lunjkovec – Kutnjak“

Aktivnosti istraživanja geotermalnih voda za energetske svrhe slične su onima za istraživanje ugljikovodika i provode se prema važećim propisima (Srpak i dr. 2019.). Vlada Republike Hrvatske usvojila je 2006. godine stratešku inicijativu za „Program gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji „Lunjkovec – Kutnjak“ zamišljen kao pilot-model za buduću transformaciju korištenja geotermalnih resursa, posebno prenamjenu naftno-plinskih bušotina. Studija „Koncepcija i izvodljivost programa gospodarskog korištenja geotermalne energije na lokaciji „Lunjkovec – Kutnjak“ pružila je okvir za gospodarsku valorizaciju geotermalnih resursa, razmatrajući infrastrukturne i prostorne preduvjete, financiranje i pravni okvir projekta.

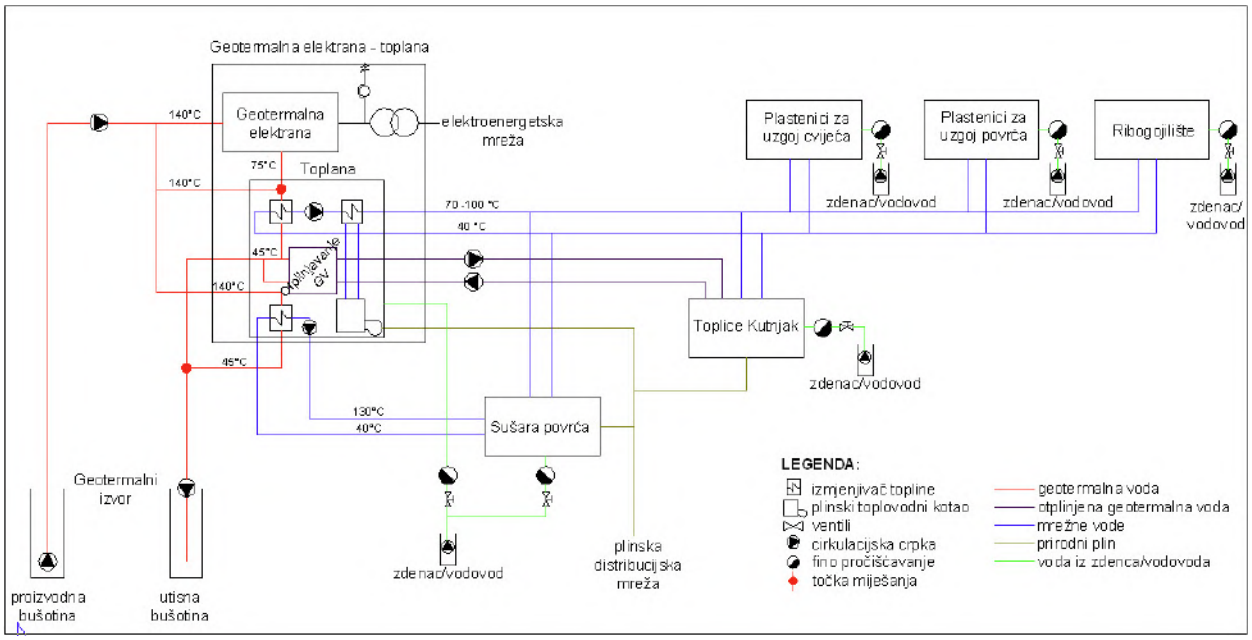
Stručnjaci iz INA-e procijenili su da geotermalno ležište predstavlja značajan izvor energije s dugoročnim i stabilnim iskorištavanjem, zahvaljujući konstantnim uvjetima temperature i tlaka (Tipurić i dr., 2006.). Tijekom istražnih radova koje je provodila kompanija INA – Naftaplin s ciljem otkrivanja ležišta ugljikovodika u sjeverozapadnom segmentu istražnog prostora Drave, identificirano je značajno geotermalno ležište poznato pod nazivom „Kutnjak – Lunjkovec“.

Ovo ležište je detaljno proučavano kroz tri ključne istražne bušotine: Kt-1, Kt-2 i Lun-1. Prema „Elaboratu o rezervama geotermalne vode u istražnom prostoru „Drava“ – Istražni lokalitet „Lunjkovec – Kutnjak“, analiza rezervi utvrdila je da ležište ima značajne rezerve geotermalne vode, kategorizirane kao C1 kategorija (Veselinović i dr., 2004. i 2005.). Dubina ključnog dijela ovog geotermalnog ležišta smještena je na dublje od 2000 metara ispod površine.

Detaljnije analize geotermalne vode iz ležišta otkrivaju temperaturu geotermalnog fluida veću od 140 °C, dok je tlak unutar ležišta zabilježen na visokih 217 bar, smanjujući se na 6 bar na ušću bušotine. Projekt iskorištavanja geotermalne energije na polju „Lunjkovec – Kutnjak“ dizajniran je kroz dvije faze, s fokusom na proizvodnoj bušotini Kt-1 i utisnoj bušotini Lun-1. Faze su temeljem hidrodinamičkih mjerenja osmišljene za precizno dimenzioniranje projekta. Optimalni dinamički tlak na ušću bušotine je 6 bar, čime se sprječava taloženje kamenca. Bušotina Kt-1 ima eruptivnu sposobnost od 4.600 m^3/dan geotermalne vode. Zbog nedostatne proizvodnje, planira se upotreba dubinske crpke.

Za I. fazu programa, koja uključuje izgradnju geotermalne elektrane i drugih objekata, potreban je stabilan protok od 70 l/s na ušću bušotine Kt-1 (6.000 m^3 dnevno). Geotermalna voda, nakon prolaska kroz elektranu i sušionicu, dostiže optimalnu temperaturu od 70 °C za daljnje aplikacije poput grijanja toplica, staklenika i ribogojilišta. Ulazna temperatura u svaki objekt gotovo je identična izlaznoj temperaturi prethodnog, omogućujući optimalno korištenje energije u rasponu od 70 °C do 35 °C.

Tehnološka shema za proizvodnju i distribuciju geotermalne energije, prikazana na Slici 5. (Tipurić i dr., 2006.) ključna je za održivu i efikasnu upotrebu geotermalnih resursa. Nakon uspješne implementacije I. faze, koja uključuje izgradnju geotermalne elektrane i



Slika 5. Tehnološka shema proizvodnje i distribucije transformiranih oblika geotermalne energije
Izvor: Tipurić i dr., 2006.

drugih objekata, planirana je II. faza s ciljem maksimiziranja iskorištavanja geotermalnog polja. Centralni cilj II. faze je postići protok od 300 l/s (25.900 m³ dnevno) geotermalne vode. To će se ostvariti bušenjem tri dodatne proizvodne bušotine s dubinskim crpkama i tri utisne bušotine za povrat vode u ležište. Ovaj sustav optimizira iskorištavanje ležišta, usmjeravajući bušotine prema najoptimalnijim dijelovima, uzimajući u obzir specifična svojstva svakog segmenta.

4. Hidrodinamičko ispitivanje bušotine geotermalne vode „Lunjkovec – Kutnjak“

Eksploatacijsko polje geotermalnih voda „Lunjkovec – Kutnjak“ obuhvaća površinu od 99,97 km², te se prostire na području Grada Ludbrega, Općina Mali i Veliki Bukovec (Varaždinska županija), Općina Legrad, Đelekovec, Koprivnički Ivanec i Rasinja (Koprivničko-križevačka županija) te Općine Donja Dubrava (Međimurska županija). Eksploatacijsko polje dodijeljeno je Bukotermalu d.o.o., temeljem Odluke o izdavanju dozvole za istraživanje geotermalnih voda, omogućujući izvođenje naftno-rudarskih radova u svrhu eksploatacije geotermalnih voda. Polje je prikladno za proizvodnju električne energije te za balneološke i druge svrhe (Srpak i Pavlović, 2020.).

Bušotina Lun-1 nalazi se u Općini Mali Bukovec oko 200 metara od najbližih stambenih objekata. Planirano uređenje radnog područja uključuje izgradnju ispitne jame na parceli 100/8 k.o. Lunjkovec za ubrizgavanje geotermalne vode iz bušotine Kt-1. Sve građevinske intervencije bit će u skladu s tehničkim normama za sigurnu mobilnost radnika, transport opreme i priključenje na infrastrukturnu mrežu. Prema Pravilniku o tehničkim normativima za istraživanje i eksploataciju nafte, zemnog plina te slojnih voda („Službeni list 43/79, 41/81, 15/82 i NN 53/91“), ušće bušotine pozicionirano je na bušotinskom radnom prostoru, 60 metara od pristupnog puta. Hidrodinamičkim mjerenjima analiziran je geotermalni potencijal ležišta, kvantificirane su količine geotermalne vode, te su određeni optimalni protoci za učinkovito vraćanje vode u ležište (Tablica 1.).

Bušotina Lunjkovec-1, prošla je detaljna DST (*drill-stem test*) ispitivanja na dubini od 2280 m do 2316 m, u slojevima mezozojskih karbonata. Analiza proizvedene vode pokazala je prisutnost ugljičnog dioksida i metana te nisku salinitet (5,2 g/l NaCl). Visoka propusnost kolektora i poroznost od 6 do 11% utvrđene su na temelju radioaktivne karotaže, dok je temperatura sloja procijenjena između 100 i 110 °C. Specifična mjerenja zabilježila su dnevni protok od 653 m³. Količina i kvaliteta geotermalne vode imaju značajan utjecaj na njenu primjenu i tehnologiju eksploatacije. Visoko mineralizirane geotermalne vode mogu zahtijevati posebne tretmane prije upotrebe u energetskim postrojenjima.

Tablica 1. Opći podaci o istražnoj bušotini Lunjkovec-1

Naziv bušotine	Lunjkovec-1
Skraćeni naziv bušotine	Lun-1
Godina izrade bušotine	1975.
Tip bušotine	Geotermalna bušotina
Istražni prostor	Lunjkovec-Kutnjak
Investitor	Bukotermal d.o.o., Mali Bukovec
Lokacija bušotine	Varaždinska županija, općina Mali Bukovec, naselje Lunjkovec
Koordinate ušća bušotine (HTRS96)	N = 5 122 299,58 m E = 517 596,51 m
Nadmorska visina	h NM = 141,28 m
Tip trajektorije bušotine	Vertikalna
Konačna dubina bušotine	2 201 m TVD GL
Prognozirana dubina krovine ležišta	1 730 m TVD GL
Litologija ležišta	Laporoviti vapnenci i dolomitne breče
Stratigrafska pripadnost	Trijas
Rezultati prijašnjih ispitivanja	Ispitivanjima je utvrđeno postojanje geotermalnog ležišta na dubini od 1 850 m, te je izmjeren statički tlak ležišta od 194,7 bar i temperatura ležišta 128 °C
Osnovni zadatak bušotine	Ispitati injektivnost pretpostavljenog ležišta geotermalne vode u mezozojskim karbonatima

Izvor: Idejni projekt geotermalne bušotine Lunjkovec-1 – Hidrodinamičko ispitivanje, 2021.

Tablica 2. Kakvoća geotermalne buštotine Kt-1 i Lun-1 EPG „Lunjkovec-Kutnjak“

Kemijska svojstva	Vrijednost Kt-1	Vrijednost Lun-1
Amonij (NF_4^+), mg/dm^3	6,134	5,8
Natrij (Na^+), mg/dm^3	3330	2334
Kalij (K^+), mg/dm^3	120	80
Magnezij (Mg^{+2}), mg/dm^3	13	10,6
Kalcij (Ca^{+2}), mg/dm^3	108	99
Stroncij (Sr^{+2}), mg/dm^3	10,6	3,2
Krom (ukupni)	0,070	-
Bakar (Cu^{2+})	0,083	-
Cink (Zn^{2+})	6,94	-
Mangan (Mn^{+2}), mg/dm^3	0,399	-
Nikal (Ni^{2+}),	0	-
Željezo (Fe^{+2}), mg/dm^3	12	-
Željezo (ukupno), mg/dm^3	13,8	230
Olovo (Pb^{2+})	0,090	-
Kadmij (Cd^{2+})	0,019	-
Klorid (Cl) mg/dm^3	82	3148
Nitrat (NO_3)	3,72	-
Nitrat (NO_2)	3,72	-
Jodid (I)	0,701	1,7
Bromid (Br) mg/dm^3	810,769	0
Hidrokarbonat (HCO_3^-), mg/dm^3	641,898	1912
Karbonat (CO_3^{-2}), mg/dm^3	0	0
Sulfat (SO_4^{-2}), mg/dm^3	194,687	228
Nedosicirana sili.kis (H_2SIO_3) mg/dm^3	48,96	-
Tvrdoća (ukupna)	18,16	-
Silicij – silicij dioksid (Si -SiO_2)	-	66

Izvor: Rješenje o utvrđivanju eksploatacijskog polja geotermalnih voda „Lunjkovec-Kutnjak“, MINGOR, 2023.

U sklopu Rješenja o utvrđivanju eksploatacijskog polja geotermalnih voda „Lunjkovec-Kutnjak“, analizirana je kakvoća bušotina Kt-1 i Lun-1. Podaci o kakvoći geotermalne vode prikazani su u Tablici 2.

5. Zaključak

Korištenje geotermalne energije ima brojne prednosti u kontekstu održivog energetskog razvoja, pri čemu se može ostvariti multiplikacijski učinak na hrvatsko gospodarstvo. Geotermalna energija, kao značajan obnovljivi izvor, ima potencijal značajno doprinijeti ostvarenju tih ciljeva, posebice u istočnom dijelu Varaždinske županije, gdje se provodi studija slučaja „Lunjkovec – Kutnjak“. Ovaj rad integrira geološke, ekonomske i ekološke aspekte kako bi istražio potencijal i izazove geotermalnog projekta. Razvijeni model pruža dublji uvid u mogućnosti i ograničenja geotermalne eksploatacije na toj lokaciji, uzimajući u obzir propise i uvjete specifične za Varaždinsku

županiju. Geotermalna energija pokazuje potencijal za raznolike primjene, od agrokulture do turizma, što naglašava njen integralni doprinos održivom razvoju lokalne zajednice.

Ovim radom želimo istaknuti važnost i potencijal geotermalne energije kao ključnog resursa u tranziciji prema održivijem energetskom modelu. U današnjem postmodernom dobu energetske tranzicije, u kojem se čovječanstvo neprestano suočava s izazovima u domeni energetske sigurnosti i pouzdanosti s jedne strane i s potrebom održivosti i nužnošću dekarbonizacije s druge strane, nedvojbeno je da i geotermalna energija uz vodik postaje nezaobilazni protagonist u areni energetskih transformacija i u tom kontekstu treba promatrati i sam Pariški sporazum koji postavlja globalne ciljeve za smanjenje emisija i promicanje održivih praksi poglavito obzirom na njegove obvezujuće ciljeve i poticaje za smanjenje emisija. S tim u svezi, neosporno je da geotermalni potencijal Republike Hrvatske kao sredstvo za povećanje vlastite proizvodnje energije iz obnovljivih izvora postaje resurs s iznimnom važnošću i nedvojbeno će odigrati značajnu ulogu u ostvarivanju energetske neovisnosti i osiguranju dostatnosti energetskih resursa za Republiku Hrvatsku. Tranzicija europskog, a samim time i hrvatskog energetskog sektora prema zelenoj budućnosti zahtijeva inovativne sudionike koji imaju hrabrosti i želju oblikovati nove poslovne modele, a samim time i inovativnu budućnost. U tom kontekstu, integracija vodikove paradigme kao i implementacija čistih tehnologija i ostvarivanje ciljeva energetske dekarbonizacije postaju ne samo željeni, već nužni koraci prema održivom razvoju smanjenju emisija stakleničkih plinova i postizanju održive energetske budućnosti.

Literatura

1. Grad M., Tiira T. (2009). The Moho depth map of the European Plate. *Geophys. J. Int*., 176, 279–292, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x.
2. Hurtig, E., Čermak, V., Haenel, R. & Zui, V. (1992). *Geothermal atlas of Europe,* Working group „Geothermal atlas of Europe" of the International Heath Flow Commission (Yugoslavia: Ravnik, D., Kolbah, S., Jelić, K., Milovanović, M., Miošić, N., Tomić, S., Rajver, D.; 102–105), Kartographusher Dienst Potsdam, Hermann Haack Verlagesgesellschaft mbH Gotha, Germany.
3. Kojaković, A. i dr. (2019a). *Analize i podloge za izradu Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatska*, Zelena Knjiga. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.
4. Kojaković, A. i dr. (2019b). *Analiza i podloge za izradu Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske*, Bijela Knjiga. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.
5. Kolbach, S., Škrlec, M., Golub, M. (2018). Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala Republike Hrvatske za proizvodnju električne energije. Inženjerstvo okoliša, Vol 5, No. 1–2. Zagreb.
6. Kolbah S (2010). *Deep Transboundary Water-Bodies: Exploration & Management in the Pannonian Basin of the Republic of Croatia*, ISARM2010 International Conference, 6 – 8 December 2010, Paris.
7. Kolbah, S., Škrlec, M., Golub, M. (2018). Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala rh za proizvodnju električne energije, *Inženjerstvo okoliša*, Vol.5, No.1–2 61–68.
8. Macenić, M. (2020). „Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske", Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
9. Macenić, M., Kurevija, T., Herbst, T. (2022). Eksploatacija geotermalne energije revitalizacijom privremeno napuštenih bušotina, *Nafta i Plin*, 41. (170. – 171.), str. 89–96.
10. Kurevija, T., Gregurić, M. (2008). Eksergetska snaga binarnog rankine ciklusa na geotermalnom ležištu Kutnjak-Lunjkovec, *Goriva i maziva*, 47, 1: 6–33.
11. Pravilnik o tehničkim normativima za istraživanje i eksploataciju nafte, zemnog plina te slojnih voda („Službeni list 43/79, 41/81, 15/82 i NN 53/91).
12. Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine, 2023.
13. Pavlović, D., Banovac, E., Vištica, N. (2010). Defining a composite index for measuring natural gas supply security – The Croatian gas market case. *Energy Policy* 114, 30–38.

14. Pavlović, D.; Srpak, M.; Klopotan, I. (2024). „*Energetska tranzicija – vodikova paradigma*“, Čakovec: Međimursko veleučilište u Čakovcu.
15. Srpak, M., Pavlović, D. (2020). „Mogućnosti i potencijal geotermalnih voda u funkciji gospodarskog razvoja Varaždinske županije“. *Nafta i Plin*, 40(163- 164), 58–70.
16. Srpak, M., Zeman, S., Sabol, G. (2019). „Analiza i postojeće stanje izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije“. *Podravina*, 18 (35), 190–200.
17. Srpak, M. (2022). „Nova metodologija izračuna modela agregiranoga kompozitnoga indeksa za održivo gospodarenje mineralnim sirovinama na primjeru Varaždinske županije.“ Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.
18. Škrlec, M., Živković, S., Kolbah, S., Tumara, D. (2019). „Korištenje resursa geotermalne energije u Republici Hrvatskoj“. *Nafta i Plin*, 39 (159–160), 51–56.
19. Tipurić, D. i dr. (2006). *Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak*. Zagreb: Ekonomski fakultet.
20. Tuschl, M. (2024). The model of heat potential from geothermal reservoirs and aquifers of oil and gas fields on the territory of the Republic of Croatia. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
21. Veselinović, M., Đureković, M., Žugec-Kulić, N., Krpan, M., Dadić, J., Jelić Balta, J., Kolbah, S. (2004). *Geološko fizikalna studija geotermalnog polja Lunjkovec – Kutnjak*. Zagreb, INA, Sektor za razradu.
22. Veselinović, M., Đureković, M., Žugec, N., Krpan, M., Dadić, J., Domitrović, D., Rajič, P., Vučemilović, M., Lukić, Ž. (2005). *Elaborat o rezervama geotermalne vode u istražnom prostoru „Drava“ – Istražni lokalitet Lunjkovec – Kutnjak* Zagreb, INA, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina.