

# Metoda za analizu potencijala solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora na temelju kriterija iskorištenosti i namjene zemljišta

---

Zahatek, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:973629>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported](#)/[Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Dario Zahatek

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

izv.prof.dr.sc Tomislav Pukšec

Student:

Dario Zahatek

Zagreb, rujan 2024.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se izvanrednom profesoru Tomislavu Pukšecu što mi je pružio priliku da pišem ovaj rad pod njegovim mentorstvom. Veliko hvala asistentu Josipu Miškiću na dragocjenim savjetima, strpljenju i izdvojenom vremenu tijekom izrade ovog rada.*

*Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci kroz studij. Njihova prisutnost i ohrabrenje učinili su ovaj put mnogo lakšim i ugodnijim*

*Hvala i svim mojim prijateljima koji su bili uz mene kroz studij. Njihova podrška, prisutnost i zajednički trenutci bili su neprocjenjivi tijekom ovog putovanja.*

*Dario Zahatek*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dario Zahatek** JMBAG: **0195037861**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Metoda za analizu potencijala solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora na temelju kriterija iskorištenosti i namjene zemljišta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Method for analysing the potential of solar collectors and shallow geothermal sources based on land use criteria**

Opis zadatka:

U rujnu 2023. godine, Europska unija je usvojila reviziju Direktive o energetske učinkovitosti, postavljajući još ambicioznije ciljeve dekarbonizacije centraliziranih toplinskih sustava (CTS-a). Kako mnogi CTS-i trenutno ne ispunjavaju spomenute ciljeve, potrebno je djelovati i istražiti potencijal integracije obnovljivih izvora energije. Cilj ovog rada je provesti tehno-ekonomsku analizu tranzicije centraliziranog toplinskog sustava baziranog na fosilnim gorivima prema sustavu koji se oslanja na obnovljive izvore energije, koristeći Grad Karlovac kao studiju slučaja. Kroz rad je potrebno razviti metodu za analizu potencijala solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora na temelju kriterija iskorištenosti i namjene zemljišta.

U sklopu rada potrebno je:

1. Napraviti pregled literature na temu korištenja solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora u centraliziranim toplinskim sustavima;
2. Opisati potencijal solarne energije te plitkih geotermalnih izvora u Republici Hrvatskoj s naglaskom na područje studije slučaja;
3. Izraditi geoinformacijsku kartu (GIS) Karlovca koja će sadržavati podatke o mogućim lokacijama solarnih kolektora te plitkih geotermalnih izvora, temeljem kriterija iskorištenosti i namjene zemljišta;
4. Predložiti tehnička rješenja integracije solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora u CTS;
5. Izraditi tehno-ekonomsku analizu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Korištenje solarnih kolektora u centraliziranim toplinskim sustavima.....	1
1.2. Korištenje plitkih geotermalnih izvora u centraliziranim toplinskim sustavima.....	5
1.3. Solarni potencijal u Republici Hrvatskoj i u gradu Karlovcu.....	7
1.4. Geotermalni potencijal Republike Hrvatske.....	9
2. METODA.....	12
2.1. Centralizirani toplinski sustav grada Karlovca.....	12
2.2. Prostorna analiza površina zemljišta za instalaciju solarnih kolektora.....	13
2.3. Tehno-ekonomska analiza.....	18
2.3.1. Tehno-ekonomska analiza za plitku geotermalnu bušotinu.....	18
2.3.2. Tehno-ekonomska analiza za solarne kolektore.....	22
3. REZULTATI.....	24
3.1. Rezultati prostorne analize.....	24
3.2. Rezultati tehno-ekonomske analize za plitku geotermalnu bušotinu.....	28
3.3. Rezultati tehno-ekonomske analize za solarne kolektore.....	30
4. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Povijesni razvoj broja instaliranih solarnih sustava grijanja u CTS-u [5].....	4
Slika 2. Koncepti mogućnosti integracije solarnih sustava u CTS [9].....	5
Slika 3. Broj geotermalnih CTS-a u funkciji i u raznim fazama nadogradnje, razvoja ili planiranja u Europskim državama [13].....	6
Slika 4. Grafički prikaz rada geotermalne dizalice topline [11].....	7
Slika 5. Količina sunčeve energije u kWh/m <sup>2</sup> za Republiku Hrvatsku [15].....	8
Slika 6. Godišnja ozračenost u kWh/m <sup>2</sup> Karlovačke županije [16].....	9
Slika 7. Geotermalni gradijent Republike Hrvatske [17].....	10
Slika 8. Centralizirani toplinski sustav grada Karlovca.....	12
Slika 9. Administrativne granice grada Karlovca.....	14
Slika 10. Prikaz rezultantnog sloja unutar QGIS-a.....	16
Slika 11. Moguće lokacije instalacije solarnih kolektora u gradu Karlovcu.....	24
Slika 12. Potencijal godišnje proizvodnje toplinske energije pojedinog zemljišta.....	25
Slika 13. Pozicija geotermalne elektrane u odnosu na gradsku toplanu i površina solarnih kolektora.....	27
Slika 14. grafički prikaz rezultata prostorne analize.....	27
Slika 15. Analiza osjetljivosti s obzirom na promjenu investicijskog troška.....	29
Slika 16. Analiza osjetljivosti s obzirom na promjenu u cijeni toplinske energije.....	29
Slika 17. Prikaz analize osjetljivosti obzirom na promjenu investicijskog troška.....	31
Slika 18. Prikaz analize osjetljivosti s obzirom na promjene cijene prirodnog plina.....	31
Slika 19. Ovisnost LCOH o udaljenosti zemljišta od gradske toplane.....	32

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Važeće cijene toplinske energije za CTS Karlovac [26].....	19
Tablica 2. Podaci o cijeni prijenosa daljinskog grijanja geotermalnog CTS-a [28].....	20
Tablica 3. vrste troškova za jedno postrojenje solarnih kolektora.....	23
Tablica 4. Iznosi tarifnih stavki za javnu uslugu opskrbe plinom [31].....	23
Tablica 5. Pripadajuća atributna tablica konačnog vektorskog sloja.....	25
Tablica 6. Statistički podaci o godišnjoj proizvodnji toplinske energije iz solarnih kolektora.....	26
Tablica 7. Rezultati tehno – ekonomske analize za plitku geotermalnu bušotinu.....	28
Tablica 8. Rezultati tehno-ekonomske analize za implementaciju solarnog polja označenog kao zemljište 1.....	30
Tablica 9. Rezultati tehno-ekonomske analize za preostala solarna polja.....	32



---

## POPIS OZNAKA

CO<sub>2</sub> - ugljikov dioksid

CTS – centralizirani toplinski sustav

COP – toplinski učin

BHE - bušotinski izmjenjivač topline

CLC - Corine Land Cover

GSA - Global Solar Atlas

DN – nazivni promjer cijevi [mm]

IRR – Unutarnja stopa povrata [%]

NPV – Neto sadašnja vrijednost [€]

LCOH - trošak po jedinici proizvedene toplinske energije [€/MWh]

QGIS - Quantum Geographic Information System

PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System

Tpolaz – Temperatura polaza [°C]

Tpovrat – Temperatura povrata [°C]

d - diskontna stopa

n - životni vijek postrojenja

MW – mjerna jedinica za snagu postrojenja

MWh – mjerna jedinica potrošnja toplinske energije

## SAŽETAK

Centralizirani toplinski sustavi imaju ključnu ulogu u energetskej tranziciji, posebice u smanjenju emisija stakleničkih plinova i povećanju energetske učinkovitosti. Tema ovog završnog rada je analiza potencijala solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora unutar centraliziranog toplinskog sustava grada Karlovca.

Za prostornu analizu korišten je softver QGIS, koji je omogućio preciznu identifikaciju zemljišta pogodnih za instalaciju solarnih kolektora. Na temelju kriterija iskorištenosti zemljišta i procijenjenog potencijala godišnje proizvodnje toplinske energije, odabrana su optimalna mjesta za implementaciju solarnih polja unutar Karlovca. Također, odabrana je i plitka geotermalna bušotina na lokaciji s prethodno utvrđenim geotermalnim potencijalom, što omogućuje održivo korištenje plitkog geotermalnog izvora za potrebe toplinskog sustava.

Provedena je tehno-ekonomska analiza za devet solarnih polja i jednu geotermalnu bušotinu. U analizi su korišteni pokazatelji kao što su unutarnja stopa povrata (IRR), neto sadašnja vrijednost (NPV) i trošak proizvedene toplinske energije (LCOH), kako bi se procijenila isplativost implementacije solarnih kolektora i geotermalne bušotine u CTS grada Karlovca.

Na kraju rada provedena je analiza osjetljivosti, u kojoj su analizirane promjene parametara poput cijene plina, prodajne cijene toplinske energije te investicijskih troškova, čime je pružen uvid u ekonomsku isplativost rojekata u različitim tržišnim uvjetima.

**Ključne riječi:** centralizirani toplinski sustav, solarni kolektori, plitki geotermalni izvori, prostorna analiza, tehno-ekonomska analiza

**SUMMARY**

District heating systems play a crucial role in the energy transition, particularly in reducing greenhouse gas emissions and increasing energy efficiency. This thesis focuses on analyzing the potential of solar collectors and shallow geothermal sources within the district heating system of the City of Karlovac.

The study began with a spatial analysis using open -source software QGIS to identify optimal locations for solar collectors and shallow geothermal wells. This analysis aimed to maximize land utilization and the potential for annual thermal energy production. The chosen shallow geothermal well was situated where geothermal potential had already been established.

Following the spatial analysis, a techno-economic analysis was conducted for nine selected solar fields and one shallow geothermal well. This analysis assessed the integration of these energy sources into the city's district heating system, evaluating their viability and efficiency using financial indicators such as IRR (Internal Rate of Return), NPV (Net Present Value), and LCOH (Levelized Cost of Heat).

Finally, a sensitivity analysis was carried out to examine the effects of variations in gas prices, thermal energy prices, and investment costs on the overall feasibility of the district heating projects.

**Key words:** district heating systems, solar collectors, shallow geothermal source, spatial analysis, techno – economic analysis

## 1. UVOD

Klimatske promjene uzrokovane emisijama stakleničkih plinova, posebno ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>), kao i povećanom potrošnjom energije, predstavljaju značajan problem na globalnoj razini od početka industrijalizacije. Znanstvena istraživanja potvrđuju da je ljudska aktivnost glavni faktor koji doprinosi ovim promjenama. Klimatske promjene i globalni naponi za smanjenje emisija stakleničkih plinova postavili su energetske sustave u središte transformacija prema održivoj budućnosti. Energetski sustavi čine osnovu moderne infrastrukture, obuhvaćajući proizvodnju, distribuciju i potrošnju energije, a njihova prilagodba novim uvjetima ključna je za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i postizanje ciljeva dekarbonizacije.

U tom kontekstu, integracija obnovljivih izvora energije unutar postojećih energetske sustava predstavlja važan korak. Solarni kolektori i plitki geotermalni izvori sve više dobivaju na značaju, osobito u centraliziranim toplinskim sustavima (CTS), gdje doprinose smanjenju emisija i povećanju energetske učinkovitosti.

Pariški sporazum iz 2015. godine, kojeg su potpisale 195 zemalja, postavlja ambiciozan cilj postizanja ugljične neutralnosti do 2050. godine [1]. Ovaj međunarodni sporazum naglašava potrebu za zamjenom fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije, uključujući solarne i geotermalne tehnologije, kao važne čimbenike u smanjenju emisija stakleničkih plinova.

Istovremeno, napredak u tehnologijama i razvoj tržišnih mehanizama doprinose smanjenju troškova povezanim s primjenom obnovljivih izvora energije, čime se povećava njihova dostupnost i prihvaćenost među kućanstvima i širom zajednicom. Ove promjene omogućavaju širu implementaciju solarnih kolektora i plitkih geotermalnih sustava, olakšavajući njihovu integraciju u svakodnevnu uporabu.

Solarni kolektori i plitki geotermalni izvori, kao dvije glavne tehnologije unutar obnovljivih izvora energije, igraju važnu ulogu u centraliziranim toplinskim sustavima, osobito u urbanim sredinama. Njihova primjena omogućava gradovima poput Karlovca da povećaju energetske učinkovitost, smanje troškove grijanja i doprinesu smanjenju emisija stakleničkih plinova.

### 1.1. Korištenje solarnih kolektora u centraliziranim toplinskim sustavima

Solarni kolektori predstavljaju tehnologiju koja koristi sunčevu energiju za proizvodnju topline. Njihova primjena u centraliziranim toplinskim sustavima omogućuje smanjenje upotrebe fosilnih goriva, ali izazovi u pogledu promjenjivosti proizvodnje topline i potrebe za

akumulacijom predstavljaju ključne aspekte istraživanja. Fluktuacije u proizvodnji topline tijekom dana i godine zahtijevaju strateško planiranje i optimizaciju broja instaliranih kolektora te sustava akumulacije kako bi se izbjeglo pregrijavanje sustava i smanjenje njegove učinkovitosti. Prema istraživanju [2], niskotemperaturni sustavi centraliziranog grijanja su posebno pogodni za integraciju solarnih kolektora, jer omogućuju efikasno korištenje solarne energije uz manju potrebu za dodatnim energentima.

Postoji nekoliko vrsta solarnih kolektora, uključujući kolektore pločastih i vakuumskih cijevi, koji se razlikuju u svojoj učinkovitosti i primjeni. Pločasti kolektori koriste tamnu ploču za apsorpciju sunčeve energije i prenose je na tekućinu koja cirkulira kroz cijevi. Oni su najčešće korišteni zbog svoje jednostavnosti i relativno niske cijene. Vakuumski kolektori koriste vakuum unutar cijevi za minimiziranje gubitaka topline. Oni su učinkovitiji u hladnijim klimatskim uvjetima, ali su skuplji i složeniji za instalaciju [3]. Oba solarna sustava za grijanje - pločasti kolektori i vakuumske cijevi, pokazali su maksimalan solarni toplinski učinak pri niskim temperaturama u mreži centraliziranog grijanja. Spomenute činjenice pokazuju da je niskotemperaturno centralizirano grijanje najperspektivniji razvojni koncept za širu integraciju aktivnih potrošača (eng. *prosumer*) uz razvoj toplinskih spremnika visokih kapaciteta.

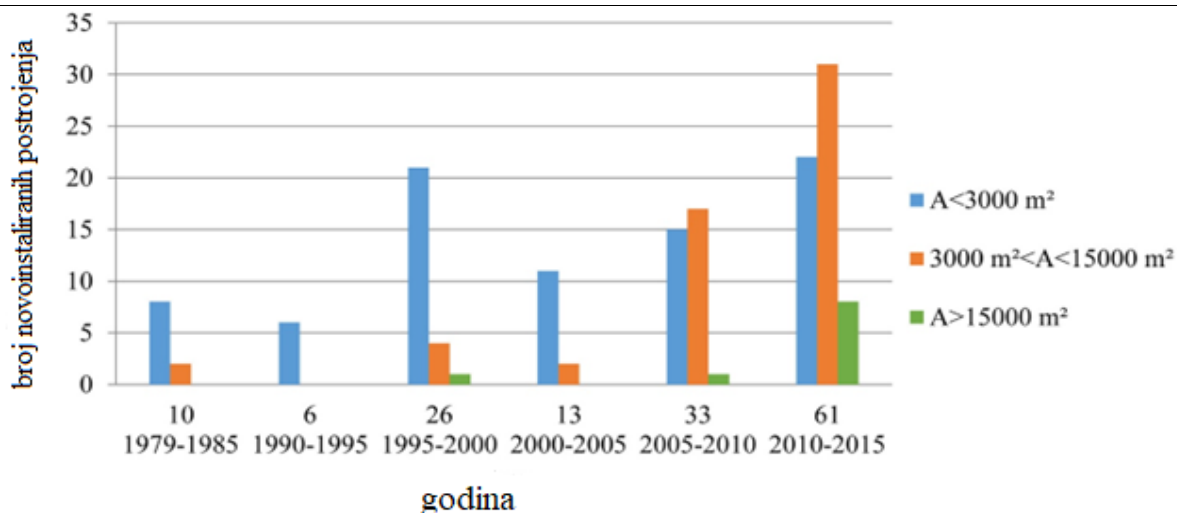
Troškovi instalacije solarnih kolektora, uključujući cijenu opreme i instalacije, mogu biti visoki. Međutim, dugoročne uštede na energiji i smanjenje operativnih troškova mogu nadoknaditi početne troškove. Istraživanje [4] pokazuje da financijski modeli koji uključuju subvencije i poticaje za instalaciju solarnih kolektora mogu značajno poboljšati ekonomsku održivost ovih sustava.

Zajedničko svim vrstama mreža centraliziranog grijanja je to što zahtijevaju način prijenosa topline između distribucijske mreže i korisnika. Toplinske podstanice (hidraulički ekvivalenti električnih transformatora u elektroenergetskim mrežama) sadrže izmjenjivače topline i druge hidrauličke komponente koje se koriste za izoliranje korisnika od mreže distribucije topline. Na taj način se toplina može transformirati s višeg energetskeg nivoa na niži nivo. Učinkovitost prijenosa topline ovisi o dizajnu podstanice kao i o razlici između temperatura isporuke i povratka ( $\Delta T$ ).

Moderna tehnologija podstanica dizajnirana je za godišnje temperature isporuke/povratka od 69 °C/34 °C ( $\Delta T = 35$  °C), a moderni centralizirani sustavi grijanja su trenutno sposobni raditi unutar +5 °C tih temperatura [5]. Temperature rada toplinskih mreža obično su dio nacionalnih propisa i smjernica za dizajn i stoga mogu varirati od zemlje do zemlje.

Zbog iscrpljivanja prirodnih resursa, zaštite okoliša, energetske sigurnosti i dugoročne ekonomije, mnoge vlade postavile su ciljeve za povećanje doprinosa obnovljivih izvora energije nacionalnoj potražnji. U Europi, grijanje prostorija i potrošna topla voda čine približno 80% energetske potrebe stambenih zgrada. Budući da su temperature potrebne za ove svrhe relativno niske, postoji ogroman potencijal u iskorištavanju solarne energije kroz solarne kolektore. Tehnologija solarne topline raširena je u sektoru obiteljskih kuća, dok su veće instalacije za centralizirani toplinaki sustav još uvijek rijetke, osim u nekoliko zemalja. Njemačka je predvodnik u korištenju solarnih kolektora u centraliziranim toplinskim sustavima. Na primjer, u Berlinu je instaliran veliki sustav solarnih kolektora na krovu gradske bolnice Charité [6]. Ovaj sustav smanjuje potrošnju fosilnih goriva za grijanje vode i prostorija, a također smanjuje emisije CO<sub>2</sub>. U Švedskoj, projekt "Solar City" u Malmöu demonstrira integraciju solarnih kolektora u velike sustave za grijanje. Ovaj projekt uključuje nekoliko stambenih i komercijalnih zgrada koje koriste solarne kolektore za grijanje vode i prostora [7]. Instalirani sustavi mogu pokriti do 30% godišnje potrebe za energijom tih objekata. Španjolska, s visokom sunčanom energijom, ima nekoliko velikih instalacija solarnih kolektora. U Sevilji, Solarni Termalni Centar "PS10" koristi solarne kolektore za proizvodnju topline koja se koristi u industrijskim procesima i grijanju zgrada [8].

Trenutno, veliki sustavi solarnih kolektora (>350 kWth) predstavljaju otprilike 1% tržišta. Ipak, povećanje veličine instalacije može biti korisno, budući da to obično dovodi do poboljšanja energetske učinkovitosti i smanjenja troškova investicije po jedinici površine. Ključnu ulogu za uspješnu integraciju solarne topline s centraliziranim sustavom igraju operativne temperature centraliziranog toplinskog sustava. I temperatura isporuke i temperatura povratka trebale bi biti što niže kako bi solarni kolektori radili s većom učinkovitošću i kako bi se smanjili gubici topline iz toplinske mreže. Na Sliku 1. prikazan je povijesni razvoj broja instaliranih solarnih sustava grijanja za primjenu u sustavima centraliziranog grijanja. Trenutno u Europi postoji približno 5000 CTS sustava koji opskrbljuju 10% ukupne potražnje za toplinom, ali samo oko 150 sustava solarne topline za centralizirano grijanje, od kojih većina ima solarni udio manji od 20% [9]. Europska unija postavila je cilj od 1% solarne udjela u CTS-u do 2020. godine i 5% do 2050. godine.

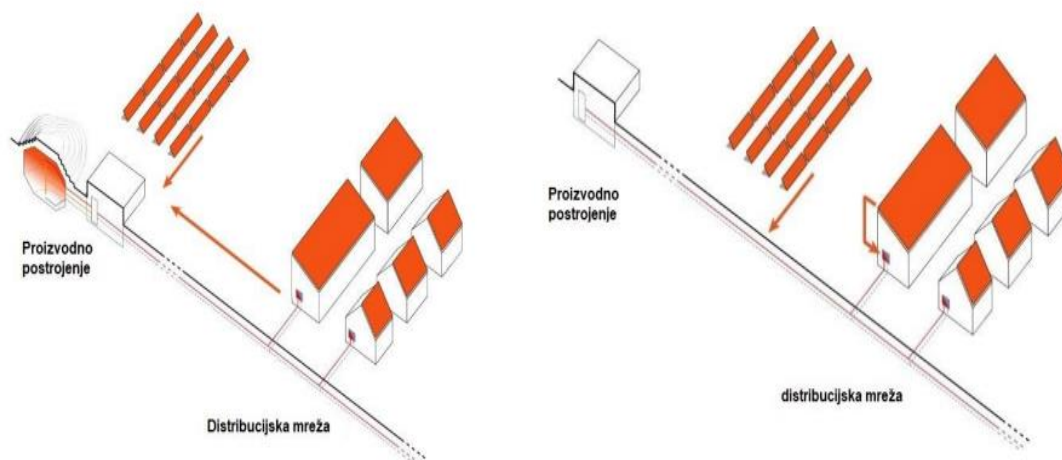


**Slika 1. Povijesni razvoj broja instaliranih solarnih sustava grijanja u CTS-u [5]**

Solarni kolektori mogu se integrirati u različite tipove daljinskih sustava grijanja, pri čemu su najčešće korištene konfiguracije centralizirani i decentralizirani sustavi. U centraliziranim sustavima, solarni kolektori se obično instaliraju u blizini glavnog postrojenja za grijanje, često koristeći kolektore montirane na tlu. Centralizirani sustavi dominiraju europskim tržištem zbog svoje široke primjene i visoke učinkovitosti.

S druge strane, decentralizirani sustavi raspoređuju solarne kolektore na više manjih lokacija unutar ili blizu područja koje opskrbljuju toplinom. Ova konfiguracija pruža veću fleksibilnost i omogućava proširenje postojećih mreža ili instalaciju novih sustava u područjima gdje je teže postaviti velike kolektore na jednom mjestu.

Koncepti mogućnosti integracije solarnih sustava u CTS prikazani su na Slika 2.



**Slika 2. Koncepti mogućnosti integracije solarnih sustava u CTS [9]**

Dakle, kod centraliziranih sustava (lijevi dio slike) kolektori dostavljaju toplinsku energiju izravno u glavno distribucijsko postrojenje, dok se kod decentraliziranih sustava (desni dio slike) nalaze na prikladnim lokacijama te dostavljaju toplinsku energiju u pojedine dijelove mreže [9].

### **1.2. Korištenje plitkih geotermalnih izvora u centraliziranim sustavima grijanja**

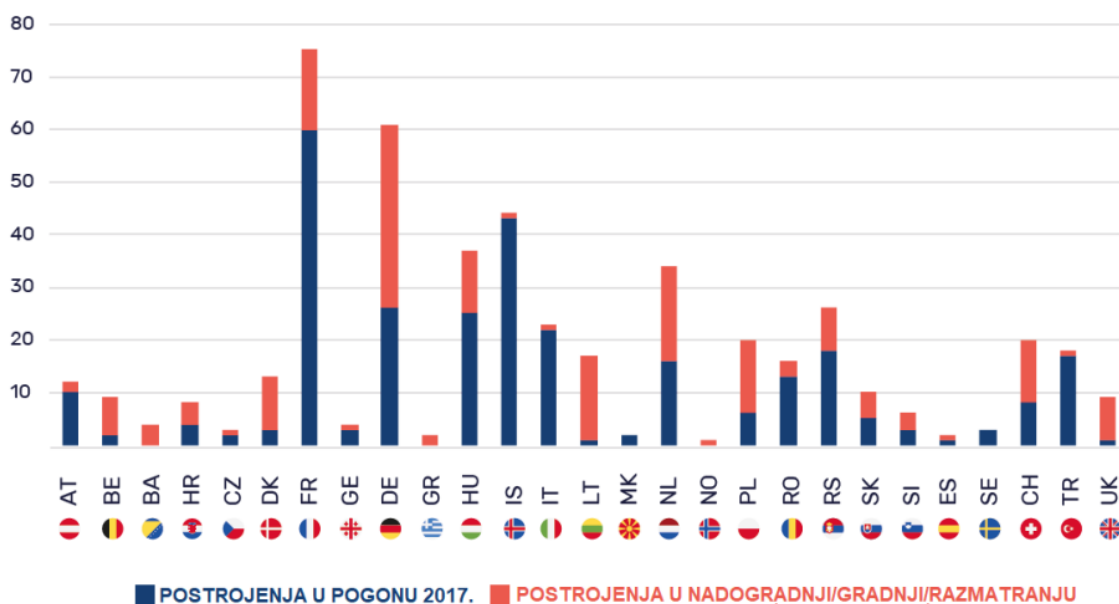
Plitki geotermalni sustavi koriste temperaturu tla do nekoliko stotina metara dubine za generiranje topline. Ova tehnologija se razvijala tijekom posljednjih desetljeća, a implementacija u centraliziranim sustavima grijanja postaje sve uobičajenija. Primjerice, studija iz 2017. godine [10] pokazuje kako su plitki geotermalni sustavi uspješno integrirani u nekoliko europskih gradova, uključujući Kopenhagen i Beč, gdje su korišteni za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i povećanje energetske učinkovitosti. U Kopenhagenu, plitki geotermalni sustav, kao dio projekta Amager Bakke, koristi energiju iz tla za grijanje dijela grada, smanjujući ovisnost o fosilnim gorivima i pomažući u postizanju cilja ugljične neutralnosti do 2025. godine. Ovaj sustav može opskrbiti do 15% toplinske energije potrebne za grijanje u tom području. U Beču, projekt Geothermiepark Wien koristi plitke geotermalne sisteme za grijanje stambenih i poslovnih zgrada u nekoliko kvartova. Ovaj sustav može pružiti do 30% godišnjih potreba za energijom tih zgrada.

Jedna od ključnih prednosti plitkih geotermalnih sustava je njihova sposobnost da pruže stabilan i pouzdan izvor energije uz minimalne operativne troškove. Prema istraživanju [11]



ovi sustavi nude visok koeficijent učinkovitosti (*eng. Coefficient of Performance, COP*), što znači da mogu pružiti značajne energetske uštede u usporedbi s konvencionalnim sustavima grijanja. Također, geotermalni izvori smanjuju emisiju CO<sub>2</sub>, što ih čini ekološki prihvatljivom opcijom za integraciju u centralizirani toplinski sustav.

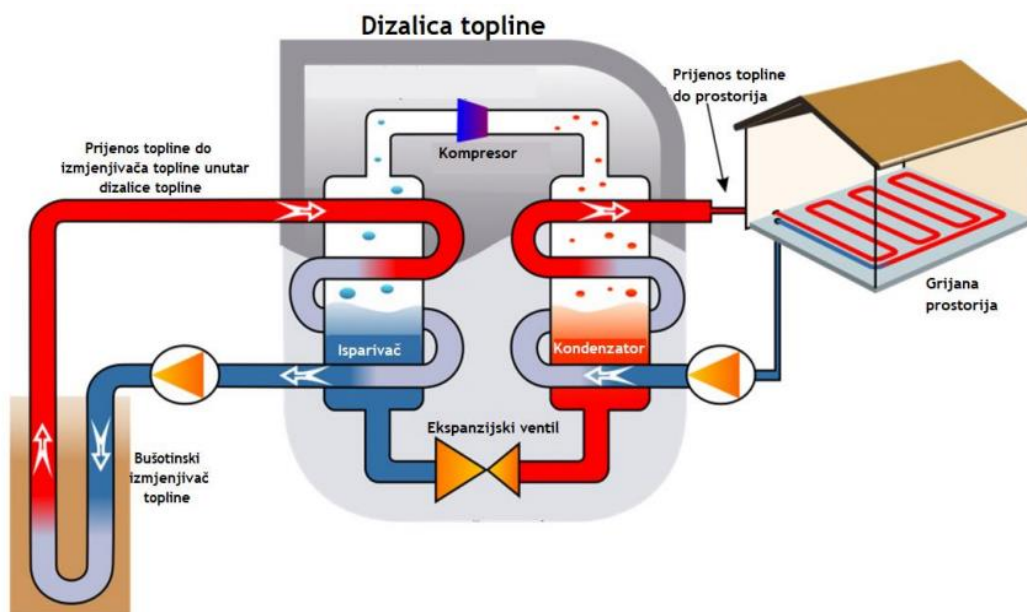
Međutim, implementacija plitkih geotermalnih sustava suočava se s određenim izazovima. Kao što navodi [12], visoki početni troškovi instalacije i potreba za detaljnim geološkim istraživanjima mogu ograničiti širenje ove tehnologije, posebno u područjima gdje su geotermalni resursi teško dostupni. Osim toga, učinkovitost sustava može biti podložna promjenama u klimatskim uvjetima i geološkim karakteristikama tla. Broj geotermalnih CTS-a u funkciji, u raznim fazama nadogradnje, razvoja ili planiranja u Europskim državama prikazan je na Slika 3.



**Slika 3. Broj geotermalnih CTS-a u funkciji, u raznim fazama nadogradnje, razvoja ili planiranja u Europskim državama [13]**

Geotermalna se energija iz plitkih izvora može koristiti u svrhu grijanja i hlađenja u nisko-temperaturnom CTS-u ili CRS-u te u sustavima s dizalicama topline. Bušotinski izmjenjivač Topline (*eng. Borehole heat exchanger, BHE*) se sastoji od cijevi koje su umetnute u bušotine. U tim cijevima cirkulira antifriz ili druga tekućina koja apsorbira toplinu iz tla. Ta tekućina prenosi toplinu do isparivača u sustavu dizalice topline. U dizalici topline, tekućina iz BHE-a prelazi u isparivač gdje izmjenjuje toplinu s radnim fluidom dizalice topline. Ovdje, radni fluid se zagrijava zbog prijenosa topline od tekućine iz BHE-a i isparava zbog niske točke vrelišta. Ispareni radni fluid ulazi u kompresor koji je obično električni. U kompresoru, radni fluid se

komprimira, čime se povećava njegova temperatura i tlak. Ova visoka temperatura omogućava efikasan prijenos topline u kondenzatoru. U kondenzatoru, vrući radni fluid se hladi i kondenzira, vraćajući se u tekuće stanje. Toplina koju radni fluid oslobađa tijekom kondenzacije prenosi se na vodu u sustavu centralnog grijanja preko izmjenjivača topline. Nakon kondenzacije, radni fluid prolazi kroz ekspanzijski ventil gdje se smanjuje tlak i temperatura, vraćajući se u početno stanje kao hladan plin. Ovaj hladan plin zatim ulazi u isparivač kako bi se proces ponovio. Ovaj ciklus prikazan je na Slika 4.



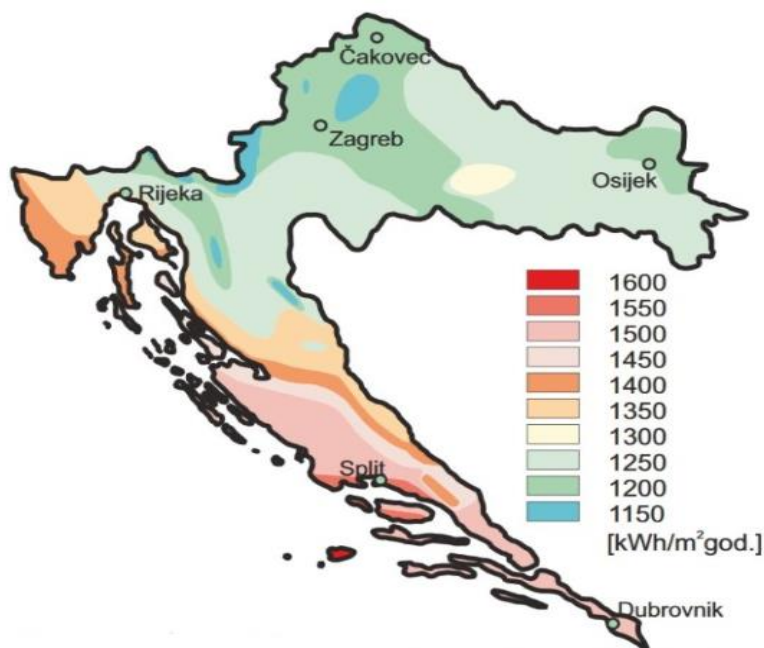
**Slika 4. Grafički prikaz rada geotermalne dizalice topline [11]**

Toplina proizvedena u kondenzatoru prenosi se na vodu u sustavu centralnog grijanja, koja se zatim distribuira kroz mrežu cijevi do različitih korisnika. Ova mreža može opskrbljivati zgrade, industrijske objekte i druge sustave grijanja. U mnogim slučajevima, geotermalni sustav se povezuje s postojećim izvorima topline u CTS-u, kao što su kotlovi na prirodni plin ili biomasa. To omogućuje dodatnu fleksibilnost i osiguranje da toplina bude dostupna i kada geotermalni izvor nije dovoljan.

### 1.3. Solarni potencijal u Republici Hrvatskoj i u gradu Karlovcu

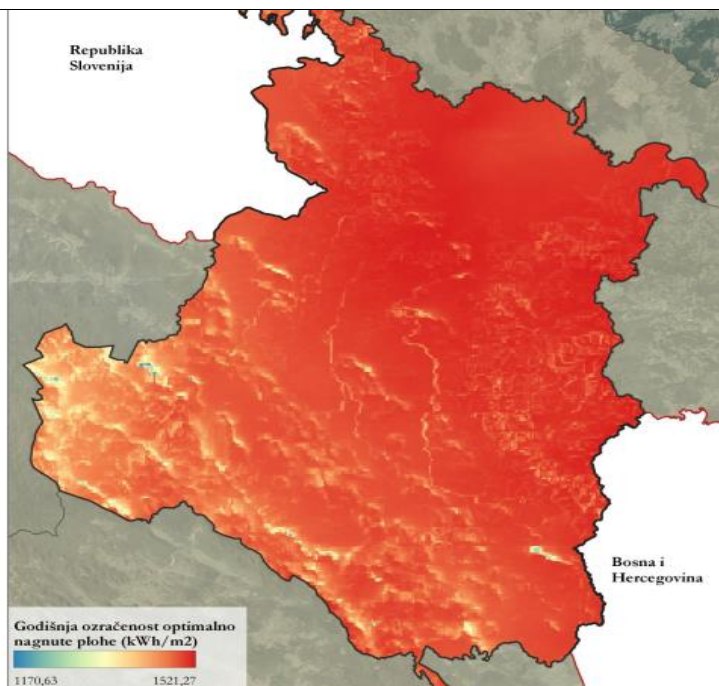
Hrvatska se ističe visokim solarnim potencijalom s prosječnim godišnjim brojem sunčanih sati od približno 2500, što je čini jednom od zemalja članica Europske unije s najvećim kapacitetom za solarnu energiju. Ipak, udio solarne energije u ukupnoj energetskej proizvodnji u Hrvatskoj još uvijek iznosi manje od 1%. Procjene pokazuju da solarni potencijal zemlje dostiže 6.8 GW, od čega je većina raspoređena u velikim fotonaponskim elektranama ili sustavima na tlu, dok 1,5 GW pripada krovnim solarnim sustavima [14]. Dok su inovativni oblici solarnih tehnologija

poput integriranih fotonaponskih sustava u zgrade, plutajućih solarnih panela ili agrosolarnih rješenja još uvijek u fazi istraživanja i razvoja, njihova važnost raste. Budući da intenzitet sunčeve svjetlosti varira ovisno o godišnjem dobu, vremenskim uvjetima i geografskoj lokaciji, ključan je točan izračun količine sunčeve energije koja dolazi do površine. U različitim regijama Hrvatske, godišnja količina sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu kreće se između 1150 i 1600 kWh/m<sup>2</sup> (Slika 5), što odgovara energetskej vrijednosti između 115 i 160 litara loživog ulja godišnje].



**Slika 5. Količina sunčeve energije u kWh/m<sup>2</sup> za Republiku Hrvatsku [15]**

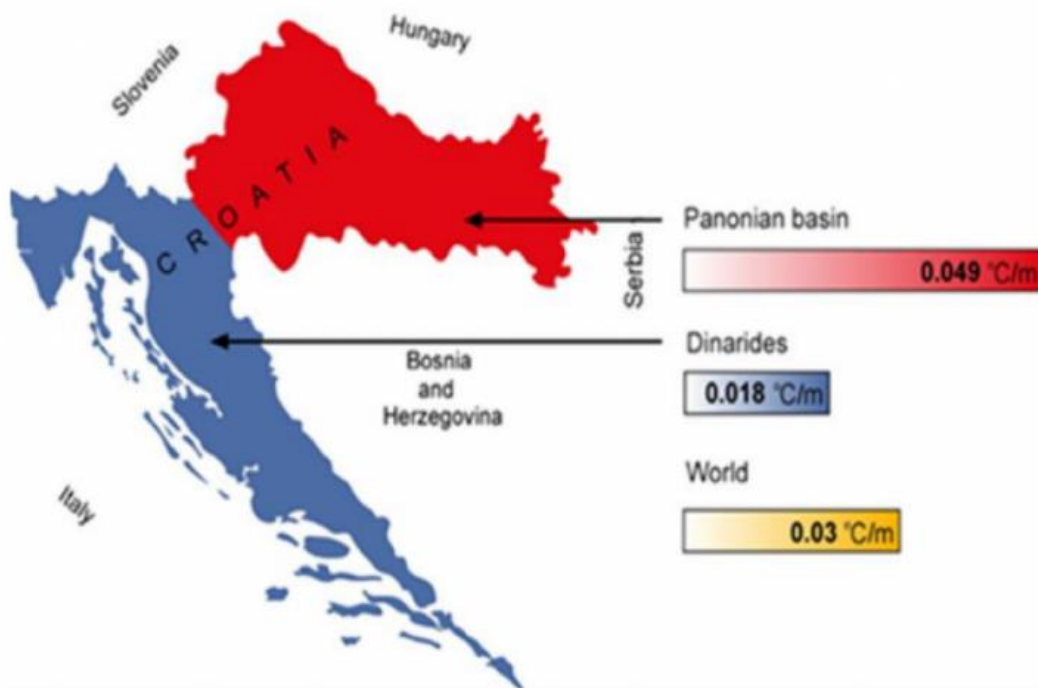
Karlovačka županija smještena je u kontinentalnom dijelu Hrvatske, uključujući brdske dijelove sjeverne Like, Gorskog kotara i Žumberka. Prema podacima iz Global Solar Atlas (GSA), godišnja ozračenost optimalno nagnutih ploha u Karlovačkoj županiji ostaje relativno ujednačena, s rasponom od 1170,63 kWh/m<sup>2</sup> do 1521,27 kWh/m<sup>2</sup> [16]. Potencijal za solarnu energiju opada u jugozapadnim područjima županije, što se pripisuje brdovitom terenu i hladnijoj klimi, kao što je prikazano na Slika 6.



**Slika 6. Godišnja ozračenost u kWh/m<sup>2</sup> Karlovačke županije [16]**

#### **1.4. Potencijal plitkih geotermalnih izvora u Republici Hrvatskoj**

Istraživanje i korištenje plitkih geotermalnih izvora u Republici Hrvatskoj raste posljednjih deset godina. Ova tehnologija, koja je poznata i široko korištena od sredine 20. stoljeća, koristi se za grijanje i hlađenje u stambenom i komercijalnom sektoru. Republika Hrvatska ima kratku povijest korištenja plitke geotermalne energije u usporedbi s drugim europskim zemljama, unatoč svom dobrom geotermalnom potencijalu. Vrijednosti geotermalnog gradijenta i toplinskog toka pokazale su da se Hrvatska može podijeliti u dva različita područja: Dinaride s jadranskom obalom i Panonsku nizinu. Za područje Dinarida s jadranskom obalom, utvrđeno je da su vrijednosti geotermalnog gradijenta u rasponu od 0,01 do 0,025 °C/m, s prosječnom vrijednošću od 0,018 °C/m. Toplinski tok u ovom području utvrđen je na 0,029 W/m<sup>2</sup>. U regiji Panonske nizine, geotermalni gradijent je bio u rasponu od 0,04 do 0,07 °C/m, s prosječnim toplinskim tokom od 0,076 W/m<sup>2</sup> [17] kao što je prikazano na Slika 7.



**Slika 7. Geotermalni gradijent Republike Hrvatske [17]**

Prema Kurevija et al.[18], do 2008. godine u Hrvatskoj nije bilo značajne upotrebe plitke geotermalne energije putem toplinskih pumpi. Ruševljan et al.[19] navode da pravilno projektiranje plitkih geotermalnih sustava obično zahtijeva složene matematičke simulacije koje se moraju provesti ne samo za vršna opterećenja zgrade, već i za opterećenja koja se izračunavaju tijekom cijele godine. Zbog toga se opterećenja zgrade moraju detaljnije analizirati nego kod dimenzioniranja konvencionalnih sustava. Projektanti sustava toplinskih pumpi povezanih s BHE također bi trebali uzeti u obzir dugoročne promjene temperature u tlu oko bušotine, koje bi mogle utjecati na ukupnu učinkovitost sustava tijekom njegovog životnog ciklusa. Provedena tehno-ekonomska procjena potencijala plitke geotermalne energije u Hrvatskoj je pokazala da značajan potencijal imaju kontinentalni dijelovi zemlje (uglavnom Panonski bazen) i jadranska obala, dok su regije Dinarida pokazale niži potencijal za implementaciju sustava dizalica topline s izvorom u zemlji. Geološke karakteristike podzemlja Hrvatske smještaju većinu geotermalnih nalazišta u područje Panonskog bazena. Među njima se nalaze lokacije gdje temperatura vode u ležištu prelazi 100 °C, uključujući i bušotine u okolini Karlovca, koje su prvotno istraživane radi otkrića ugljikovodika. Geotermalni potencijal ovog područja potvrđen je 1983. godine bušotinom Ka-2, smještenom otprilike 8 km sjeveroistočno od Karlovca. Godine 1988. izbušena je dodatna bušotina Ka-3, koja je dodatno potvrdila geotermalni kapacitet ovog lokaliteta. Bušotine Ka-2 i Ka-3 nalaze se na udaljenosti od oko 3 km jedna od druge, a obje su u vlasništvu INA-e. Područje oko bušotina je nizinsko,

---

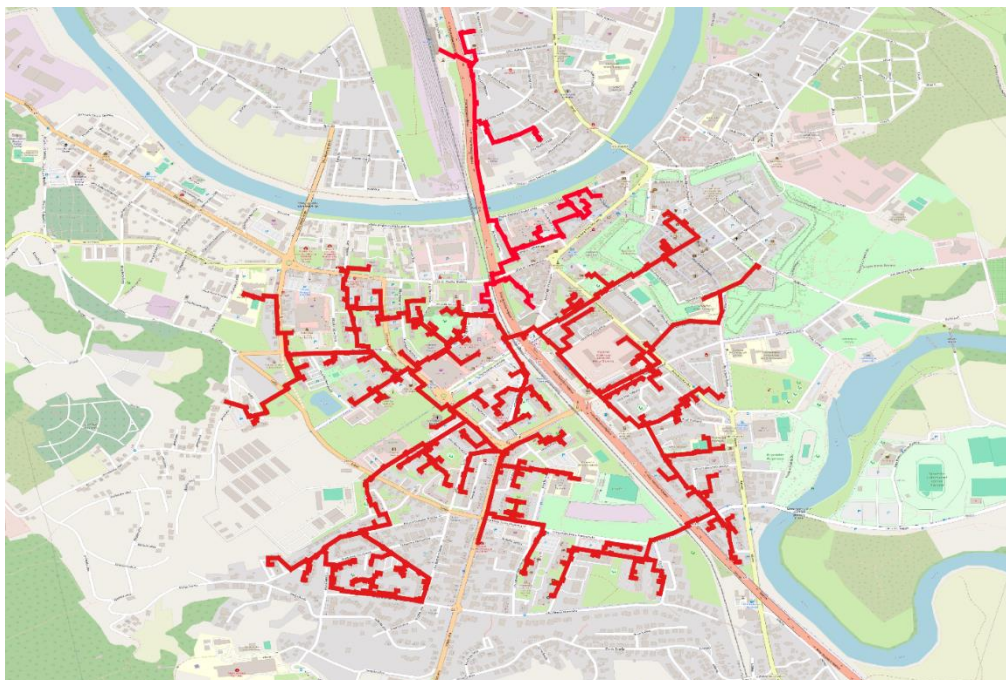
s nadmorskom visinom od 110 metara i prekriveno šumom. Ovi nalazi ukazuju na značajan geotermalni potencijal Karlovca, s temperaturom vode iznad 100 °C, što otvara mogućnosti za iskorištavanje ne samo dubokih geotermalnih izvora, već i plitkih geotermalnih sustava. Plitki geotermalni izvori, koji crpe toplinu iz površinskih slojeva tla ili podzemnih voda, mogli bi se koristiti za grijanje i hlađenje stambenih i poslovnih objekata, čime bi se dodatno doprinijelo energetskej održivosti i smanjila ovisnost o fosilnim gorivima u ovom području.

## 2. METODA

U ovom dijelu rada bit će opisana metoda za identificiranje područja unutar grada Karlovca koja su pogodna za instaliranje sustava solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora. Ova metoda će omogućiti sveobuhvatno razumijevanje prikladnosti različitih područja unutar grada Karlovca za primjenu solarnih i geotermalnih tehnologija, te pružiti temelje za daljnje odluke u vezi s njihovom implementacijom. Prije opisivanja same metode, ukratko će biti opisan centralizirani toplinski sustav grada Karlovca.

### 2.1. Centralizirani toplinski sustav grada Karlovca

Centralni toplinski sustav grada Karlovca opslužuje 7717 krajnjih kupac, od toga 7400 su kućanstva, a preostalih 317 industrija i poslovni potrošači. Ovaj sustav je tipičan za gradove srednje veličine (oko 50 tisuća stanovnika) i karakterizira ga jedinstvena mreža u zvjezdastoj konfiguraciji dužine 22,1 km (Slika 8.). Toplinska energija se predaje putem 177 toplinskih stanica [20]. Ukupna instalirana toplinska snaga postrojenja je 87 000 kW. Gradska toplana Karlovac, smještena u središtu grada, odgovorna je za proizvodnju, distribuciju i opskrbu toplinskom energijom. Od rujna 2014. godine, toplana je proširila svoje aktivnosti na novo zakonski regulirano područje kupnje toplinske energije. Toplinarstvo u gradu Karlovcu ima gotovo 50-godišnju tradiciju, počevši od 1968. godine.



**Slika 8. Centralizirani toplinski sustav grada Karlovca**

Nedavno je obnovljeno 16 km vrelovoda. U 2023. godini isporučeno je ukupno 49 407 536 kWh toplinske energije, a vršno opterećenje zimi je oko 50 MW [21]. Od ukupne isporučene

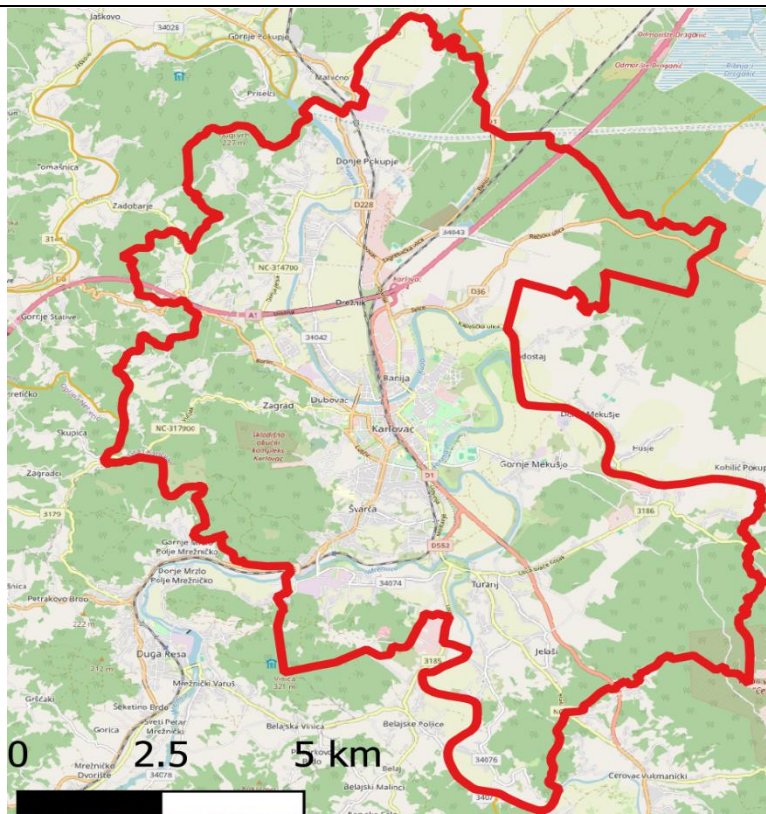
toplinske energije 38 378 877 kWh iskoristi se za grijanje kućanstava, a preostalu toplinsku energiju koriste industrija i poslovni potrošači za pripremu potrošne tople vode.

## 2.2. Prostorna analiza površina zemljišta za instalaciju solarnih kolektora

U ovom djelu rada bit će prikazana metoda odabir lokacija za postavljanje solarnih kolektora koji se također mogu implementirati u postojeći CTS grada Karlovca za toplinske potrebe.

Za utvrđivanje administrativne granice grada Karlovca korišten je QGIS (Quantum Geographic Information System). QGIS je besplatni softver sa slobodnim pristupom (*eng. open-source*) za prostornu analizu i vizualizaciju geografskih podataka. Omogućuje korisnicima rad s vektorskim i rasterskim podacima te nudi širok raspon funkcionalnosti za mapiranje, prostorne analize i upravljanje prostornim bazama podataka. Unutar QGIS-a, uz pomoć dodatka Quick OSM, koji omogućuje preuzimanje podataka iz Otvorene karte svijeta izravno u QGIS, za preuzimanje podataka korišten je ključ „namjene zemljišta“ (*eng. landuse*) s vrijednošću „sve“ (*eng. all*) kako bi se prikupili svi relevantni podaci o namjeni zemljišta unutar administrativnih granica grada Karlovca. Ovaj dodatak je posebno koristan za brzo i jednostavno dobivanje geografskih podataka bez potrebe za vanjskim alatima ili složenim koracima obrade. Preuzimanje podataka postavljeno je na područje grada Karlovca kako bi se osigurala točnost i relevantnost informacija. Uz pomoć dodatka QuickOSM, preuzeti su podaci koji uključuju administrativne granice grada Karlovca (Slika 9.). Ovi podaci uključuju granice naselja, javne površine, prometnu infrastrukturu i druge relevantne informacije.

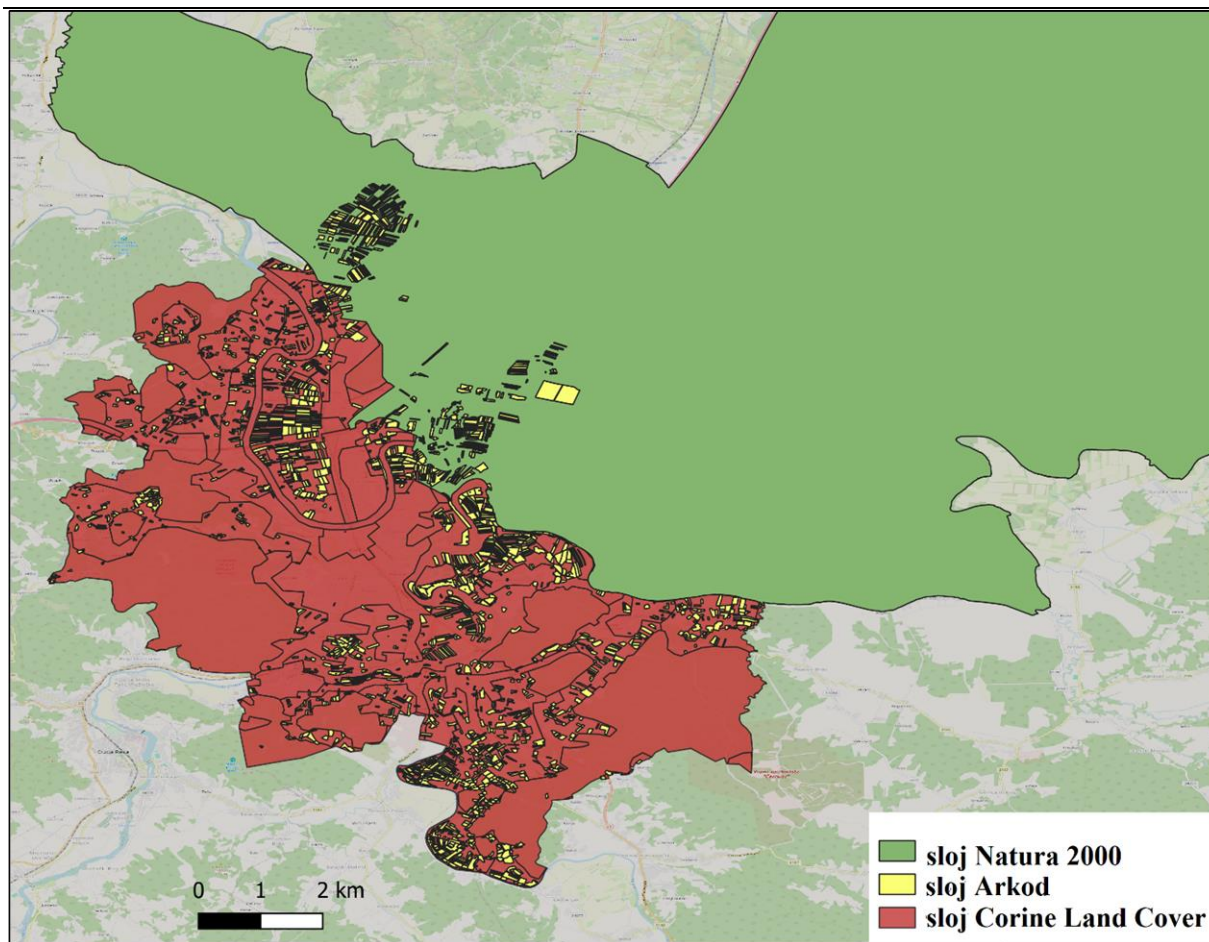




**Slika 9. Administrativne granice grada Karlovca**

Nakon preuzimanja sloja koji sadrži administrativne granice grada Karlovca preko dodatka Quick OSM, sljedeći korak u analizi bio je upotreba sloja CLC (eng. *Corine Land Cover*). CLC je europski projekt koji pruža detaljne informacije o korištenju zemljišta i pokrivaču tla unutar Europske unije. Projekt, koji je započeo 1990. godine, omogućuje stvaranje tematskih karata koje pokazuju različite vrste korištenja zemljišta, uključujući urbane područje, šumske površine, poljoprivredna zemljišta i vodene površine [22]. Ove karte su korisne za analizu prostornih promjena i planiranje u područjima zaštite okoliša, urbanističkog razvoja i upravljanja resursima. Nakon preuzimanja sloja grada Karlovca i sloja CLC, provedena je operacija presjeka (eng. *intersection*). Presjek je geoprocena operacija koja stvara novi sloj tako što se kombiniraju elementi iz dva sloja koji se presijecaju ili nalaze unutar istog područja. U ovom slučaju, presjek između sloja grada Karlovca i sloja CLC omogućava stvaranje novog sloja koji prikazuje samo one dijelove CLC sloja koji se nalaze unutar granica grada Karlovca. Nakon provedene operacije presjeka između sloja grada Karlovca i sloja CLC, sljedeći korak bio je integracija sloja Natura 2000. Natura 2000 je mreža zaštićenih područja u Europskoj uniji koja je uspostavljena s ciljem očuvanja prirodnih staništa i ugroženih vrsta. Ova mreža, definirana direktivom o staništima i direktivom o pticama, obuhvaća različite ekološke zone i

područja od značaja za biološku raznolikost. Za potrebe analize, sloj Natura 2000 preuzet je s Bioportala [23], koji pruža pristup službenim podacima o zaštićenim područjima u Hrvatskoj. Ovi podaci uključuju granice ekološki zaštićenih područja unutar kojih se ne smiju provoditi aktivnosti koje bi mogle ugroziti očuvanje prirodnih staništa i vrsta. Nakon što je sloj Natura 2000 preuzet i učitao u QGIS, primijenjena je geoprocena operacija razlika (eng. *difference*). Ova operacija uspoređuje dva sloja i stvara novi sloj koji prikazuje područja koja su prisutna u prvom sloju, ali nisu prisutna u drugom sloju. U ovom slučaju, operacija razlike provedena je između sloja koji se dobio nakon operacije presjeka i sloja Natura 2000. Sloj koji se sada dobije prikazuje područja unutar grada Karlovca koja nisu unutar granica Natura 2000. Ova operacija omogućava isključenje svih zaštićenih područja iz analize, usmjeravajući pažnju na ona zemljišta koja nisu obuhvaćena ekološkom zaštitom. Tako se dobije sloj koji pokazuje samo ona područja koja su potencijalno pogodna za instalaciju solarnih kolektora i plitkih geotermalnih sustava, bez ograničenja koja nameću zaštićena područja. Nakon primjene operacije razlike između sloja grada Karlovca i sloja Natura 2000, sljedeći korak bio je korištenje sloja Arkod za dodatnu analizu. Arkod je baza podataka koja sadrži informacije o zemljištu u Hrvatskoj, uključujući detalje o parcelama i njihovim granicama [24]. Sloj Arkod korišten je za dodatnu provjeru i analizu podataka o zemljištu unutar granica grada Karlovca. Korištenjem sloja Arkod, provedena je detaljna analiza parcela kako bi se dodatno filtrirala zemljišta unutar grada Karlovca. Ovo uključuje provjeru specifičnih karakteristika zemljišta kao što su veličina parcela, vrsta korištenja i eventualna ograničenja koja mogu utjecati na mogućnost instalacije sustava obnovljivih izvora energije.



**Slika 10. Prikaz rezultatnog sloja unutar QGIS-a**

Unutar rezultatnog sloja prikazanog na Slika 10., iz atributne tablice uklonjena su sva zemljišta koja nisu pogodna za izgradnju sustava solarnih kolektora. Pogodna zemljišta su ona koja nisu parkovi, prometna infrastruktura ili zaštićena područja te na kojima nema izgrađenih objekata. Za dobivena pogodna zemljišta, površina svake pojedinačne parcele izračunata je pomoću opcije kalkulator polja (eng. *Field Calculator*) i naredbe površina (eng. *area*) unutar atributne tablice konačno dobivenog sloja. Ovaj korak omogućuje precizno kvantificiranje dostupne površine koja se može iskoristiti za instalaciju solarnih kolektora. Za optimizaciju instalacije solarnih kolektora,

korišten je alat PVGIS [25] koji je odredio optimalni kut nagiba solarnih kolektora za područje grada Karlovca. Preporučeni kut nagiba iznosi  $36^\circ$ . Da bi se izbjeglo međusobno zasjenjenje kolektora, potrebno je izračunati udaljenost između redova kolektora. Ova udaljenost računa se za najmanji dnevni kut između horizonta i Sunca tijekom najkraćeg dana u godini (zimski solsticij). Formula za dobivanje tog kuta je:

$$\theta_s = 90^\circ - (\beta + \delta) \quad (1)$$

gdje su:  $\theta_s$  – solarni kut (kut između horizonta i Sunca tijekom zimskog solsticija) [°],

$\beta$  – geografska širina Zemlje (približno 45°) [°],

$\delta$  – deklinacija Zemlje (nagnutost tijekom zimskog solsticija, oko 23,5°) [°].

Za geografsku širinu Zemlje od približno 45° i kut negativne deklinacije (nagnutosti) Zemlje od 23,5° dobiva se solarni kut od 21,5°. Uzimajući u obzir optimalni kut nagiba solarnih kolektora  $\alpha$  i odabrane standardne dimenzije solarnih kolektora  $2 \times 1$  m, potrebna udaljenost između redova kolektora dobiva se prema formuli:

$$x_{zas} = b_k \cdot \sin(\alpha) \cdot \tan(\theta_s) \quad (2)$$

gdje su:  $x_{zas}$  – potrebna udaljenost između redova kolektora [m],

$b_k$  – širina kolektora [m],

$\alpha$  – optimalni kut nagiba solarnih kolektora [°],

$\theta_s$  – solarni kut [°].

Za standardnu širinu solarnog kolektora od 2 metra, optimalnog kuta nagiba solarnih kolektora od 36° te izračunatog solarnog kuta od 21,5° dobiva se potrebna udaljenost između redova kolektora koja iznosi 2.98 metara.

Površina solarnih kolektora izračunata je uzimajući u obzir efekt međusobnog zasjenjenja kolektora i uvjet maksimalne pokrivenosti površine, koji je postavljen na 90% ukupne površine zemljišta. Formula za dobivanje površine solarnih kolektora je:

$$A_s = \frac{0.9 \cdot P_z \cdot a_k \cdot b_k}{b_k \cdot (x_{zas} + \cos(\alpha) \cdot a_k)} \quad (3)$$

gdje su:  $A_s$  – površina solarnih kolektora [m<sup>2</sup>],

$P_z$  – ukupna površina zemljišta [m<sup>2</sup>],

$a_k$  – dužina kolektora [m],

$b_k$  – širina kolektora [m],

$x_{zas}$  – potrebna udaljenost između redova kolektora [m],

$\alpha$  – optimalni kut nagiba solarnih kolektora [°].

Nakon uvrštavanja svih poznatih vrijednosti: za dužinu solarnog kolektora od 1 m, širinu solarnog kolektora od 2 m, optimalni kut nagiba solarnih kolektora od 36° te potrebne udaljenosti između redova kolektora od 2.98 m dobije se:

$$A_s = 0.19565 \cdot P_z \quad (4)$$

Iz navedenog se zaključuje da je od ukupne površine zemljišta za instalaciju solarnih kolektora dostupno nešto manje od petine te površine.

Nakon što su definirana pogodna zemljišta unutar grada Karlovca, sljedeći korak uključuje izračun maksimalne moguće površine solarnih kolektora koja se može instalirati na svakom zemljištu. Unošenjem odgovarajuće formule u kalkulator polja (eng. *Field Calculator*) u QGIS-u, koristeći prethodno izračunate tlocrtne površine pogodnih zemljišta, dobiva se maksimalna moguća površina solarnih kolektora za svako zemljište. Ova procjena uzima u obzir uvjete instalacije i prostorne karakteristike pojedinih parcela. Pretpostavlja se ugradnja pločastih solarnih kolektora s učinkom od oko 50%. Ova učinkovitost ukazuje na sposobnost kolektora da pretvara solarno zračenje u toplinsku energiju.

Prema podacima sa stranice PVGIS, godišnje solarno zračenje za područje grada Karlovca iznosi 1515,45 kWh/m<sup>2</sup>. Na temelju ove informacije i pretpostavljene učinkovitosti solarnih kolektora, u atributnoj tablici konačno dobivenog sloja izračunat je specifični potencijal proizvodnje toplinske energije, koji iznosi 984,04 kWh/m<sup>2</sup> za pločasti solarni kolektor.

Množenjem specifičnog potencijala proizvodnje toplinske energije s dostupnom površinom kolektora za svako zemljište, dobiva se godišnja proizvodnja toplinske energije za pojedinu parcelu. Grafički prikazi rezultata dobivenih ovo opisanom metodom bit će dani u nastavku rada nakon opisivanje tehno-ekonomske analize.

### **2.3. Tehno - ekonomska analiza**

U sklopu tehno-ekonomske analize korištena je metoda toka novca. Razmatrala se isplativost implementacije plitke geotermalne bušotine te devet zemljišta pogodnih za instalaciju solarnih kolektora u postojeći centralizirani toplinski sustav grada Karlovca. Analiza je provedena korištenjem ključnih financijskih pokazatelja poput neto sadašnje vrijednosti (eng. *Net Present Value*, NPV) i unutarnje stope povrata (eng. *Internal Rate of Return*, IRR) kako bi se procijenila ekonomska održivost projekta. Također, izračunat je i nivelirani trošak proizvedene toplinske energije (eng. *Levelized Cost of Heat*, LCOH) kako bi se dobila jasnija slika o dugoročnim troškovima proizvodnje toplinske energije u usporedbi s tradicionalnim izvorima energije.

#### **2.3.1. Tehno-ekonomska analiza za plitku geotermalnu bušotinu**

Za potrebe analize razmotrena je implementacija plitke geotermalne bušotine koja se nalazi 8 km od Gradske toplane Karlovac. Bušotina je planirana na dubini od 300 metara i koristit će geotermalnu dizalicu topline za povećanje temperature geotermalnog fluida sa temperature koju fluid ima u tlu na temperaturu polaza u toplinski sustav. Pretpostavljen je temperaturni režim

grijanja 60/45 °C. Pretpostavka je, kako je navedeno u prijašnjem poglavlju, da će izgradnju transmisijske i distribucijske mreže geotermalne energije u Karlovcu bit će potrebne dvije stanice izmjenjivača topline kako bi se omogućila učinkovita opskrba energijom kroz sustav. Također se za potrebe ove analize, pretpostavlja da će proizvedena toplinska energija u potpunosti zamijeniti dotad korišteni prirodni plin. Pretpostavlja se da će vrijeme trajanja projekta biti 25 godina. Od ulaznih podataka za provedbu tehno – ekonomske analize potrebna je nekoliko podataka. Cijena toplinske energije preuzeta je s cjenika Gradske toplane Karlovac dostupnog na internetu [26]. Izabrana je cijena za distribuciju toplinske energije za kućanstva od 0.04 €/kWh iz Tablica 1.

**Tablica 1. Važeće cijene toplinske energije za CTS Karlovac [26]**

NAZIV DJELATNOSTI	Tarifna grupa (Tg)	Tarifne stavke (Ts)			
		Energija (kn/KWh)	Energija (€/kWh)	Snaga (kn/kWh)	Snaga (€/kWh)
PROIZVODNJA TOPLINSKE ENERGIJE	kućanstva	0,5231	0,0694	11,60	1,54
DISTRIBUCIJA TOPLINSKE ENERGIJE	kućanstva	0,0400	0,0053	4,40	0,58
				*Naknada (kn/m2/godišnje)	*Naknada (€/m2/godišnje)
OPSKRBA TOPLINSKOM ENERGIJOM	kućanstva	-	-	1,40	0,1858
				*Naknada (kn/m2/godišnje)	*Naknada (€/m2/godišnje)
KUPAC TOPLINSKE ENERGIJE	kućanstva	-	-	8,00	1,0618

Sljedeći važan podatak je vrijednost diskontne stope. Diskontna stopa je ključni podatak u analizi koji utječe na izračun neto sadašnje vrijednosti i druge financijske pokazatelje. Određuje koliko će budući novčani tokovi biti smanjeni na sadašnju vrijednost, uzimajući u obzir rizik i vrijeme. Ispravna procjena diskontne stope omogućuje točnu evaluaciju isplativosti projekta i donošenje informiranih odluka. Visoka diskontna stopa može smanjiti NPV i učiniti projekt manje privlačnim, dok niža diskontna stopa može povećati NPV i učiniti projekt privlačnijim. Izabrana je diskontna stopa od 4,11% prema Obavijesti Europske komisije o referentnoj i diskontnoj stopi i stopi povrata u primjeni od 1. siječnja 2024. [27]. Porez na dobit je 18% budući da se očekuju prihodi veći od 1 000 000 € i pretpostavlja se da će se investicijski trokovi u cijelosti pokriti sa vlastitim kapitalom odnosno neće biti potrebe za korištenjem kredita.

Za procjenu troškova izgradnje sustava prijenosa daljinskog grijanja za centralizirani toplinski sustav, korištena je baza podataka Danske energetske agencije [28]. Ova baza podataka pruža informacije o cijenama izgradnje različitih sustava pa tako i plitkih geotermalnih sustava.

Detalji o troškovima prijenosa daljinskog grijanja za CTS navedeni su u Tablica 2., koja daje pregled cijena i troškova povezane s izgradnjom takvog sustava.

**Tablica 2. Podaci o cijeni prijenosa daljinskog grijanja geotermalnog CTS-a [28]**

<b>Energetski/tehnički podaci</b>		
Gubici toplinske energije, vodovi	3	%
Gubici energije, izmjenjivači topline	5	%
Pomoćna potrošnja električne energije	2	%
Dubina bušotine	300	m
Broj bušotina	2	
$T_{\text{polaz}}/T_{\text{povrat}}$	60/45	°C
COP dizalice topline	4	
<b>Financijski podaci</b>		
Investicijski troškovi – jedan cjevovod	25	€/MW/m
Investicijski troškovi – izmjenjivači topline	105 000	€/MW
Varijabilni trošak održavanja	0.1	€/MWh/km
Trošak bušenja	75	€/m
Trošak dizalice topline	40000	€

Godišnje stope amortizacije određuju se na temelju amortizacijskog vijeka trajanja različitih skupina dugotrajne imovine. Dugotrajna imovina uključuje stavke i prava čiji nabavni trošak prelazi zakonom definirani iznos od 464,53 € i koji imaju vijek trajanja dulji od godinu dana. Za energetska postrojenja u ovom slučaju odabrana je amortizacija s razdobljem od 4 godine [29].

Fleksibilne cijevi često se koriste za servisne vodove zbog njihove jednostavne instalacije. Najčešće su to plastične PEX cijevi. Također, servisni vodovi mogu uključivati fleksibilne dvostruke cijevi s unutarnjim bakrenim cijevima ili jednostruke cijevi od čelika. Preporučuje se uporaba fleksibilnih cijevi koje sadrže difuzijsku barijeru između izolacije i polietilenskog kućišta kako bi se osigurala konstantna i niska toplinska vodljivost kroz vrijeme. Za projekt je odabrana cijev DN 400, čija je cijena 43,13 € po metru [30].

### **Neto sadašnja vrijednost**

Neto sadašnja vrijednost je financijska metoda koja se koristi za procjenu profitabilnosti investicijskog projekta. NPV predstavlja razliku između sadašnje vrijednosti novčanih tokova koje projekt generira i početnih troškova ulaganja. Ova metoda pomaže u odlučivanju o

isplativosti projekta, gdje pozitivan NPV sugerira da će projekt generirati više novca nego što košta, a negativan NPV sugerira suprotno. Izračunava se prema formuli:

$$NPV = \sum \frac{x_t}{(1+R)^T} - x_o \quad (5)$$

gdje su:  $R$  – diskontna stopa (%),

$x_t$  – prihod u životnom vijeku projekta (€),

$T$  – vremenski period (godina),

$x_o$  – iznos početne investicije (€).

### Unutarnja stopa povrata

Unutarnja stopa povrata je financijski pokazatelj koji mjeri stopu povrata koju projekt ili investicija ostvaruje. To je diskontna stopa koja rezultira nulom za neto sadašnju vrijednost svih budućih novčanih tokova projekta, tj. to je stopa pri kojoj se sadašnja vrijednost budućih novčanih tokova izjednačava s početnom investicijom. IRR se koristi za procjenu isplativosti projekata – što je viši IRR, to je projekt privlačniji za investiture Izračunava se prema formuli:

$$IRR = \sum \frac{NPV(x_t)}{(1+R)^T} - x_o = NPV = 0 \quad (6)$$

gdje su:  $NPV(x_t)$  – prihod u životnom vijeku projekta sveden na sadašnju vrijednost tokom perioda  $T$  (€)

$T$  – vremenski period (godina),

$x_o$  – iznos inicijalne investicije (€),

IRR – unutarnja stopa povrata (%).

### Nivelirani trošak toplinske energije

Nivelirani trošak toplinske energije je izračun prosječne cijene proizvedene toplinske energije tijekom životnog vijeka postrojenja, uzimajući u obzir sve troškove povezane s proizvodnjom topline. Ovaj pokazatelj koristi se za usporedbu troškova različitih tehnologija i izvora toplinske energije, poput plina, geotermalne energije, solarnih kolektora itd. Izračunava se prema formuli:

$$LCOH = \frac{CAPEX + OPEX}{Q_H} \quad (7)$$

gdje su:  $OPEX$  – suma fiksnih i varijabilnih troškova (€),

$Q_H$  – količina proizvedene toplinske energije u godini (MWh),

$CAPEX$  – kapitalni troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost (€).

$CAPEX$  se izračunava kao umnožak faktora kapitalnog povratka  $CRF$  i početne investicije  $I$ :

$$CAPEX = CRF * I \quad (8)$$



gdje se factor  $CRF$  izračunava:

$$CRF = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (9)$$

gdje su:  $d$  – diskontna stopa (%),

$n$  – vrijeme trajanja projekta.

### 2.3.2. Tehno-ekonomska analiza instalacije solarnih kolektora

Neki od ulaznih podataka za tehno-ekonomsku analizu solarnih kolektora isti su kao i za analizu geotermalne bušotine. Tako je cijena toplinske energije postavljena na 0,04 €/kWh, diskontna stopa iznosi 4%, a porez na dobit je 18%. Također, pretpostavljeno je da se projekt financira kao 100% privatna investicija, što znači da nema dodatnog financiranja iz javnih izvora ili subvencija. Uz to, korišteni su isti ulazni podaci uključujući amortizacijski period od 4 godine za energetska postrojenja. Također, cijena PEX cijevi je jednaka kao u prethodnoj analizi.

Za procjenu troškova izgradnje solarnih kolektora, korišteni su podaci preuzeti iz baze podataka Danske energetske agencije. Ova baza podataka pruža detaljne informacije o cijenama i troškovima izgradnje solarnih postrojenja, što omogućuje preciznu analizu i planiranje investicije. Za procjenu ukupnih investicijskih troškova postrojenja solarnih kolektora za jedno zemljište, uzeta je cijena iz kataloga od 395 €/MWh. Ovi troškovi raspoređeni su među različitim komponentama postrojenja prema sljedećim postocima od ukupnog iznosa:

- Solarni kolektori čine 48% ukupnih investicijskih troškova,
- Pumpe i izmjenjivači topline čine 8%,
- Cijevi za prijenos topline čine 13%,
- Nepredviđeni troškovi, dozvole i projektiranje čine 6%,
- Kupnja zemljišta i radovi na zemljištu čine 7%,
- Kontrola, rad i pokretanje čine 5%,
- Izgradnja čini 2%.

Uz ove investicijske troškove, fiksni i varijabilni troškovi su procijenjeni kao postotak od godišnje proizvedene toplinske energije, varijabilni troškovi čine 30%, dok fiksni troškovi čine 8%. U Tablica 3. prikazani su ukupni troškovi postrojenja.

**Tablica 3. vrste troškova za jedno postrojenje solarnih kolektora**

Vrste troškova	Trošak	Jedinica
Solarni kolektori	1 283 929.867	€
Pumpe i izmjenjivač topline	213 988.311	€
Cijevi za prijenos topline	347 731.005	€
Izgradnja postrojenja	53 497.078	€
Kontrola, rad i pokretanje	133 742.694	€
Kupnja zemljišta i radovi na zemljištu	187 239.772	€
Projektiranje, dozvole i nepredviđeni troškovi	160 491.233	€
Cijena PEX cijevi	155 268.234	€
Fiksni O&M	541.742	€
Variable O&M	2031.534	€

S druge strane, prihodovna strana analize uključuje dva ključna izvora prihoda: zaradu od prodaje toplinske energije i uštede na troškovima plina. Zarada od prodaje toplinske energije proizvedene iz solarnih kolektora predstavlja jedan od glavnih izvora prihoda. Količina toplinske energije koju solarni kolektori proizvedu godišnje, zajedno s cijenom po kojoj se energija prodaje, omogućuje izračun ukupnog prihoda od prodaje. Drugi važan izvor prihoda dolazi od uštede na troškovima plina. Ušteta se izračunava množenjem godišnje količine toplinske energije proizvedene iz solarnih kolektora s cijenom plina.

Cijena prirodnog plina je preuzeta sa stranice Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERE) [31] prema Odluci o iznosu tarifnih stavki za javnu uslugu opskrbe plinom za razdoblje od 1. lipnja do 31. prosinca 2023. te za razdoblje od 1. siječnja do 31. ožujka 2024. Cijena nabave prirodnog plina prema toj odluci iznosi 0.0264 €/kWh iz Tablica 4.

**Tablica 4. Iznosi tarifnih stavki za javnu uslugu opskrbe plinom [26]**

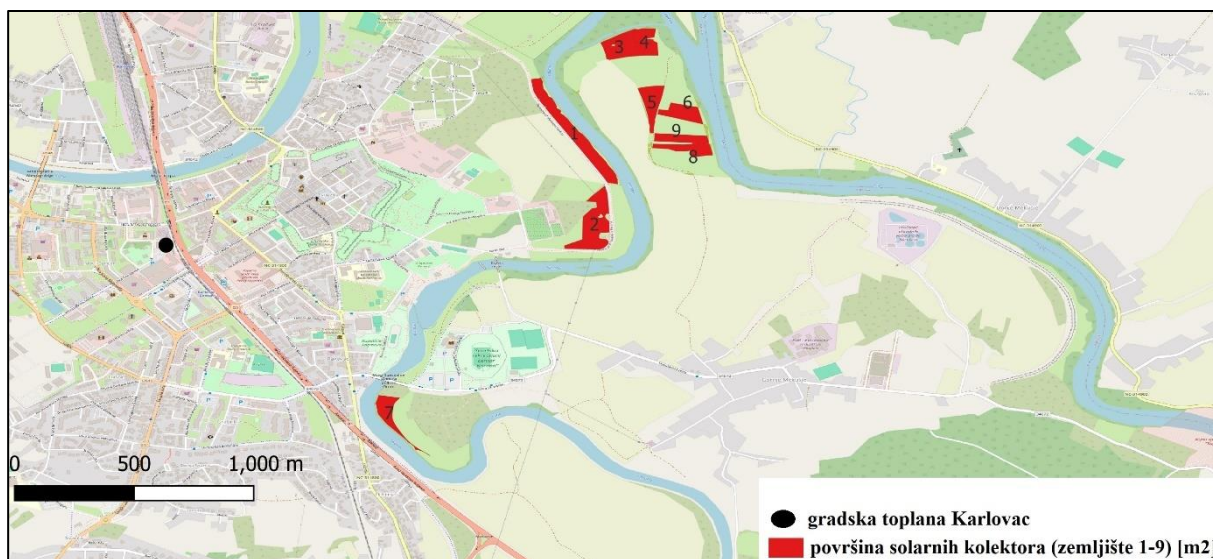
Vrsta tarifne stavke	Oznaka tarifne stavke	Tarifni model	TROŠAK NABAVE PLINA	TROŠAK DISTRIBUCIJE PLINA	TROŠAK OPSKRBE PLINOM	KRAJNJA CIJENA OPSKRBE PLINOM – bez PDV-a	Mjerna jedinica
Tarifna stavka za isporučenu količinu plina – za razdoblje od 1. travnja do 30. rujna 2024.	Ts1	TM1	0,0264	0,0032	0,0066	0,0362	EUR/kWh
		TM2		0,0032		0,0362	EUR/kWh
		TM3		0,0028		0,0358	EUR/kWh
		TM4		0,0027		0,0357	EUR/kWh
		TM5		0,0024		0,0354	EUR/kWh
		TM6		0,0022		0,0352	EUR/kWh
		TM7		0,0021		0,0351	EUR/kWh
		TM8		0,0020		0,0350	EUR/kWh
		TM9		0,0019		0,0349	EUR/kWh
		TM10		0,0019		0,0349	EUR/kWh
		TM11		0,0016		0,0346	EUR/kWh
		TM12		0,0013		0,0343	EUR/kWh

### 3. REZULTATI

U navedenom poglavlju bit će prikazani rezultati prostorne i tehno-ekonomske analize za implementaciju geotermalne bušotine i solarnih kolektora unutar CTS grada Karlovca.

#### 3.1. Rezultati prostorne analize

Na Slika 11. prikazani su grafički rezultati metode koja je opisana ranije. Iz atributne tablice konačno dobivenog sloja grafički su prikazane površine koje su potencijalne za instalaciju solarnih kolektora. Uvjet je bio da su te površine veće od 2000 m<sup>2</sup>. Ukupno je 9 odabranih zemljišta te je prikazan i položaj Gradske toplane Karlovac u odnosu na površine solarnih polja.



**Slika 11. Moguće lokacije instalacije solarnih kolektora u gradu Karlovcu**

Da bi se dobio grafički prikaz (Slika 12.), u završnom vektorskom sloju koristi se opcija "Svojstva sloja" (eng. *Layer Properties*) za završni vektorski sloj i primjenjuje opcija "Postupni prikaz" (eng. *Graduated*) u kartografskim stilovima za vizualizaciju različitih razina (prema intenzitetu boje) potencijala godišnje proizvodnje toplinske energije.



**Slika 12. potencijal godišnje proizvodnje toplinske energije pojedinog zemljišta**

Ovaj izračun omogućuje procjenu ukupne količine toplinske energije koja se može generirati na temelju instalirane površine solarnih kolektora i specifičnih uvjeta zračenja na području grada Karlovca.

Za svako zemljište izračunata je njegova površina, a na temelju toga i površina koja bi mogla biti prekrivena solarnim kolektorima (Tablica 5). Također prikazani i potencijali godišnje proizvedene toplinske energije u MWh te je dana udaljenost pojedinog solarnog polja od Gradske toplane Karlovac.

**Tablica 5. Pripadajuća atributna tablica konačnog vektorskog sloja**

Zemljište	Površina (m <sup>2</sup> )	Površina solarnih kolektora (m <sup>2</sup> )	Specifični potencijal proizvodnje toplinske energije (MWh/m <sup>2</sup> )	Potencijal godišnje proizvodnje toplinske energije (MWh)	Udaljenost solarnog polja od CTS (m)
1	34785.52	6874.609	0.985	6771.782	1800
2	32244.97	6372.523	0.985	6277.206	1750
3	16329.29	3227.132	0.985	3178.862	2170
4	15462.61	3055.851	0.985	3010.143	2300
5	15006.95	2965.800	0.985	2921.439	2170
6	13294.62	2627.395	0.985	2588.096	2200
7	12760.91	2521.919	0.985	2484.197	1270
8	11831.2	2338.181	0.985	2303.208	2120
9	10448.64	2064.948	0.985	2034.062	2140

Iz podataka iz Tablica 6., vidimo da je ukupna godišnja proizvodnja toplinske energije iz solarnih kolektora 24.569,824 MWh.

**Tablica 6. statistički podaci o godišnjoj proizvodnji toplinske energije iz solarnih kolektora**

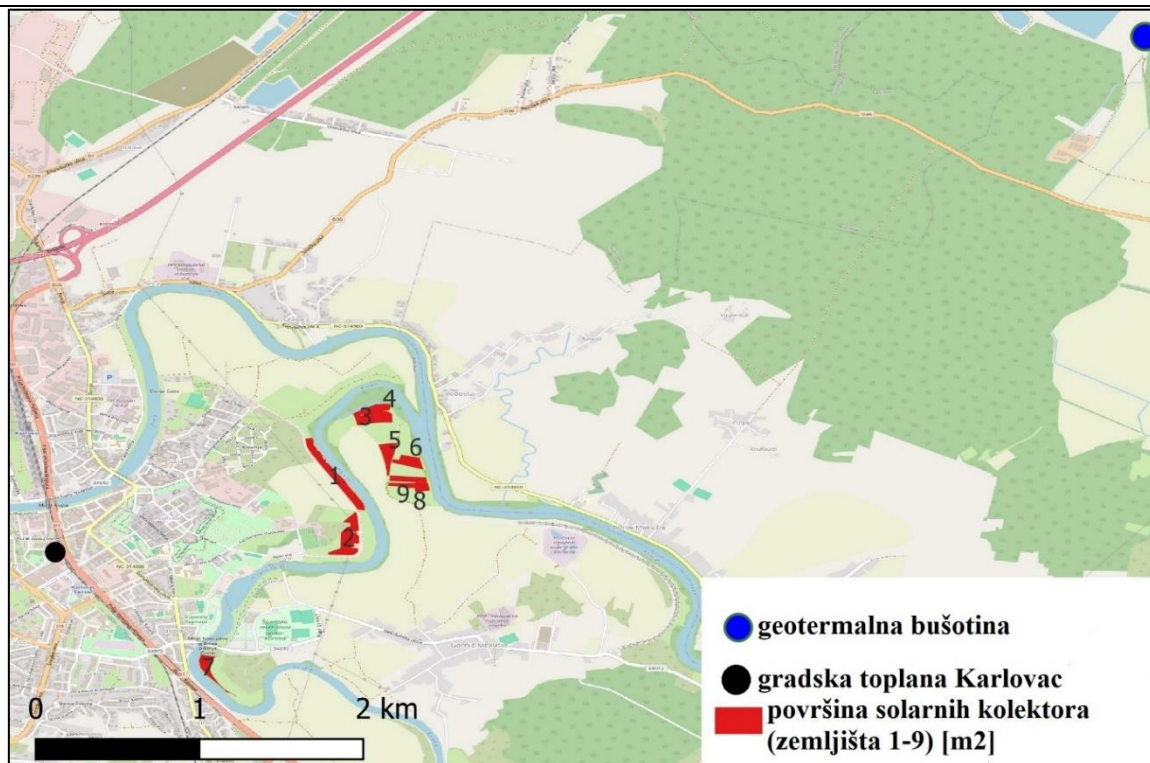
Broj čestica	9
Suma	24,569.824 MWh
Srednja vrijednost	2729.98 MWh
Medijan	2921.439 MWh
Minimum	2034.062 MWh
Maksimum	6771.782 MWh

U usporedbi s godišnje isporučenom toplinom za Karlovac, koja iznosi 49 407.536 MWh, solarni kolektori bi mogli pokriti približno 50% ukupne potreba za toplinskom energijom grada. Najniža godišnja proizvodnja toplinske energije dolazi sa zemljišta broj 9, s 2.034,062 MWh, dok zemljište broj 1 može proizvesti najviše, 6.771,782 MWh. Iako solarni kolektori ne bi mogli pokriti cijeli energetska zahtjev grada, oni bi značajno smanjili ovisnost o tradicionalnim izvorima energije, kao što je prirodni plin, te doprinijeli uštedi energije i smanjenju emisija.

Za preostalu količinu toplinske energije, bilo bi potrebno osloniti se na druge izvore energije, kao što su geotermalni izvori ili postojeći fosilni izvori, što dodatno naglašava potrebu za optimiziranjem korištenja više obnovljivih izvora.

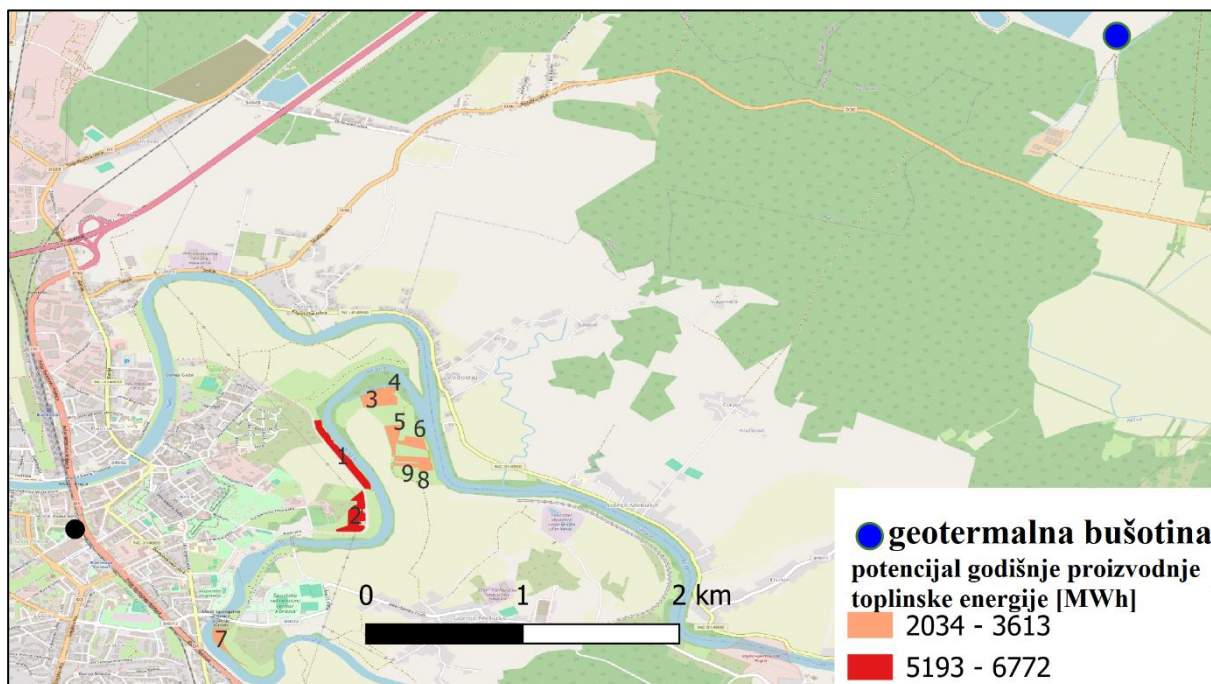
Odabrana lokacija za plitku geotermalnu bušotinu je geotermalni vodonosnik u karbonatnom kompleksu Rečica otkriven istražnim bušotinama Ka-2 i Ka-3 koje su izrađene 1983. i 1988. godine. Trgovačko društvo GeotermiKA d.o.o. je nakon provedenog natječaja, od Ministarstva zaštite okoliša i energetike dobilo dozvolu za istraživanje geotermalnih voda u navedenom istražnom prostoru gdje su dokazane temperature vode od oko 140 °C na otprilike 3 km dubine. U skladu s navedenim, pretpostavlja se da bi i izrada plitkih geotermalnih bušotina za iskorištavanje toplinske energije bila moguća i isplativa. Navedeno istražno područje nalazi se na 8 km udaljenosti od Gradske toplane Karlovac što je vidljivo na Slika 13.

Pretpostavka ovog završnog rada je da će za izgradnju transmisijske i distribucijske mreže geotermalne energije u Karlovcu bit potrebne dvije stanice izmjenjivača topline kako bi se omogućila učinkovita opskrba energijom kroz sustav.



**Slika 13. Pozicija geotermalne elektrane u odnosu na gradsku toplanu i površina solarnih kolektora**

Na Slika 14. prikazan je konačan vektorski sloj na kojemu je prikazan potencijal godišnje proizvodnje toplinske energije u gradu Karlovcu na 9 odabranih zemljišta te je prikazana i lokacija geotermalne bušotine.



**Slika 14. grafički prikaz rezultata prostorne analize**

### 3.2. Rezultati tehno-ekonomske analize za plitku geotermalnu bušotinu

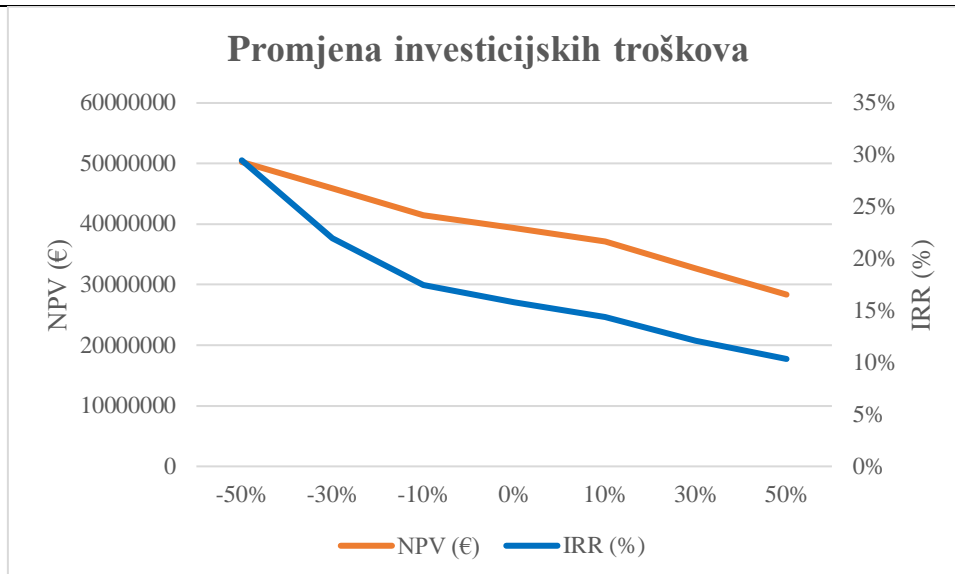
U Tablica 7. dani su rezultati tehno-ekonomske analize za implementaciju plitke geotermalne bušotine u CTS grada Karlovca.

**Tablica 7. Rezultati tehno – ekonomske analize za plitku geotermalnu bušotinu**

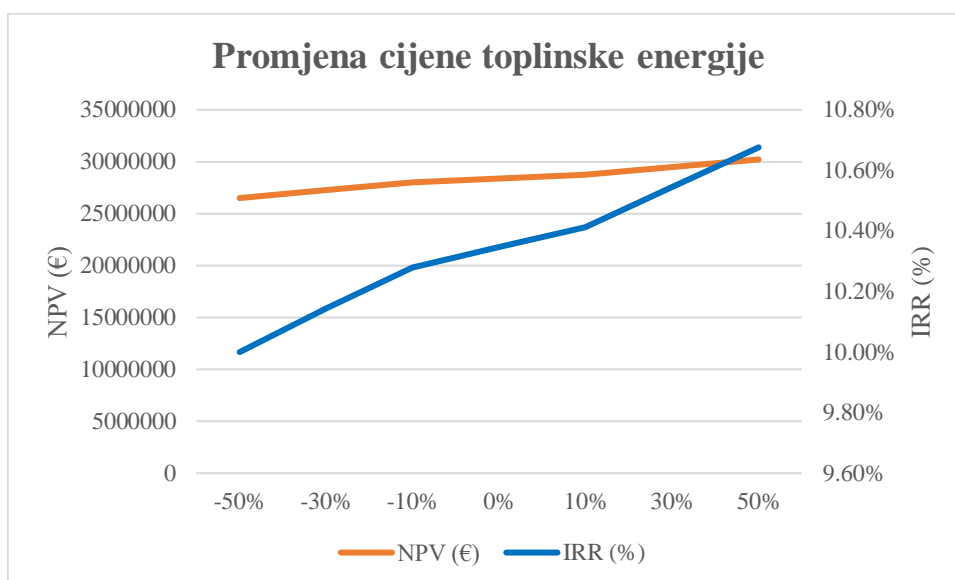
Veličina	Iznos	Jedinica
Duljina cjevovoda	8000	m
Broj bušotina	2	-
Investicijski troškovi	31 272 080	€
Varijabilni troškovi održavanja	4467	€
Godišnji prihod od prodaje toplinske energije	1 608 120	€
Godišnja ušteda učinkovitijeg sustava	2 403 884	€
NPV	2 861 707.89	€
IRR	10.3458	%
LCOH	54.19	€/MWh

Investicijski troškovi su vrlo visoki prije svega zbog investicijskih troškova koji se odnose na izmjenjivače topline te zbog dosta velike udaljenosti bušotine od Gradske toplane. Investicija se smatra isplativom jer su ključni financijski pokazatelji pozitivni. Neto sadašnja vrijednost iznosi 2 861 707.89 €, što znači da projekt generira značajan višak vrijednosti iznad početnih troškova. Unutarnja stopa povrata iznosi 10,3458%, što je iznad tipičnih troškova kapitala, sugerirajući da je povrat na ulaganje atraktivan. Dodatno, implementacija novog sustava donosi velike godišnje uštede zbog njegove veće energetske učinkovitosti u usporedbi s postojećim sustavom na plin. Ove uštede ne samo da smanjuju troškove grijanja, već i smanjuju ovisnost o skupljim i ekološki nepovoljnijim izvorima energije poput prirodnog plina.

U ovom radu provedena je analiza osjetljivosti financijskih pokazatelja NPV i IRR obzirom na promjene u prodajnoj cijeni toplinske energije te promjene investicijskih troškova. Analizirane su promjene od +50 %, +30%, +10%, 0% (referentni slučaj), -10% i -30%, -50%. Rezultati su prikazani na Slika 15. i na Slika 16.



**Slika 15. Analiza osjetljivosti s obzirom na promjenu investicijskog troška**



**Slika 16. Analiza osjetljivosti s obzirom na promjenu u cijeni toplinske energije**

Ova analiza omogućila je detaljan uvid u utjecaj fluktuacija ključnih parametara na isplativost projekta, pri čemu veći postotci u cijeni toplinske energije povoljno utječu na NPV i IRR, dok povećanje investicijskih troškova smanjuje profitabilnost projekta.



### 3.3. Rezultati tehno-ekonomske analize za solarne kolektore

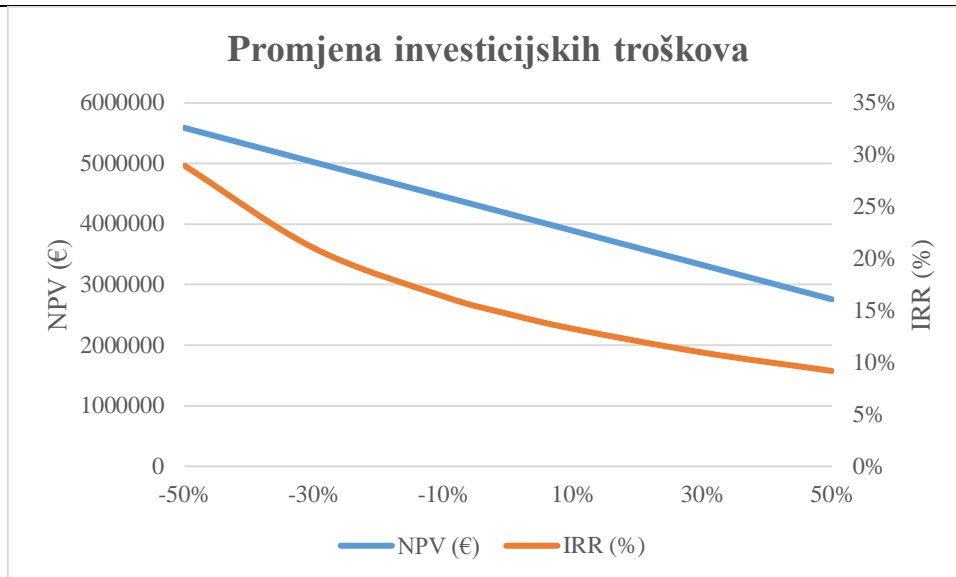
U Tablica 8. prikazani su rezultati tehno-ekonomske analize za implementaciju solarnog polja označenog kao zemljište 1.

**Tablica 8. Rezultati tehno-ekonomske analize za implementaciju solarnog polja označenog kao zemljište 1**

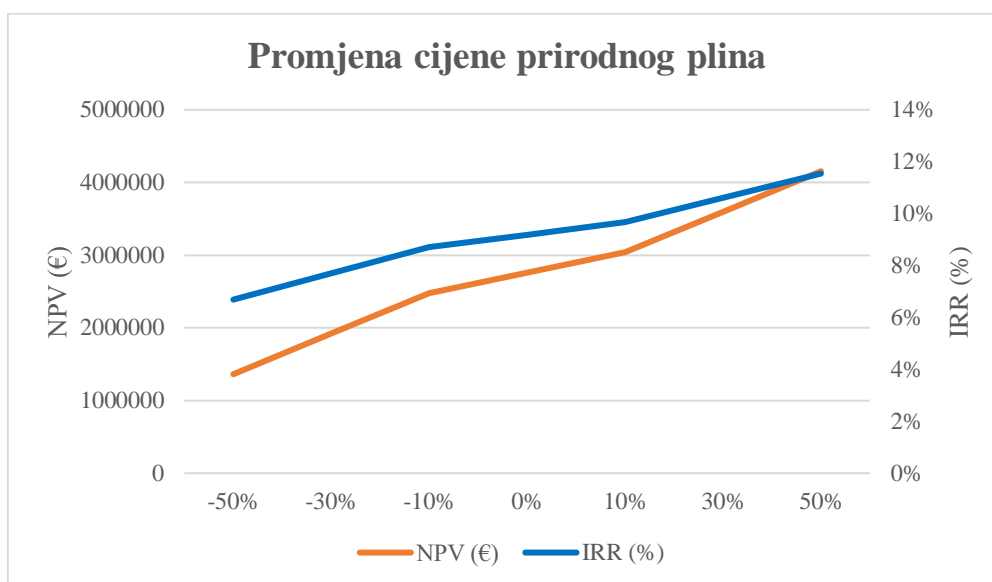
Veličina	Iznos	Jednica
Površina solarnog polja	6874.61	m <sup>2</sup>
Potencijal god.proizvodnje toplinske energije	6771.78	MWh
Duljina cjevovoda	1800	m
Fiksni O&M	541.742	€
Variable O&M	2031.534	€
Investicijski trošak	395	€/MWh
zarada od prodaje toplinske energije	249 201.57	€
ušteda na plinu	178 775.044	€
NPV	2 758 435.81	€
IRR	9.1928	%
LCOH	31.132	€/MWh

Analiza pokazuje da je projekt profitabilan te da zadovoljava kriterije isplativosti. Prema podacima iz tablice, LCOH iznosi 31.132 €/MWh, što je zadovoljavajuće u odnosu na prihvaćene standarde i usporedbe s troškovima tradicionalnih energenata. Ovaj rezultat ukazuje na ekonomsku isplativost projekta i njegovu konkurentnost na tržištu energije.

Za najperspektivnije solarno polje, zemljište 1, koje ima najveću godišnje proizvedenu toplinsku energiju te najbolje vrijednosti NPV, IRR i LCOH provedena je analiza osjetljivosti u ovom radu. Ova analiza prikazuje kako promjene investicijskog troška i cijene prirodnog plina utječu na ključne financijske pokazatelje, NPV i IRR. Analiza osjetljivosti provedena je uzimajući u obzir promjene od +50, +30%, +10%, 0%, -10% i -30%, -50% u investicijskim troškovima te promjene u cijeni prirodnog plina u istim postotcima. Rezultati analize osjetljivosti prikazani su na Slika 17. i Slika 18.



**Slika 17. Prikaz analize osjetljivosti obzirom na promjenu investicijskog troška**



**Slika 18. Prikaz analize osjetljivosti s obzirom na promjene cijene prirodnog plina**

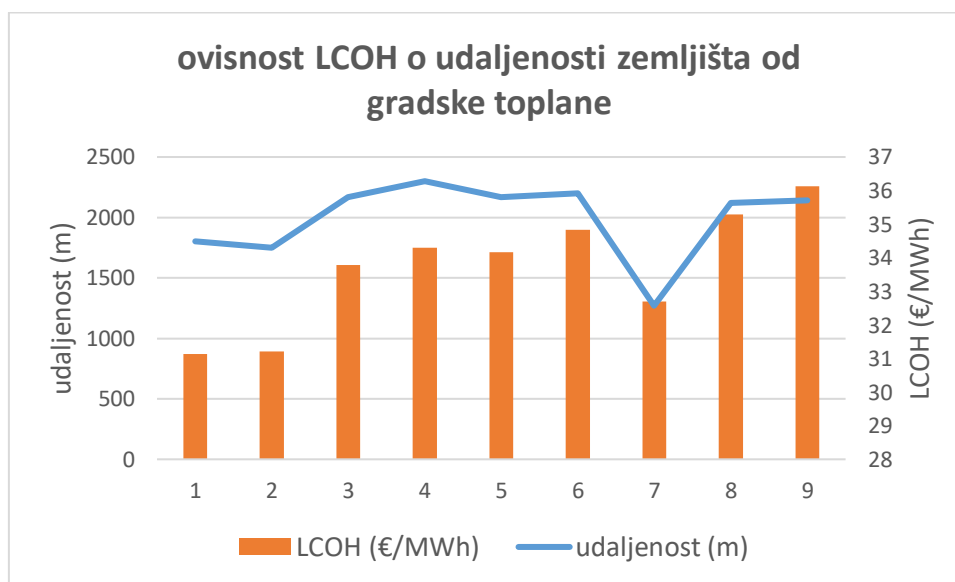
Iz rezultata analize vidljivo je da promjene investicijskog troška imaju značajan utjecaj na NPV i IRR. Povećanje investicijskih troškova smanjuje profitabilnost projekta, dok njihovo smanjenje pozitivno utječe na ove financijske pokazatelje. Slično tome, povećanje cijene prirodnog plina pozitivno utječe na NPV i IRR, budući da se tada povećava i ušteda na plinu, što dodatno poboljšava ekonomsku isplativost projekta.

Rezultati tehno-ekonomske analize za preostalih osam zemljišta prikazani su u Tablica 9. Međusobno se razlikuju po površinu svakog zemljišta, potencijalu godišnje proizvedene toplinske energije te udaljenosti od gradske toplane (shodno tome razlikovat će se investicijski trošak svakog pojedinog polja).

**Tablica 9. Rezultati tehno-ekonomske analize za preostala solarna polja**

Oznaka zemljišta	Površina solarnog polja (m <sup>2</sup> )	Potencijal god. proizvodnje toplinske energije (MWh)	Duljina cjevovoda (m)	NPV (€)	IRR (%)	LCOH (€/MWh)
2	6372.523	6277.206	1750	3,860,511.30	14.634	31.214
3	3227.132	3178.862	2170	1,826,187.96	13.287	33.778
4	3055.851	3010.143	2300	1,704,659.33	13.038	34.295
5	2965.800	2921.439	2170	1,660,669.87	13.103	34.159
6	2627.395	2588.096	2200	1,443,326.15	12.783	34.840
7	2521.919	2484.197	1270	1,469,846.72	13.835	32.690
8	2338.181	2303.208	2120	1,268,176.6	12.579	35.287
9	2064.948	2034.062	2140	1,093.113.83	12.211	36.123

Na Sliku 19. prikazana je ovisnost LCOH o udaljenosti pojedinog zemljišta od gradske toplane. Vidljivo je da s porastom udaljenosti od toplane dolazi do smanjenja LCOH-a. Ovaj trend može se objasniti činjenicom da veća udaljenost zahtijeva veće troškove prijenosa toplinske energije, a time i veći investicijski trošak.

**Slika 19. Ovisnost LCOH o udaljenosti zemljišta od gradske toplane**

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu provedena je detaljna prostorna i tehno-ekonomska analiza potencijala solarnih kolektora i plitkih geotermalnih izvora unutar centraliziranog toplinskog sustava grada Karlovca. Nakon provedene prostorne analize, odabrano je devet zemljišta, svako površine veće od 2000 m<sup>2</sup>, koja pokazuju najveći potencijal godišnje proizvodnje toplinske energije. Ukupno, odabrana zemljišta omogućuju godišnju proizvodnju od 24 000 MWh toplinske energije, što predstavlja 55% ukupno isporučene toplinske energije za grad Karlovac. Rezultati tehno-ekonomske analize pokazuju da su svih devet solarnih polja profitabilna. Svi analizirani solarni sustavi imaju pozitivnu vrijednost NPV, IRR veći od diskontne stope (4%) te konkurentan LCOH u odnosu na troškove grijanja plinom. Za solarno polje koje se nalazi na zemljištu 1, NPV iznosi 2 758 435.81 €, IRR je 9.1928 %, a LCOH iznosi 31.132 €/MWh.

Iz rezultata analize osjetljivosti vidljivo je da promjene investicijskog troška imaju značajan utjecaj na NPV i IRR. Povećanje investicijskih troškova smanjuje profitabilnost projekta, dok njihovo smanjenje pozitivno utječe na ove financijske pokazatelje. Slično tome, povećanje cijene prirodnog plina pozitivno utječe na NPV i IRR, budući da se tada povećava i ušteda na plinu, što dodatno poboljšava ekonomsku isplativost projekta.

Odabrana lokacija za plitku geotermalnu bušotinu dubine 300 m je geotermalni vodonosnik u karbonatnom kompleksu Rečica otkriven istražnim bušotinama Ka-2 i Ka-3 udaljen 8 km od Gradske toplane Karlovac. Zbog toga ovaj projekt integracije te bušotine u CTS ima visoke investicijske troškove. Svejedno, Investicija se smatra isplativom jer su ključni financijski pokazatelji pozitivni. Neto sadašnja vrijednost iznosi 2 861 707.89 €, što znači da projekt generira značajan višak vrijednosti iznad početnih troškova. Unutarnja stopa povrata iznosi 10,3458%, LCOH iznosi 54.19 €/MWh. Analiza osjetljivosti pokazala je očekivane rezultate, pri čemu pozitivni postotci u promjeni cijeni toplinske energije povoljno utječu na NPV i IRR, dok povećanje investicijskih troškova smanjuje profitabilnost projekta.

**LITERATURA**

- [1] Debbarma, J., & Choi, Y. (2022). A taxonomy of green governance: A qualitative and quantitative analysis towards sustainable development. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103693>
- [2] Zajacs, A., Bogdanovičs, R., Zeiza-Seleznova, A., Valančius, R., & Zemītis, J. (2022). Integration of decentralized solar collectors into a district heating system. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103920. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103920>
- [3] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- [4] Ofosu-Mensah Ababio, J., Yiadom, E. B., Mawutor, J. K. M., Tuffour, J. K., & Attah-Botchwey, E. (2024). Sustainable energy for all: the link between financial inclusion, renewable energy and environmental sustainability in developing economies. *International Journal of Energy Sector Management*, 18(5), 1088–1108. <https://doi.org/10.1108/IJESM-07-2023-0012>
- [5] Perez-Mora, N., Bava, F., Andersen, M., Bales, C., Lennermo, G., Nielsen, C., Furbo, S., & Martínez-Moll, V. (2018). Solar district heating and cooling: A review. *International Journal of Energy Research*, 42(4), 1419–1441. <https://doi.org/10.1002/er.3888>
- [6] Kreuzberg, D. (2020). *Renewable Energy Projects in Berlin*. Berlin Energy Institute. [Online]; 2020. Pristupljeno: 2024. kolovoz . Preuzeto s: <https://www.charite.de/>
- [7] Malmö City Council. (2018). *Solar City Malmö: Integrating Solar Technology into Urban Planning*. [Online]; 2020. Pristupljeno: 2024 kolovoz. Preuzeto s: <https://malmo.se/>
- [8] Gómez, J. A. (2021). *Solar Thermal Energy in Spain: The PS10 Project*. Spanish Solar Energy Research. [Online]. Pristupljeno: 2024 kolovoz]. Preuzeto s: <https://www.abengoa.com/web>
- [9] Pauschinger, T. (2016). Solar thermal energy for district heating. In *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems* (pp. 99–120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00005-7>
- [10] Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., & Xiang, W. (2015). Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics*, 53, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>

- [11] Tugcu, A., & Arslan, O. (2017). Optimization of geothermal energy aided absorption refrigeration system—GAARS: A novel ANN-based approach. *Geothermics*, 65, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.004>
- [12] Olasolo, P., Juárez, M. C., Olasolo, J., Morales, M. P., & Valdani, D. (2016). Economic analysis of Enhanced Geothermal Systems (EGS). A review of software packages for estimating and simulating costs. *Applied Thermal Engineering*, 104, 647–658. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.073>
- [13] Upgrade DH Consortium. *Priručnik za modernizaciju sustava centraliziranog grijanja*. Upgrade DH, 2019. [Online] Pristupljeno: 2024 rujan. Dostupno na: [https://www.upgrade-dh.eu/images/Publications%20and%20Reports/D2.5\\_2019-05-14\\_UpgradeDH\\_Handbook\\_HR.pdf](https://www.upgrade-dh.eu/images/Publications%20and%20Reports/D2.5_2019-05-14_UpgradeDH_Handbook_HR.pdf)
- [14] Na Sunčanoj Strani. *Solarne elektrane - razlike u proizvodnji u različitim dijelovima Hrvatske*. Na Sunčanoj Strani, [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://nasuncanojstrani.hr/solarne-elektrane-razlike-u-proizvodnji-u-razlicitim-dijelovima-hrvatske/>.
- [15] Termometal. *Solarni sustavi - ušteda i ekologija*. Termometal, [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://termometal.hr/blog/obnovljivi-izvori/solarni-sustavi-usteda-ekologija-77/>.
- [16] Karlovačka županija. *Analiza solarnog potencijala Karlovačke županije*. Karlovačka županija, [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: [https://www.kazup.hr/images/28\\_Analiza\\_solarnog\\_potencijala\\_Karlova%C4%8Dke\\_%C5%BEupanije.pdf](https://www.kazup.hr/images/28_Analiza_solarnog_potencijala_Karlova%C4%8Dke_%C5%BEupanije.pdf).
- [17] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. *Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030*. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Plan%20razvoja%20geotermalnog%20potencijala%20Republike%20Hrvatske%20do%202030..pdf>.
- [18] Macenić, M., Kurevija, T., & Strpić, K. (2020). *Systematic review of research and utilization of shallow geothermal energy in Croatia*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109470. [Online] Pristupio: rujan 2024. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/309844>.

- [19] Kurevija, T., Kljaić, M., & Vulin, D. (2018). *Analiza iskorištavanja geotermalne energije na geotermalnom polju Karlovac*. Tehnički vjesnik, 25(1), 233-241. [Online] Pristupio: rujan 2024. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/309844>.
- [20] IT Projekt - Gradska toplana Karlovac." Gradska toplana Karlovac. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://ituprojekt.gradska-toplana.hr/>.
- [21] Europska Komisija. (2017), *Sveobuhvatna procjena potencijala za učinkovito grijanje i hlađenje u Hrvatskoj prema Prilogu VIII. Direktive 2012/27/EU*. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/201709/croatia\\_report\\_eed\\_art\\_141update\\_hr\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/201709/croatia_report_eed_art_141update_hr_0.pdf)
- [22] "Corine Land Cover - Copernicus Land Monitoring Service." Copernicus Land Monitoring Service. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>.
- [23] "Bioportal - GIS." Bioportal Hrvatska. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://bioportal.hr/gis/>
- [24] O nama. ARKOD. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://arkod.hr/o-nama/>
- [25] "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)." Joint Research Centre, European Commission. Dostupno na: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en).
- [26] "Cjenik Centralnog toplinskog sustava Karlovac - 2023." Gradska toplana Karlovac. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://www.gradska-toplana.hr/userfiles/files/CJENIK%20CTS%20-%202023pdf.pdf>.
- [27] "Referentna i diskontna stopa te stopa povrata potpore." Ministarstvo financija Republike Hrvatske. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://mfin.gov.hr/istaknute-teme/koncesije-i-drzavne-potpore/drzavne-potpore/referentna-i-diskontna-stop-a-te-stop-a-povrata-potpore/468>.
- [28] Danish Energy Agency. *Technology Data Catalogue for Electricity and District Heating*. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology\\_data\\_catalogue\\_for\\_el\\_and\\_dh.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_el_and_dh.pdf).

---

[29] Virtualni Ured. *Stope Amortizacije i Otpisa Dugotrajne Imovine*. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://www.virtualni-ured.net/racunovodstvo/item/321-stope-amortizacije-otpisa-dugotrajne-imovine.html>.

[30] Minja Commerc. *Korugirane Cijevi Unutarnjeg Promjera 400*. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: <https://minja-commerc.hr/cijevi-korugirane/korugirane-cijevi-unutarnjeg-promjera-400>.

[31] Hrvatska energetska regulatorna agencija. *Obavijest o Promjenama u Regulaciji*. [Online] Pristupljeno: rujan 2024. Dostupno na: [https://www.hera.hr/hr/docs/2024/Obavijest\\_2024-03-22.pdf](https://www.hera.hr/hr/docs/2024/Obavijest_2024-03-22.pdf).