

# Tehno-ekonomska analiza dekarbonizacije sustava grijanja višestambenih objekata korištenjem modela FeFlow i RES2GEO

---

Ređep, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:140396>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA DEKARBONIZACIJE SUSTAVA GRIJANJA  
VIŠESTAMBENIH OBJEKATA KORIŠTENJEM MODELA FEFLOW I RES2GEO**

Diplomski rad

Ana Redep

N 412

Zagreb, 2023.

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA DEKARBONIZACIJE SUSTAVA GRIJANJA VIŠESTAMBENIH  
OBJEKATA KORIŠTENJEM MODELA FEFLOW I RES2GEO

Ana Ređep

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kako bi se smanjile klimatske promjene na koje utječu emisije štetnih plinova koji nastaju proizvodnjom električne i toplinske energije, popularnost obnovljivih izvora energije raste. Sve veća potreba za korištenjem obnovljivih izvora energije te težnja izgradnji stambenih objekata nulte energije dovela je do potrebe za korištenjem geotermalne energije pomoću dizalica topline u kombinaciji sa solarnim elektranama što će biti i obrađeno u ovom radu. Geotermalne dizalice topline koriste se u domovima za hlađenje i grijanje prostorija bez štetnih utjecaja na okoliš. Kako bi dizalice topline radile, potrebno im je dovesti električnu energiju koja nekada ne dolazi iz čistih izvora, odnosno obnovljivih izvora energije. Stoga se smatra da nisu u potpunosti obnovljivi izvor energije. Potrebno je poznavati hidrogeološke parametre te arhitektonsko oblikovanje stambenog prostora kako bi se sustav mogao optimizirati, odnosno da se na što kvalitetniji način poveća koeficijent učinkovitosti dizalica topline. Za proračun slučajeva u ovom radu korišteni su program FeFlow i model RES2GEO koji su pokrenuti pomoću programskog jezika Python. Osim tehnološke analize, obrađena je i ekonomska analiza kako bi se utvrdila isplativost projekta.

Ključne riječi: dizalica topline, bušotinski izmjenjivači topline, FeFlow, RES2GEO, geotermalna energija, obnovljivi izvori energije

Diplomski rad sadrži: 53 stranice, 7 tablica, 30 slika i 42 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

Pomoć pri izradi: Amalia Lekić Brettschneider, mag. ing. petrol., asistentica

Ocjenjivači: Dr.sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

Dr.sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNF

Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF

Datum obrane: 18.09.2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF DECARBONIZATION OF THE HEATING SYSTEM OF MULTI-RESIDENTIAL BUILDINGS USING THE FEFLOW AND RES2GEO MODELS

Ana Redep

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

There is an increase in popularity of sources of renewable energy, fueled by the need to reduce emissions of harmful gases as a byproduct of the use of electricity and heating. The growing need for renewable energy sources, along with a proclivity for building zero-energy houses, has given rise to the use of heat pumps in addition to solar power arrays, and this new trend will be the topic of this thesis. The use of ground source heat pumps for indoor cooling and heating does not have any harmful environmental effects. To function, these heat pumps need electricity, which does not always come from clean or renewable energy sources, which in turn means they are not considered fully renewable energy sources. To optimize the heat pumps, and maximize their efficiency coefficient, the hydrogeological parameters and architectural design of the living space should be considered. The computations of the individual cases in this thesis are done using the FeFlow and RES2GEO models, in the Python programming language. The technological analysis will be followed by a financial analysis to determine the cost-effectiveness of the project.

Keywords: heat pump, borehole heat exchangers, FeFlow, RES2GEO, geothermal energy, renewable energy sources

Thesis contains: 53 pages, 7 tables, 30 figures and 42 references

Original in: Croatian

Archived in: Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Luka Perković, Ph.D. RGNF

Technical assistance: Assistant Amalia Lekić Brettschneider, mag. ing. petrol.,

Reviewers: Associate Professor Luka Perković, Ph.D.

Full Professor Tomislav Kurevija, Ph.D.

Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, Ph.D.

Defence date: September 18, 2023, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering.

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS KRATICA.....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA .....</b>	<b>V</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANALIZA TOPLINSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije u Republici Hrvatskoj.....</b>	<b>4</b>
<b>3. ENERGETSKI RAZVOJ ZGRADARSTVA.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Energetska svojstva zgrada .....</b>	<b>7</b>
<b>4. KORIŠTENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1. Primjena obnovljivih izvora energije u zgradama .....</b>	<b>10</b>
<b>5. DIZALICE TOPLINE .....</b>	<b>12</b>
<b>5.1. Tipovi dizalica topline.....</b>	<b>12</b>
<b>5.2. Princip rada dizalice topline.....</b>	<b>14</b>
<b>5.3. Prednosti i nedostaci dizalica topline .....</b>	<b>16</b>
<b>5.4. Bušotinski izmjenjivači topline.....</b>	<b>17</b>
<b>6. KLASIFIKACIJA VODONOSNIKA .....</b>	<b>19</b>
<b>6.1. Utjecaj podzemnih voda na prijenos topline.....</b>	<b>20</b>
<b>6.2. Uloga vodonosnika u iskorištavanju geotermalne energije za potrebe grijanja i     hladenja .....</b>	<b>20</b>
<b>7. METODOLOGIJA .....</b>	<b>21</b>
<b>7.1. Računalni program RES2GEO .....</b>	<b>21</b>
<b>7.2. Računalni program FeFlow .....</b>	<b>21</b>
<b>8. SCENARIJ UPOTREBE DIZALICE TOPLINE ZA GRIJANJE I HLAĐENJE STAMBENOG NEBODERA.....</b>	<b>23</b>
<b>8.1. Arhitektonsko oblikovanje i fizikalne karakteristike stambenog nebodera .....</b>	<b>23</b>

<b>8.2. Hidrogeološke postavke scenarija u računalnim programima RES2GEO i FeFlow .....</b>	<b>25</b>
<b>8.3. Analiza rezultata pojedinih scenarija .....</b>	<b>30</b>
8.3.1. Ekonomska analiza .....	42
<b>9. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>48</b>
<b>10. LITERATURA .....</b>	<b>50</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Tok toplinske energije centraliziranog toplinskog sustava u RH u 2021. godini .....	3
<b>Slika 2-2.</b> Proizvodnja toplinske energije za kućanstva iz CTS-a u RH u razdoblju od 2016. do 2021. godine .....	5
<b>Slika 2-3.</b> Omjer korištenih energenata za proizvodnju toplinske energije individualnog grijanja.....	6
<b>Slika 3-1.</b> Primjer karakteristika zgrade koje utječu na energetska svojstva .....	8
<b>Slika 4-1.</b> Korištenje obnovljivih izvora energije u zgradama.....	11
<b>Slika 5-1.</b> Primjer rada dizalice topline sustava zrak-voda.....	13
<b>Slika 5-2</b> Primjeri dizalica topline s podzemnim izvorima topline .....	14
<b>Slika 5-3.</b> Skica procesa rada dizalice topline.....	15
<b>Slika 5-4.</b> Tipovi bušotinskih izmjenjivača topline; a) jednostruka U-cijev; b) dvostruka U-cijev; c) koaksijalni tip cijevi .....	18
<b>Slika 6-1.</b> Ilustracijski prikaz vodonosnika.....	20
<b>Slika 8-1</b> Potrebna toplina za grijanje izražena u kWh/m <sup>2</sup> .....	25
<b>Slika 8-2.</b> 3D i 2D prikaz modela s bušotinskim izmjenjivačima topline iz programa FeFlow26	
<b>Slika 8-3.</b> Podaci koaksijalnog tipa izmjenjivača topline .....	27
<b>Slika 8-4.</b> Prikaz pozicija bušotinskih izmjenjivača topline za sva četiri slučaja: (a) 6; (b) 8; (c) 10; (d) 16 .....	27
<b>Slika 8-5.</b> Početni rubni uvjeti temperature iz programa FeFlow .....	29
<b>Slika 8-6.</b> Prikaz početnih uvjeta razlike visina sjeverne i južne strane iz programa FeFlow..	29
<b>Slika 8-7.</b> Prikaz električne ravnoteže za sva četiri slučaja .....	30
<b>Slika 8-8.</b> Prikaz toplinske ravnoteže sustava za sva četiri slučaja .....	31
<b>Slika 8-9.</b> Godišnja energetska ravnoteža u sva četiri slučaja .....	32
<b>Slika 8-10.</b> Stanje napunjenosti baterije u sva četiri slučaja; SoC – napunjenost baterije (engl. State of Charge) .....	33
<b>Slika 8-11.</b> Prosječna temperatura ležišta za sva četiri slučaja .....	34
<b>Slika 8-12.</b> Ulazne i izlazne temperature u bušotinskim izmjenjivačima topline .....	35
<b>Slika 8-13.</b> Maseni protok za sva četiri slučaja.....	36
<b>Slika 8-14.</b> Koeficijent učinkovitosti za sva četiri slučaja.....	37

<b>Slika 8-15.</b> Prikaz stanja ležišta u sva četiri scenarija, 01.07.....	38
<b>Slika 8-16.</b> Prikaz stanja ležišta u 3D-u u sva četiri scenarija, 01.07.....	39
<b>Slika 8-17.</b> Prikaz stanja ležišta u sva četiri scenarija, 31.12.....	40
<b>Slika 8-18.</b> Prikaz stanja ležišta u 3D-u u sva četiri scenarija, 31.12.....	41
<b>Slika 8-19.</b> Grafički prikaz diskontinuiranog i kumulativnog neto novčanog toka u sva četiri slučaja.....	46
<b>Slika 8-20.</b> Grafički prikaz diskontinuiranog i kumulativnog neto novčanog toka solarne elektrane .....	46



## POPIS TABLICA

<b>Tablica 8-1.</b> Površina stanova bez balkona, m <sup>2</sup> .....	23
<b>Tablica 8-2.</b> Ulazni podaci za proračun potrebne topline grijanja zgrade .....	24
<b>Tablica 8-3.</b> Tablični prikaz ulaznih podataka za četiri različita scenarija .....	25
<b>Tablica 8-4.</b> Postavke podataka za provodljivost, poroznost i volumetrijski toplinski kapacitet gline, šljunka i pijeska u FeFlow-u .....	28
<b>Tablica 8-5.</b> Ulazni podaci za ekonomsku analizu dizalice topline .....	43
<b>Tablica 8-6.</b> Ulazni podaci za ekonomsku analizu solarne elektrane .....	44
<b>Tablica 8-7.</b> Rezultati LCOE-a za svaki pojedini slučaj .....	44

## POPIS KRATICA

BHE – bušotinski izmjenjivač topline (engl. *Borehole Heat Exchanger*)

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid

CTS – centralni toplinski sustav

E<sub>batmax</sub> – kapacitet baterije

EIHP – Energetski institut Hrvoje Požar

EL-TO – elektrana toplana

EPC troškovi – troškovi inženjeringa, nabave i izgradnje (engl. *engineering, procurment and construction cost*)

EST – ulazna temperatura (engl. *entering source temperature*)

EU – Europska unija

GSHP – dizalice topline s podzemnim izvorom topline (engl. *Ground Source Heat Pump*)

IEA – Međunarodna agencija za energiju (engl. *International Energy Agency*)

LCOE – trošak energije (engl. *levelized cost of energy*)

LST – izlazna temperatura (engl. *leaving source temperature*)

MACRS – modificirani sustav ubrzanog povrata troškova (engl. *Modified Accelerated Cost Recovery System*)

MGPI – Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine

N<sub>wells</sub> – broj bušotinskih izmjenjivača topline

P<sub>bat</sub> – snaga baterije

P<sub>heatermax</sub> – snaga električnog grijača

P<sub>HP</sub> – snaga dizalice topline

P<sub>PV</sub> – snaga instaliranog solarnog sustava

RES2GEO – obnovljivi izvori energije do geotermalne energije (engl. *Renewable Energy Soruce to Geothermal*)

RH – Republika Hrvatska

SoC – napunjenost baterije (engl. *State of Charge*)

T<sub>Rlimit</sub> – maksimalna temperatura ležišta

TE-TO – termoelektrana – toplana

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

°C – celzijev stupanj

°C/m – celzijev stupanj po metru

€ - euro

€/kW – euro po kilovatu

€/m – euro po metru

€/MWh – euro po megavatsatu

COP – koeficijent učinkovitosti

GWh – gigavatsat

K - kelvin

km – kilometara

kW – kilovat

kWh - kilovatsat

kWh/m<sup>2</sup> – kilovatsat po metru kvadratnom

m<sup>2</sup> – metar kvadratni

m<sup>3</sup> - metar kubni

m/d – metar po danu

MJ/m<sup>3</sup>/K – megadžul po metru kubnom po kelvinu

MWh – megavatsat

TWh – teravatsat

W – snaga

Q – toplina

## 1. UVOD

U današnje vrijeme sve više se teži korištenju obnovljivih izvora energije u gotovo svim sektorima industrije. Donošenjem odluka i zakona na razini Europe, a i globalno, nastoji se poticati na korištenje obnovljivih izvora energije. Direktive i inicijative Europske unije (u daljnjem tekstu EU) poput paketa „Spremni za 55%“ (engl. „*Fit for 55*“) obuhvatili su i sektor zgradarstva, odnosno, donesena su neka pravila prema kojima se moraju graditi novi stambeni objekti, a koja nalažu da se uvode obnovljivi izvori energije kako bi se smanjili utjecaji emisija štetnih plinova (Narodne novine 127/19, 2021). Također, cilj je povećati energetske učinkovitost kako bi se smanjila potrošnja električne i toplinske energije. Najčešći oblik obnovljivih izvora energije u zgradarstvu su solarne elektrane postavljene na krovovima koje opskrbljuju s električnom energijom. Biomasa i geotermalna energija su najčešći obnovljivi izvori kojima se pridobiva toplinska energija, a za grijanje potrošne vode mogu se koristiti i solarni kolektori.

U ovom radu naglasak će biti na geotermalnim dizalicama topline koje proizvode toplinsku energiju iz plitkih geotermalnih izvora. Geotermalna energija predstavlja toplinsku energiju koja se oslobađa iz Zemljine unutrašnjosti, najčešće u obliku geotermalnih voda. Plitka geotermalna energija je jedan od najprikladnijih obnovljivih izvora energije koji je prisutan gotovo posvuda. Dubinska granica plitke geotermalne energije iznosi 400 metara. Toplina potječe iz Zemljine jezgre i stoga je najčišći i praktički neiscrpan izvor energije. Najjednostavnije rečeno, dizalice topline zimi „pumpaju“ toplinu iz tla i vraćaju joj hladnoću, a ljeti obrnuto (Menerga, 2020).

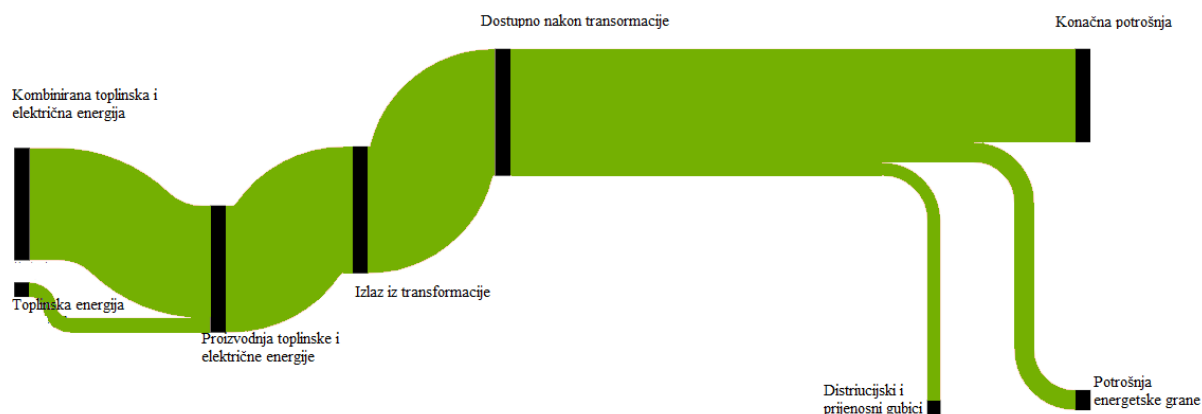
Kako bi dizalice topline imale što bolju učinkovitost potrebno je optimizirati sustav. Od iznimne je važnosti imati dobro izoliran prostor kako bi se potreba za grijanjem i hlađenjem smanjila. Također, potrebno je poznavati hidrogeološke parametre kako bi se sustav projektirao na što kvalitetniji način.

U ovom radu za primjer je uzet stambeni neboder koji se nalazi na području Novog Zagreba s odličnom izolacijom. Prema podacima Lekić Brettschneider et al. (2023) postavljeni su hidrogeološki parametri Zagreba. Usporediti će se četiri slučaja koja imaju jednake hidrogeološke uvjete i potrebne ulazne podatke. Jedina razlika je u broju postavljenih izmjenjivača topline te se promatra kako različiti broj izmjenjivača topline utječe na razmjenu topline sa stijenom.

Ovakvi sustavi iziskuju velik iznos investicijskih ulaganja. Kako bi se utvrdila isplativost ovakvih projekata, biti će provedena ekonomska analiza u kojoj se analiziraju troškovi energije (LCOE, engl. *levelized cost of energy*) te diskontinuirani i kumulativni neto novčani tokovi za dizalicu topline i solarnu elektranu postavljenog slučaja.

## 2. ANALIZA TOPLINSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE

Zagrijavanje prostora i potrošne tople vode omogućeno je proizvodnjom toplinske energije dobivene iz toplinskih sustava koji mogu biti samostalni, zatvoreni ili centralni. U većim gradovima u Republici Hrvatskoj (u daljnjem tekstu: RH) toplinski izvori su termoelektrane-toplane (TE-TO) koje su smještene u Sisku, Osijeku te Zagrebu. Osim termoelektrana-toplana postoje i manje kotlovnice smještene u stambenim i poslovnim objektima za dobivanje toplinske energije. Toplinska se energija putem vrelovoda/toplovoda/parovoda ukupne duljine 444 km distribuira do objekta gdje se ona predaje potrošačima. Obnovljivi izvor toplinske energije dobivene procesom sagorijevanja ili fermentacije u RH je biomasa (drvo, piljevina, poljoprivredni ostaci i slično). Zbog prelaska na čistu energiju, s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova, u RH se sve više koriste obnovljivi izvori energije poput geotermalne i sunčeve energije, te se očekuje da će se njihova primjena u budućnosti znatno povećati u centralnim toplinskim sustavima i kod individualnog grijanja. Na Slici 2-1. se može vidjeti tok toplinske energije centraliziranog toplinskog sustava RH od njezine proizvodnje do potrošnje u 2021. godini.



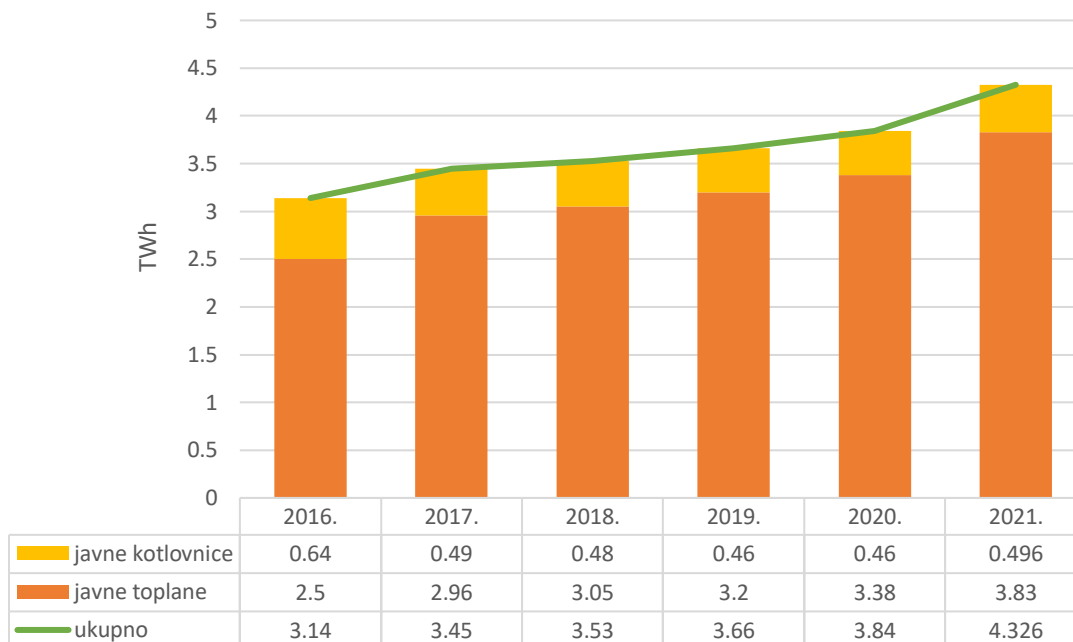
**Slika 2-1.** Tok toplinske energije centraliziranog toplinskog sustava u RH u 2021. godini (Eurostat, 2023)

## **2.1. Proizvodnja i potrošnja toplinske energije u Republici Hrvatskoj**

Proizvodnja toplinske energije je proces pretvaranja energenata ili goriva u toplinsku energiju koja se može koristiti za grijanje prostora i pripremu tople vode. Potrošnja toplinske energije ovisi o nekoliko faktora poput klimatskih uvjeta, razini izolacije grijane površine, veličini i vrsti zgrade, sustavu grijanja i ostalo.

Sustavi za proizvodnju toplinske energije mogu biti velikih industrijskih razmjera ili mali sustavi za kućanstva. U većim gradovima RH toplinska energija proizvodi se pomoću centraliziranih toplinskih sustava (CTS), odnosno javnim kotlovnica i javnim toplanama. Energenti za proizvodnju toplinske energije u CTS-u su uglavnom prirodni plin, lako loživo ulje, ekstra lako loživo ulje i obnovljivi izvori energije (biomasa, geotermalna i solarna energija).

Elektrana-toplana (EL-TO) i TE-TO kao energent za proizvodnju toplinske energije koriste prirodni plin, lako loživo ulje te ekstra lako loživo ulje. Bioelektrane-toplane (BE-TO) su kogeneracijske toplane koje za proizvodnju električne i toplinske energije koriste biomasu. U Hrvatskoj postoje dvije BE-TO, a smještene su u Sisku i Osijeku. Primarna svrha BE-TO je proizvodnja toplinske energije za centralne toplinske sustave Siska i Osijeka. Toplinska energija proizvedena iz geotermalnih izvora uglavnom se koristi za grijanje bazena (Mladost – Zagreb, toplice). Prva solarna termalna kotlovnica u Hrvatskoj puštena je u rad 2019. godine, a nalazi se na području grada Vukovara. U RH je 2021. godine sveukupno proizvedeno 4,326 TWh toplinske energije javnim toplanama i javnim kotlovnica. U razdoblju od 2016. godine do 2021. godine količina proizvedene toplinske energije se znatno ne mijenja. Na Slici 2-2. je detaljniji prikaz proizvodnje toplinske energije iz CTS-a za kućanstva u razdoblju od 2016. godine do 2021. godine (Energetski institut Hrvoje Požar [EIHP], 2022).

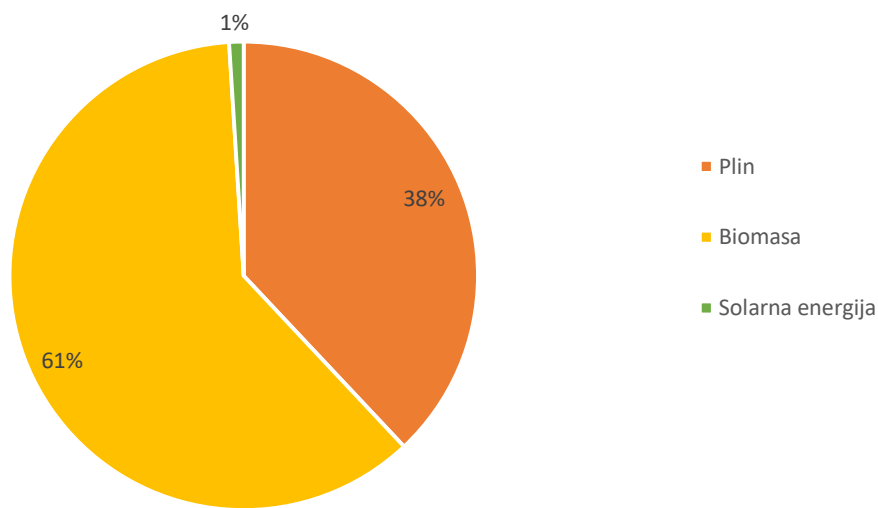


**Slika 2-2.** Proizvodnja toplinske energije za kućanstva iz CTS-a u RH u razdoblju od 2016. do 2021. godine (EIHP, 2022)

U manjim gradovima i selima gdje ne postoji centralizirani toplinski sustav kućanstva se griju individualno. Svako kućanstvo opremljeno je vlastitim sustavom grijanja. Energenti korišteni za individualno grijanje su plin, biomasa i solarni kolektori. Slika 2-3. prikazuje omjer energenata koji se koriste za proizvodnju toplinske energije u kućanstvima s vlastitim sustavom grijanja (EIHP, 2022).



### Toplinska energija



**Slika 2-3.** Omjer korištenih energenata za proizvodnju toplinske energije individualnog grijanja (EIHP, 2022)

Kako bi se smanjila potrošnja toplinske energije u RH provode se različite mjere poboljšanja energetske učinkovitosti, poput povećanja kvalitete izolacije zgrada, uvođenja učinkovitijih sustava grijanja i hlađenja te povećanja korištenja obnovljivih izvora. Donošenjem zakonskih propisa i subvencija za poboljšanje energetske učinkovitosti potiče se građane i tvrtke na smanjenje potrošnje toplinske energije, ali i očuvanje okoliša.

### **3. ENERGETSKI RAZVOJ ZGRADARSTVA**

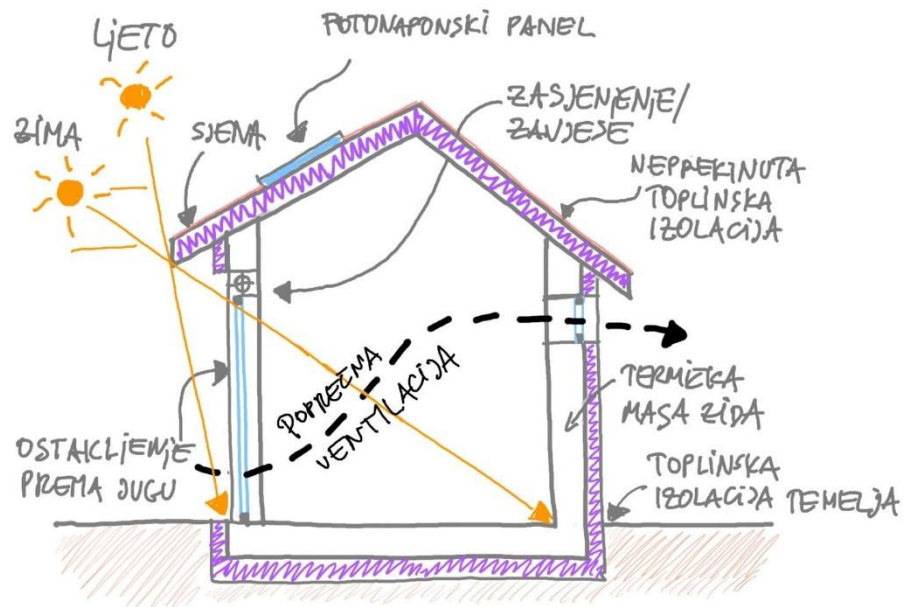
Povećanje vrijednosti globalne temperature i velika količina ispuštenih stakleničkih plinova poput ugljikovog dioksida i metana navela je Europsku komisiju na uvođenje mjera i planova kako bi što više spriječio daljnji rast. Europski zeleni plan je jedna od inicijativa sprječavanja povećanja vrijednosti emisija stakleničkih plinova i klimatskih promjena u sklopu kojeg je predstavljen paket „Spremni za 55%“. Paketom „Spremni za 55%“ emisije stakleničkih plinova se žele smanjiti za najmanje 55% do 2030. godine. Paket je skup prijedloga za izmjenu i usklađivanje zakonodavstva EU i uvođenje novih inicijativa s ciljem osiguravanja da su politike EU-a u skladu s klimatskim ciljevima koje su dogovorili Vijeće i Europski parlament (Narodne novine 127/19, 2021).

Zgrade su odgovorne za 40% potrošene energije i 36% izravnih i neizravnih emisija stakleničkih plinova. Kako bi Europa postala energetska učinkovitija i manje ovisna o fosilnim gorivima, paketom „Spremni za 55%“ i raznim direktivama poziva se na obnovu zgrada. Obnova zgrada je ključna kako bi se smanjila potrošnja energije, emisija i troškova električne energije (Narodne novine 127/19, 2021).

#### **3.1. Energetska svojstva zgrada**

Kako bi se smanjila potrošnja toplinske i električne energije te povećala energetska učinkovitost teži se projektiranju zgrada s visokim energetska svojstvima. Projektiranjem visokoenergetskih zgrada nastoji se postići što učinkovitiji tehnički sustav te se nastoji potpuno za energijom svesti na minimum.

Energetska svojstva zgrada odnose se na karakteristike i performanse zgrada u pogledu energetske učinkovitosti, potrošnje energije i održivosti. Karakteristike zgrada koje utječu na energetska svojstva su: arhitektonsko oblikovanje i toplinska zaštita, provjetravanje, tehnički sustavi i energenti (Slika 3-1.).



**Slika 3-1.** Primjer karakteristika zgrade koje utječu na energetska svojstva (Interstudio, 2020)

**Arhitektonsko-građevinske karakteristike** koje utječu na energetska svojstva zgrade te potrebnu energiju za grijanje i hlađenje su kvaliteta ovojnice zgrade (debljina toplinske izolacije i vrsta ostakljenja), oblik zgrade (preporučljivo je pridržavati se načela energetski učinkovitog oblikovanja, ali nije obavezno), orijentacija otvora prema stranama svijeta i zaštita od sunca (kako bi se spriječilo pregrijavanje prostora).

**Provjetravanjem** dolazi do toplinskih gubitaka, odnosno izlaska toplog zraka i ulaska hladnog zraka u prostor. S obzirom da je provjetravanje prostora važno, gubici se mogu smanjiti ugradnjom mehaničke ventilacije s povratom topline.

Sustavi namijenjeni za grijanje, hlađenje, pripremu potrošne tople vode, ventilaciju, klimatizaciju, rasvjetu i sustav automatizacije ubrajaju se pod **tehničke sustave**. Kako bi tehnički sustavi radili potrebni su im **energenti**. Energenti mogu biti neobnovljivi i obnovljivi izvori energije. Kako bi se smanjio utjecaj stakleničkih plinova teži se korištenju obnovljivih izvora energije.

Za postizanje zgrade gotovo nulte energije potrebno je obaviti kvalitetno projektiranje koje uključuje:

- Projektiranje s povoljnim faktorom oblika, primjenu optimalnih materijala, elemenata i toplinske izolacije,

- Projektiranje detalja s minimalnim toplinskim mostovima i osiguranje niske zrakopropusnosti,
- Osiguranje rješenja za kontrolu insolacije,
- Korištenje prirodnog svjetla,
- Prema potrebi predvidjeti mehaničku ventilaciju s rekuperacijom,
- Predvidjeti primjerene, dostupne, izvedive termotehničke sustave visoke učinkovitosti ili s visokim udjelom obnovljivih izvora (Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine [MPGI], 2019).

## **4. KORIŠTENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE**

Obnovljiva energija je energija proizvedena iz izvora poput Sunca i vjetra koji se prirodno obnavljaju i ne nestaju. Obnovljivi izvori energije igraju ključnu ulogu u prijelazu na čistu energiju. Primjena obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije, energije grijanja i hlađenja prostora i vode, te u prometu, jedan je od glavnih čimbenika zadržavanja rasta prosječne globalne temperature ispod 1,5 °C u odnosu na predindustrijsko doba (IEA, 2023b). Energija iz fosilnih goriva i dalje je najkorišteniji oblik energije, stoga je važno povećati korištenje iz obnovljivih izvora kako bi se na čišći način proizvodila energija.

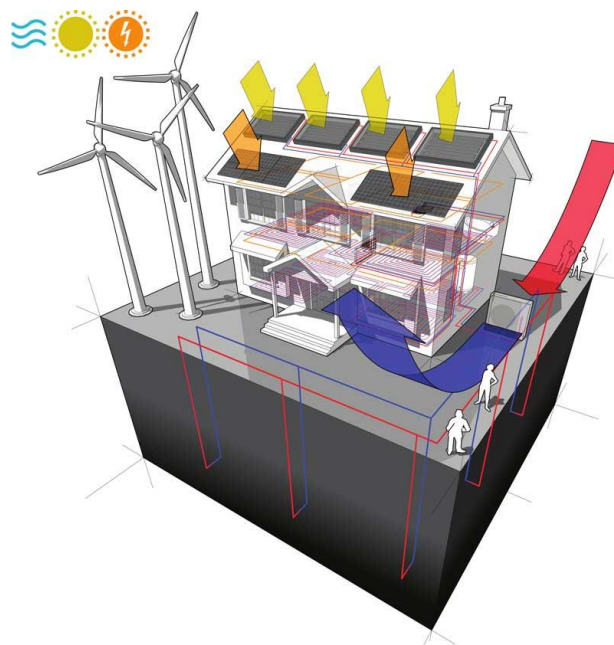
Prednosti korištenja obnovljivih izvora energije su brojne i utječu na gospodarstvo, okoliš, nacionalnu sigurnost i zdravlje ljudi. Ekološke i ekonomske koristi od korištenja obnovljive energije uključuju:

- Stvaranje energije koja ne proizvodi emisije stakleničkih plinova iz fosilnih goriva,
- Smanjenje ovisnosti o uvoznim gorivima,
- Stvaranje gospodarskog razvoja i radnih mjesta u proizvodnji i instalaciji (EPA, 2023).

Kako bi se obnovljivi izvori energije počeli koristiti u kućanstvima potrebno je osigurati odgovarajuće poticaje za korištenje obnovljive energije.

### **4.1. Primjena obnovljivih izvora energije u zgradama**

Najčešći oblici obnovljivih izvora energije koji se koriste u zgradama su energija Sunca, vjetra, biomasa i geotermalna energija (Slika 4-1.). Sunčeva energija se može „uhvatiti“ fotonaponskim panelima ili solarnim toplinskim kolektorima i koristiti za proizvodnju električne energije ili potrošne tople vode. Energija vjetra može se iskoristiti vjetroturbinama i pretvoriti u električnu ili mehaničku energiju. Energija biomase može se dobiti iz organskih materijala kao što su drvo, usjevi ili otpadi i spaliti za proizvodnju topline ili električne energije. Korištenjem geotermalnih izvora energije prostorije se zimi mogu grijati, a ljeti hladiti, te se mogu koristiti i za zagrijavanje potrošne tople vode (Building design, 2023).



**Slika 4-1.** Korištenje obnovljivih izvora energije u zgradama (Inewa, 2023)

Korištenje obnovljivih izvora energije u zgradama može pridonijeti smanjenju štetnog utjecaja na okoliš. Obnovljivi izvori energije mogu smanjiti operativne troškove i troškove održavanja zgrada, osobito dugoročno zbog nižih ili nikakvih troškova goriva i potencijalnih poreznih poticaja ili subvencija. Također, može se poboljšati kvaliteta unutrašnje toplinske udobnosti pružanjem prirodnijeg i dosljednijeg osvjetljenja, grijanja, hlađenja, kao i smanjenje buke i prašine (Building design, 2023).

Obnovljivi izvori energije povezani su i s nekim izazovima. Često se zahtijevaju velika početna ulaganja i složena oprema za ugradnju. Na pouzdanost i stabilnost opskrbe energijom može utjecati dostupnost i intenzitet prirodnih resursa, poput Sunčeve svjetlosti i vjetra koji mogu varirati sezonski ili dnevno. Sustavi obnovljive energije moraju biti integrirani i kompatibilni s postojećom strukturom zgrade, dizajnom i funkcijom, kao i s lokalnom mrežom i propisima, što može predstavljati tehničke, estetske ili pravne izazove. Stoga je potrebno pažljivo planiranje i optimizacija kako bi se osigurala uspješna integracija (Building design, 2023).

Zajedničkim korištenjem, odnosno kombinacijom sustava obnovljivih izvora energije (na primjer solarne elektrane i dizalica topline), stopa korištenja obnovljivih izvora kao što su solarni, vjetar i geotermalni izvori u zgradama može se povećati. Stoga se mogu dati veliki doprinosi smanjenju ekoloških problema uzrokovanih potrošnjom energije.

## **5. DIZALICE TOPLINE**

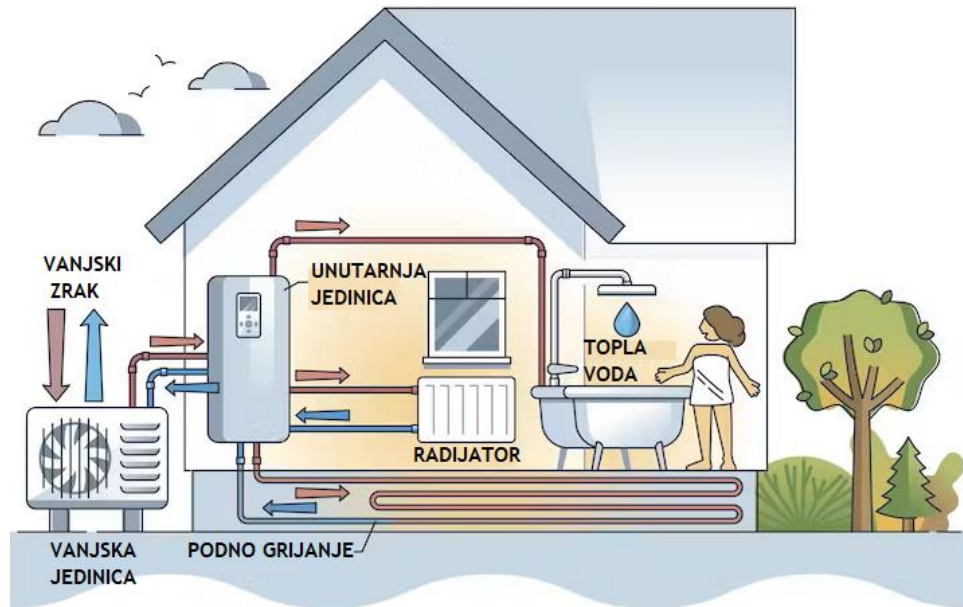
Dizalice topline su uređaji koji rade pomoću električne energije za grijanje i hlađenje prostorija, s većom energetsom učinkovitošću od kotlova. Omogućavaju korištenje obnovljivih izvora energije, energije okoline i otpadne topline. U zgradarstvu, dizalice topline se koriste za grijanje, toplu vodu, a u nekim slučajevima i za hlađenje (European Commission, 2023).

Dizalice topline sve više su prepoznate kao tehnologija za dekarbonizaciju topline, dobivajući sve veću potporu politika u nekoliko zemalja tijekom posljednjih godina. Međunarodna agencija za energiju (IEA, engl. *International Energy Agency*) procjenjuje da dizalice topline na globalnoj razini imaju potencijal smanjiti globalnu emisiju ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) za najmanje 500 milijuna tona do 2030. godine – što je jednako godišnjoj emisiji CO<sub>2</sub> svih današnjih automobila u Europi (IEA, 2023a).

### **5.1. Tipovi dizalica topline**

Dizalice topline mogu se klasificirati na temelju parametara kao što su izvor topline i konfiguracija sustava. Među različitim tipovima dizalica topline koje se danas nalaze na tržištu postoje dvije osnovne podjele: dizalice topline kojima je izvor topline zrak i dizalice topline s podzemnim izvorom topline (geotermalne dizalice topline).

Dizalice topline na zrak koriste energiju vanjskog zraka ili zraka iz ventilacijskog sustava za grijanje i hlađenje (Slika 5-1.). Energetski su učinkoviti sustavi klimatizacije s jeftinijom instalacijom i početnim troškovima od ostalih sustava dizalica topline. Dizalice topline na zrak rade dobro u blažim klimatskim uvjetima odnosno u područjima gdje su ljeta i zime blage. Pri vrlo niskim ili vrlo visokim temperaturama, odnosno kada se poveća temperaturna razlika između vanjske i unutarnje temperature, smanjuje im se učinkovitost grijanja i hlađenja (Nature of home, 2023).

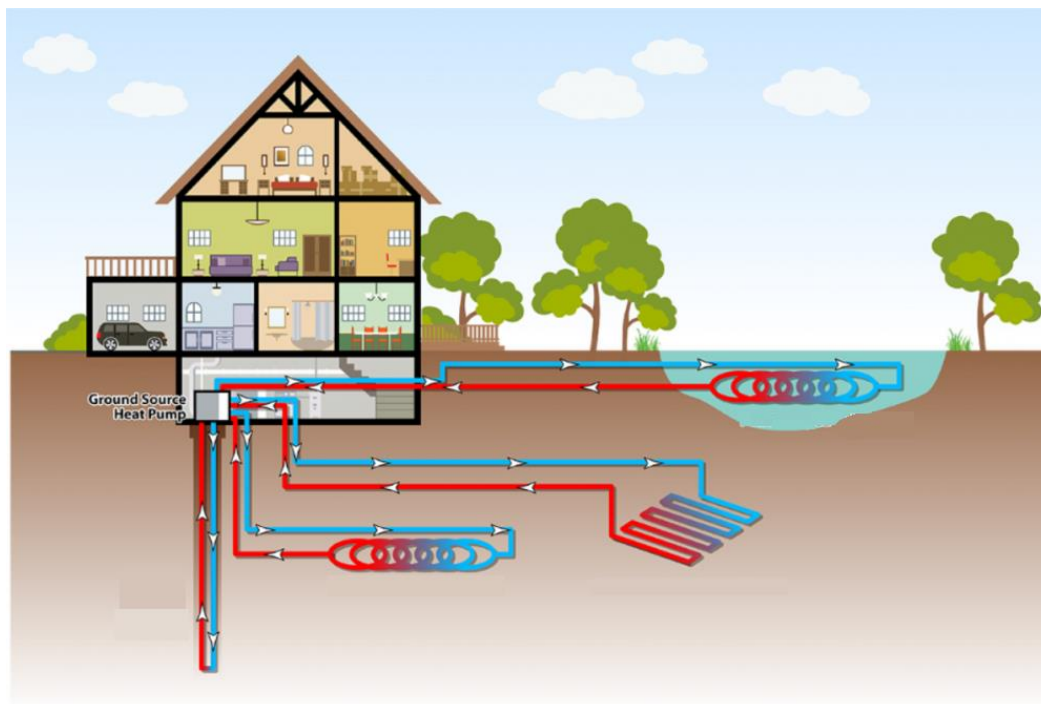


**Slika 5-1.** Primjer rada dizalice topline sustava zrak-voda (The conversation, 2023)

Postoje dvije različite vrste dizalica topline na zrak: dizalica topline sustava zrak-voda i sustava zrak-zrak. Najčešći korišteni sustav je zrak-voda jer zagrijavaju sustav centralnog grijanja te s time osiguravaju zagrijavanje prostorije i tople vode po potrebi. Dizalice topline zrak-zrak osiguravaju samo grijanje prostorije i ne rade sa sustavima centralnog grijanja (Yes energy solutions, 2023).

Problem temperaturne varijacije koji se javlja kod dizalica topline na zrak može se riješiti korištenjem dizalica topline s podzemnim izvorom topline. Tlo ima gotovo konstantu temperaturu tijekom cijele godine pa se temperaturni problem u ovom slučaju eliminira. S obzirom na vrstu podzemnog izvora topline razlikujemo dizalice topline koje kao izvor topline koriste podzemne vode ili tlo (GSHP, engl. *Ground source heat pump*) (Slika 5-2.) (Cielo, 2023).





**Slika 5-2.** Primjeri dizalica topline s podzemnim izvorima topline (Consolidate Electric Cooperative, 2023)

Dizalice topline podzemne vode koriste kao medij za izmjenu topline. Apsorbiraju toplinu iz vode za zagrijavanje prostorija i potrošne tople vode, a također mogu i otpuštati toplinu preuzetu iz prostorije u vodu. Postoje sustavi otvorene i zatvorene petlje. Sustav zatvorene petlje koristi sekundarno sredstvo koje se zagrijava i prenosi toplinu. Sustav otvorene petlje nema sekundarno sredstvo, već se uzima voda iz izvora za zagrijavanje. Ovakav sustav je dobar izbor za domove u blizini vodenih površina.

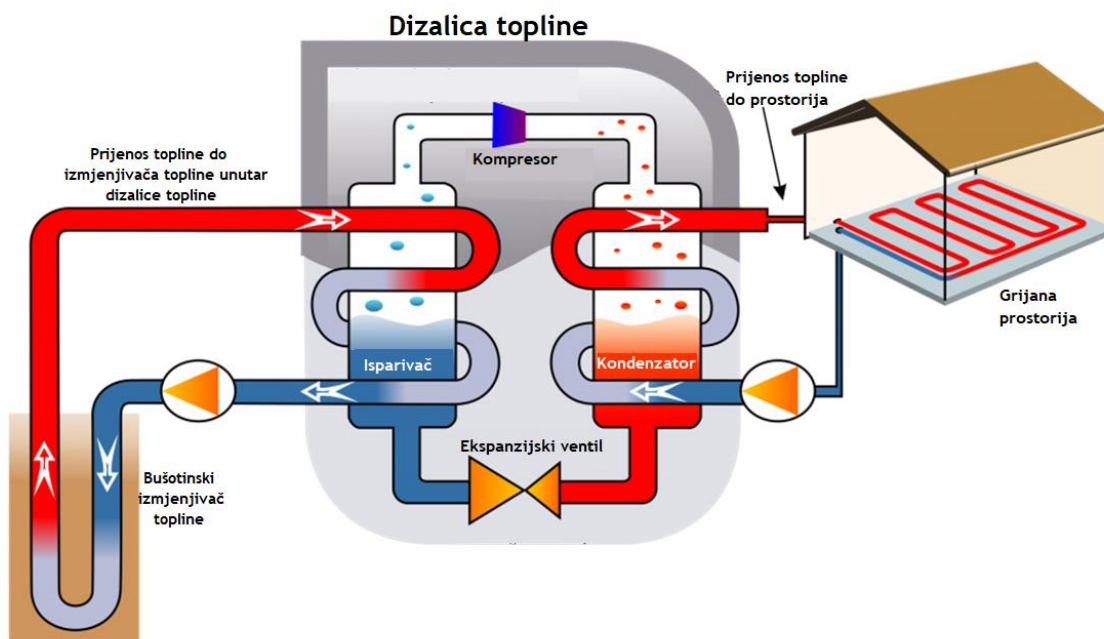
GSHP poznate i kao geotermalne toplinske pumpe, koriste toplinu tla umjesto vode za grijanje ili hlađenje unutarnjeg prostora. Prednost ovih dizalica topline je relativno konstantna temperatura tla za razliku od dizalica topline na zrak. Unatoč velikoj učinkovitosti, geotermalne dizalice topline nisu toliko uobičajene u privatnim kućanstvima jer su složenije i skuplje za instaliranje. Geotermalni sustav postavlja se ispod zemlje ili u vodu, pa sam proces postavljanja može biti naporan i dugotrajan (Sealed, 2020).

## 5.2. Princip rada dizalice topline

Kako bi se razumio rad dizalice topline potrebno je poznavati osnove drugog zakona termodinamike koji govori da toplina uvijek nastoji prijeći s toplijeg tijela na hladnije tijelo.

Izmjenjivači topline unutar dizalice topline na sebe preuzimaju toplinu i prenose je tijekom hlađenja i grijanja. Komponentne dizalice topline su: izmjenjivači topline, kompresor i ekspanzijski ventil.

S obzirom da se tema rada bazira na geotermalnim dizalicama topline, u ovom odlomku će se opisati princip njihovog rada. Pomoću bušotinskog izmjenjivača topline (BHE, engl. *Borehole Heat Exchanger*) toplina se prenosi do isparivača u dizalici topline u kojem se nalazi radni fluid. Radni fluid se zagrijava i isparava zbog niske točke vrelišta. Fluid isparava i prenosi toplinu do kompresora na električni pogon u kojem mu se povećava temperatura. U kondenzatoru se radni fluid pretvara u tekućinu i toplinu otpušta izmjenjivaču topline. Radni fluid prolazi kroz ekspanzijski ventil gdje se dodatno hladi i ulazi u ekspander kako bi se ponovio postupak. Toplina proizvedena u kondenzatoru prenosi se u sustav centralnog grijanja (Energy, 2019) (Slika 5-3.).



**Slika 5-3.** Skica procesa rada dizalice topline (Energy, 2019)

Učinkovitost dizalice topline izražava se kao koeficijent učinkovitosti (COP) (5-1). Koeficijent učinkovitosti je omjer količine hlađenja ili grijanja toplinske pumpe i količine energije koju koristi.

$$\text{COP} = \frac{|Q|}{W} \quad (5-1)$$

gdje su: COP – koeficijent učinkovitosti,

Q – dovedena ili odvedena korisna toplina (kW),

W – dovedena snaga (kW).

Kako bi dizalica topline imala veću učinkovitost, trebala bi se koristiti u kombinaciji s niskotemperaturnim sustavom grijanja, poput podnog grijanja i/ili niskotemperaturnih radijatora, što zahtjeva da je objekt dovoljno izoliran. Zbog toga se dizalice topline uglavnom postavljaju u nove, dobro izolirane objekte. Količina prostora potrebna za postavljanje bušotinskih izmjenjivača topline može predstavljati problem za postojeće objekte (Energy.nl, 2019).

### **5.3. Prednosti i nedostaci dizalica topline**

Posljednjih godina dizalice topline pokazuju se kao najnovija i najbolja tehnologija za grijanje i hlađenje. Dizalice topline imaju nekoliko ključnih prednosti u usporedbi s drugim sustavima grijanja i hlađenja:

- Veća učinkovitost grijanja,
- Jeftiniji operativni troškovi,
- Manje održavanja,
- Dug životni vijek,
- Nema opasnosti od ispuštanja plina i ugljičnog monoksida,
- Omogućeno je korištenje dizalica topline u kombinaciji s drugim sustavima,
- Ne sagorijeva fosilna goriva (Greenmatch, 2023).

Dizalice topline imaju veću učinkovitost grijanja u usporedbi sa standardnim električnim grijačima zbog njihovog mehanizma prijenosa topline. Dizalica topline ima puno veći koeficijent učinkovitosti (COP) od standardnog električnog grijača.

S obzirom da dizalicama topline za rad nisu potrebna fosilna goriva, jeftinije su od sustava koji se temelje na izgaranju te zahtijevaju manje održavanja. Neki dijelovi dizalice topline se samostalno provjeravaju jednom godišnje, a profesionalni instalateri provjeravaju svake treće ili pete godine (Greenmatch, 2023).

Iako dizalice topline imaju svoje prednosti, imaju i nekoliko nedostataka:

- Visoki kapitalni troškovi,
- Veća potrošnja električne energije,
- Zahtjevnija instalacija,
- Manja učinkovitost u hladnijim klimatskim uvjetima,
- Nisu u potpunosti ugljični neutralne.

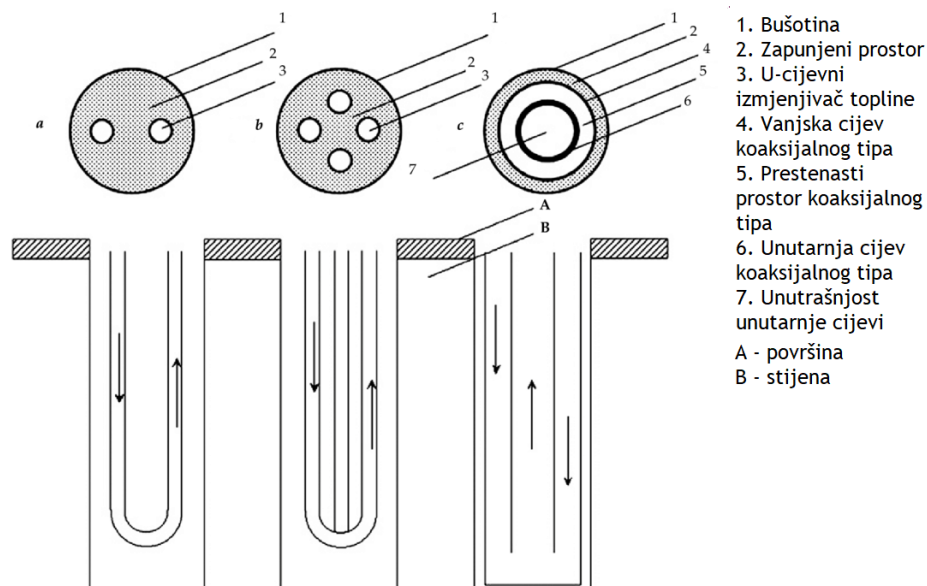
Dizalice topline troše puno više električne energije u usporedbi s plinskim pećima. Velika potrošnja električne energije može predstavljati problem ukoliko su cijene električne energije visoke, te će i račun za struju biti puno veći (HVAC, 2022).

U hladnoj sezoni dizalice topline rade tako što uzimaju toplinu izvana i prenose je unutar prostorija. Međutim, ako je vanjska temperatura preniska, dizalice topline će imati problema s izvlačenjem topline iz vanjskog zraka (HVAC, 2022).

Kako bi dizalice topline radile, potrebna im je električna energija. Električna energija se obično proizvede sustavima koji ispuštaju štetne plinove u atmosferu. Zbog toga se smatra da dizalice topline nisu u potpunosti ugljični neutralne. Ukoliko se želi postići potpuna ugljična neutralnost, električna energija se može proizvesti pomoću obnovljivih izvora energije poput solarne energije (Greenmatch, 2023).

#### **5.4. Bušotinski izmjenjivači topline**

Sadržaj topline u stijenama blizu površine Zemlje ogroman je izvor geotermalne energije. Najraširenija tehnologija za iskorištavanje plitkih geotermalnih izvora je zatvoreni sustav s bušotinskim izmjenjivačima topline opremljenim geotermalnim dizalicama topline. Bušotinskim izmjenjivačem topline toplina se prenosi kondukcijom bez proizvodnje geofluida. Izmjenjivač je ugrađen unutar bušotine, a kroz njega cirkulira tekućina koja je nosioc topline. Oko cijevi se nalazi materijal visoke toplinske vodljivosti (Toth et al, 2017). Postoje dva tipa bušotinskih izmjenjivača topline: U-cijev (jednostruka ili dvostruka) i koaksijalni tip cijevi (Slika 5-4.).



**Slika 5-4.** Tipovi bušotinskih izmjenjivača toplote; a) jednostruka U-cijev; b) dvostruka U-cijev; c) koaksijalni tip cijevi (Sliwa, T. et al., 2016)

U-cijevi se obično koriste za bušotine dubine do 100 metara, ovisno o potrebnom toplinskom kapacitetu. Sastoje se od konfiguracije dvije cijevi spojenih na donjem kraju pod kutom od 180°. Najčešća varijanta je postavljane dvostruke U-cijevi, a u jednu bušotinu moguće je postaviti više U-cijevi, čak četiri ili šest (Kurevija, n.d.).

Koaksijalni tip cijevi sastoji se od dvije cijevi postavljene jedna u drugu. Protjecanje fluida u ovim cijevima moguće je izvesti na dva načina:

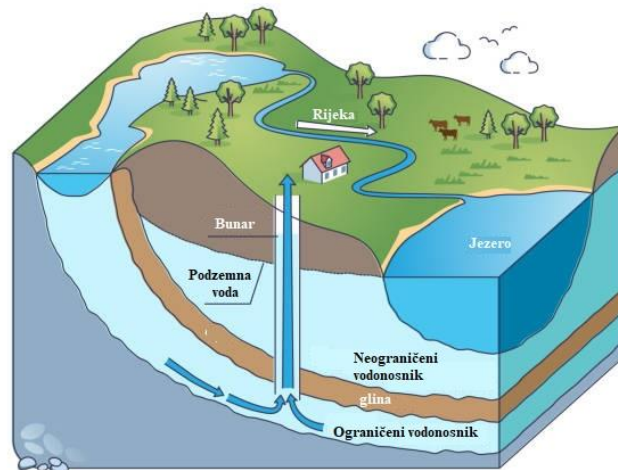
1. Ulazni tok fluida koji ide prema dizalici toplote je kroz prstenasti prostor, a povratni tok je kroz središnju cijev,
2. Ulazni tok fluida koji ide prema dizalici toplote je kroz središnju cijev, a povratni tok je kroz prstenasti prostor.

Ovaj tip cijevi moguće je postaviti u odmaku od vertikale pod kutovima od 30° do 60° što omogućava postavljanje više izmjenjivača toplote u isti instalacijski šaht, čime se ostvaruje značajna ušteda prostora (Kurevija, n.d.).

## 6. KLASIFIKACIJA VODONOSNIKA

Vodonosnik je tijelo stijene ili drugih geoloških slojeva dovoljne poroznosti i propusnosti da omoguće značajni protok podzemne vode. Može biti od slojeva stijena, pijeska ili šljunka koji mogu apsorbirati vodu i omogućiti joj da teče. Vodonosnik djeluje kao rezervoar podzemne vode kada je temeljna stijena nepropusna. Većina podzemnih voda, uključujući značajnu količinu naše vode za piće, dolazi iz vodonosnika. Može se crpiti iz bunara za kućnu, poljoprivrednu ili industrijsku upotrebu. Podzemna voda može se iscrpiti ako je koristimo brže nego što se sama može obnoviti. Nadopunjavanje vodonosnika oborinama naziva se punjenje. Ozbiljan ekološki problem nastaje kada je vodonosnik onečišćen curenjem kanalizacije, prekomjernom količinom pesticida i herbicida raspršenih na poljoprivrednim poljima ili kada se odlagališta otpada nepravilno oblože ili njima upravlja, a otrovni materijali prodiru kroz tlo u vodonosnik (European Environment Agency, 2023). Vodonosnici prirodno filtriraju podzemnu vodu tjerajući je da prođe kroz male pore i između sedimenata, što pomaže otklanjanju tvari iz vode. Ovaj prirodni proces možda neće biti dovoljan za uklanjanje svih kontaminanata.

Postoje dvije općenite vrste vodonosnika: ograničeni i neograničeni (Slika 6-1.). Ograničeni vodonosnici imaju sloj neprobojne stijene ili gline iznad sebe, dok se vodonosnici bez ograničenja nalaze ispod propusnog sloja tla. Vodonosnici se ponekad kategoriziraju prema vrsti stijene ili sedimenta od kojih se sastoje (šljunak, pješčenjak, konglomerat i razlomljeni vapnenac) (National Geographic, 2022).



**Slika 6-1.** Ilustracijski prikaz vodonosnika

Uobičajena zabluda o vodonosnicima je da su to podzemne rijeke ili jezera. Iako podzemna voda može prodrijeti u ili iz vodonosnika zbog svoje porozne prirode, ne može se kretati dovoljno brzo da teče poput rijeke. Brzina kojom se podzemna voda kreće kroz vodonosnik varira ovisno o propusnosti stijene.

### **6.1. Utjecaj podzemnih voda na prijenos topline**

Tok podzemne vode, toplinska vodljivost tla, gustoća tla i geotermalni gradijent utječu na izmjenu topline između geotermalne bušotine i tla. Kada postoji protok podzemne vode, izmjena topline postaje složenija u usporedbi sa stanjem čiste kondukcije. Podzemna voda postupno prodire u porozno tlo i stijene malom brzinom. Toplina se prenosi u nizvodno područje i to utječe na raspodjelu temperature u vodonosniku (Limberger et al, 2018).

### **6.2. Uloga vodonosnika u iskorištavanju geotermalne energije za potrebe grijanja i hlađenja**

Geotermalni vodonosnici su propusni slojevi stijena koje sadrže tekućinu. Dio topline koja teče iz unutrašnjosti Zemlje na njezinu površinu pohranjuje se u tim vodonosnicima i može se koristiti izravno za grijanje i hlađenje. Kada su podzemne temperature dovoljno visoke, toplina se također može koristiti za proizvodnju električne energije. Osim povišenih temperatura u podzemlju, vodonosnici zahtijevaju visoku propusnost za održavanje protoka koji omogućuje učinkovit transport tople vode iz vodonosnika na površinu (Limberger et al, 2018).

## **7. METODOLOGIJA**

### **7.1. Računalni program RES2GEO**

Za procjenu ulaznih podataka potreba za grijanjem, hlađenjem i električnom energijom korišten je model RES2GEO (engl. *Renewable Energy Sources to Geothermal*). Za ulazne podatke uzima energetske zahtjeve i parametre okoliša, a za rezultat procjenjuje korištenje primarne energije. RES2GEO može simulirati višegodišnje scenarije s dovoljno malim vremenskim koracima, uravnotežujući tokove električne energije i topline unutar mikromrežnog sustava. Model je napisan u programu Python v3.10 (Perković et al, 2011).

### **7.2. Računalni program FeFlow**

FeFlow je računalni program za numeričku simulaciju podzemnih voda i transporta tvari u podzemlju. Program se koristi za analizu i modeliranje hidrogeoloških sustava, uključujući procese poput iskorištavanja podzemnih voda, upravljanja otpadnim vodama, zaštite podzemnih voda od onečišćenja te planiranje izgradnje geotermalnih sustava.

Program FeFlow se može primijeniti u različitim industrijama koje uključuju analizu i upravljanje podzemnim vodama, iskorištavanje geotermalne energije, modeliranje podzemnih akumulacija ugljikovodika, praćenje migracije onečišćenja, modeliranje i izgradnje tunela i drugih građevinskih struktura u stijenama i tlu.

Najčešća primjena je u sljedećim industrijama:

1. Rudarstvo – koristi se za modeliranje protoka podzemne vode, upravljanja slanom vodom te za osmišljavanje plana skladištenja prerađenih minerala,
2. Građevinarstvo i geotehnika – izrađuje se učinkovit plan odvodnjavanja na gradilištu, analizira smrzavanje tla u geotehničkim projektima te minimizira procjeđivanje i infiltracije u geotehničkoj i inženjerskoj infrastrukturi,
3. Geotermalna energija – povećanje kapaciteta skladištenja topline plitkih geotermalnih sustava i povećanje profitabilnosti geotermalnih energetske instalacije,
4. Zaštita okoliša – osiguravanje sigurne i odgovarajuće opskrbe vodom te zaštita kvalitete podzemne vode (MIKE, 2023).

U ovom radu primjenjuje se dimenzioniranje bušotinskih izmjenjivača topline za potrebe pridobivanja geotermalne energije iz podzemnih voda. FeFlow omogućuje povezivanje



različitih bušotina unutar jednog sustava, izmjenu brzine pumpanja i energetske potrebe tijekom vremena. Također, omogućuje primjenu različitih konfiguracija bušotinskih izmjenjivača topline kao što su koaksijalni, U-oblik i dvostruki U-oblik. Moguće je ispitati različite scenarije definiranjem različitih početnih uvjeta, odnosno podataka.

Rezultati dobiveni postavljanjem bušotinskih izmjenjivača topline mogu pružiti informacije o učinkovitosti sustava geotermalne energije i pomoći u planiranju, projektiranju i upravljanju takvim sustavima.

## 8. SCENARIJ UPOTREBE DIZALICE TOPLINE ZA GRIJANJE I HLAĐENJE STAMBENOG NEBODERA

### 8.1. Arhitektonsko oblikovanje i fizikalne karakteristike stambenog nebodera

Stambeni neboder koji se nalazi u Novom Zagrebu, naselju Travno, korišten je za scenarij u kojem se uvodi dizalica topline za grijanje i hlađenje prostora. Pretpostavljeno je da je neboder novo izgrađen s dodatnom izolacijom. Vanjski zidovi nebodera su sagrađeni od masivnog armiranog betona s izolacijom. Neboder ne sadrži tavan, a podrum i pod na tlu su djelomično grijani s izolacijom. Površina stambenog nebodera iznosi 614 m<sup>2</sup>. Neboder se sastoji od 17 katova s time da 15. (7 stanova), 16. (5 stanova) i 17. (2 stana) kat nisu kompletni što znači da sadrže manji broj stanova od ostalih katova na kojima se nalazi 10 stanova (Tablica 8-1.) (Katastar, 2023). Kako bi se proračunala potrebna toplotina za grijanje, potrebno je znati površinu grijanja i otvorenu površinu nebodera. Površina zajedničkog hodnika zgrade se ne grije pa ona nije uvrštena u proračun ukupne površine grijanog prostora već su u obzir uzete površine stanova bez balkona. Trenutni postojeći sustav grijanja zgrade je centralni toplinski sustav (CTS).

Tablica 8-1. Površina stanova bez balkona, m<sup>2</sup>

	prizemlje	1. -14. kat	15. kat	16. kat	17. kat
1	55,68	56,75	56,75	56,78	55,68
2	24,37	25,44	55,25	25,47	25,42
3	24,37	24,37	56,78	24,37	/
4	55,52	56,75	25,47	56,56	/
5	53,15	55,25	24,37	25,51	/
6	24,37	56,78	56,56	/	/
7	24,37	25,47	25,51	/	/
8	57,1	24,37	/	/	/
9	24,37	56,56	/	/	/
10	/	25,51	/	/	/
suma	343,3	407,25	300,69	188,69	81,1

Katastarskim dokumentom nebodera određena je površina svakog stana, a zbrajanjem svih površina dobivena je ukupna površina svih stanova. Zbog nedostatka podataka predviđeno je da

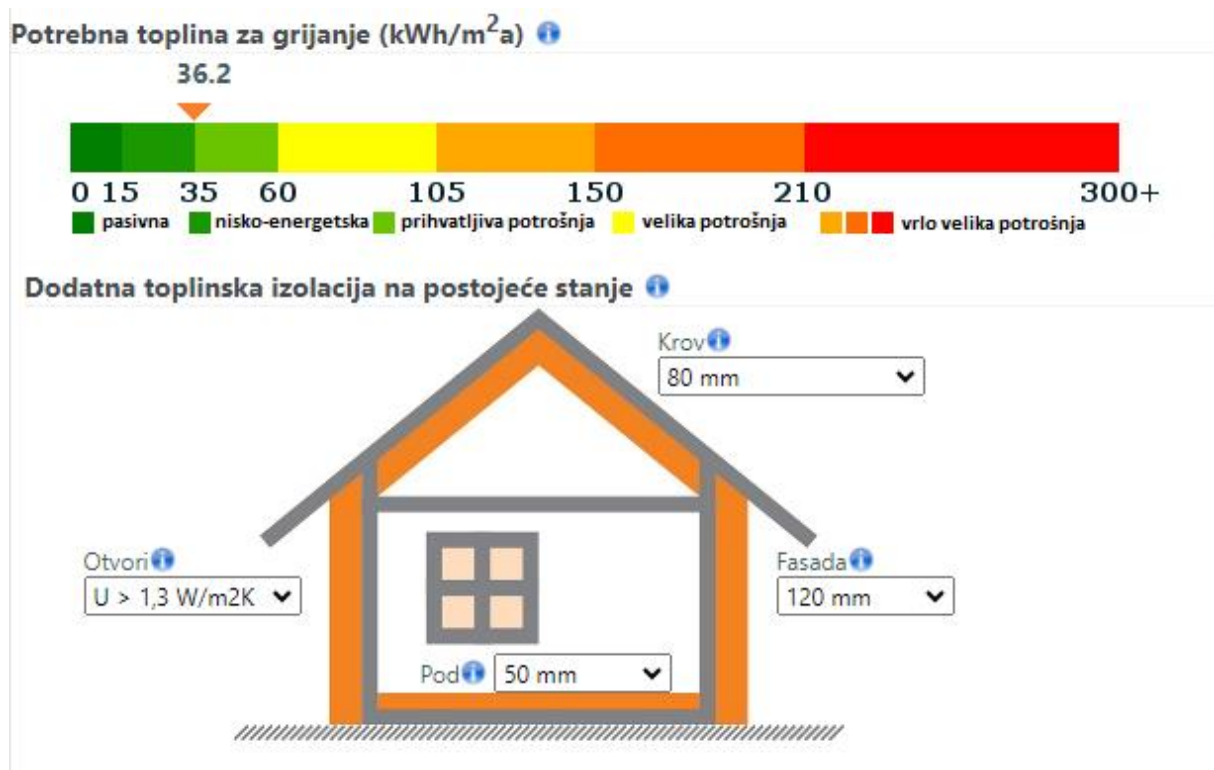
površina negrijanog balkona iznosi 2,5 m<sup>2</sup> te je ona umanjena za svaku površinu stana. S tim proračunom dobivena je ukupna grijana površina koja iznosi 6615,28 m<sup>2</sup>.

Pretpostavljeno je da postoje dva tipa balkonskih vrata i dva tipa prozora kako bi se proračunala otvorena površina nebodera koja iznosi 1149,12 m<sup>2</sup>.

**Tablica 8-2.** Ulazni podaci za proračun potrebne topline grijanja zgrade

<b>Ulazni podaci</b>	
<b>Površina zgrade</b>	614 m <sup>2</sup>
<b>Broj grijanih etaža</b>	17
<b>Grijanje potkrovlja</b>	Da
<b>Podrum</b>	nema
<b>Vanjski zidovi</b>	Masivni armirani beton s 15 cm izolacije
<b>Krov</b>	20 cm izolacije
<b>Pod na tlu</b>	8 cm izolacije
<b>Površina otvora</b>	1150 m <sup>2</sup>
<b>Dodatna toplinska izolacija krova</b>	80 mm
<b>Dodatna toplinska izolacija fasade</b>	120 mm
<b>Dodatna toplinska izolacija poda</b>	50 mm

Uvrštavanjem podataka iz Tablice 8-2. u energetska kalkulator stranice Knauf Insulation dobivena je potrebna toplina za grijanje prostora koja iznosi 36,2 kWh/m<sup>2</sup>, što znači da je za grijanje cijelog nebodera potrebna energija u iznosu od 240 MWh (Slika 8-1.) (Knauf Insulation, 2023). Dobiveni podaci govore da je neboder dobro izoliran te zbog toga dolazi do male potrošnje topline.



Slika 8-1. Potrebna toplina za grijanje izražena u kWh/m<sup>2</sup> (Knauf Insulation, 2023)

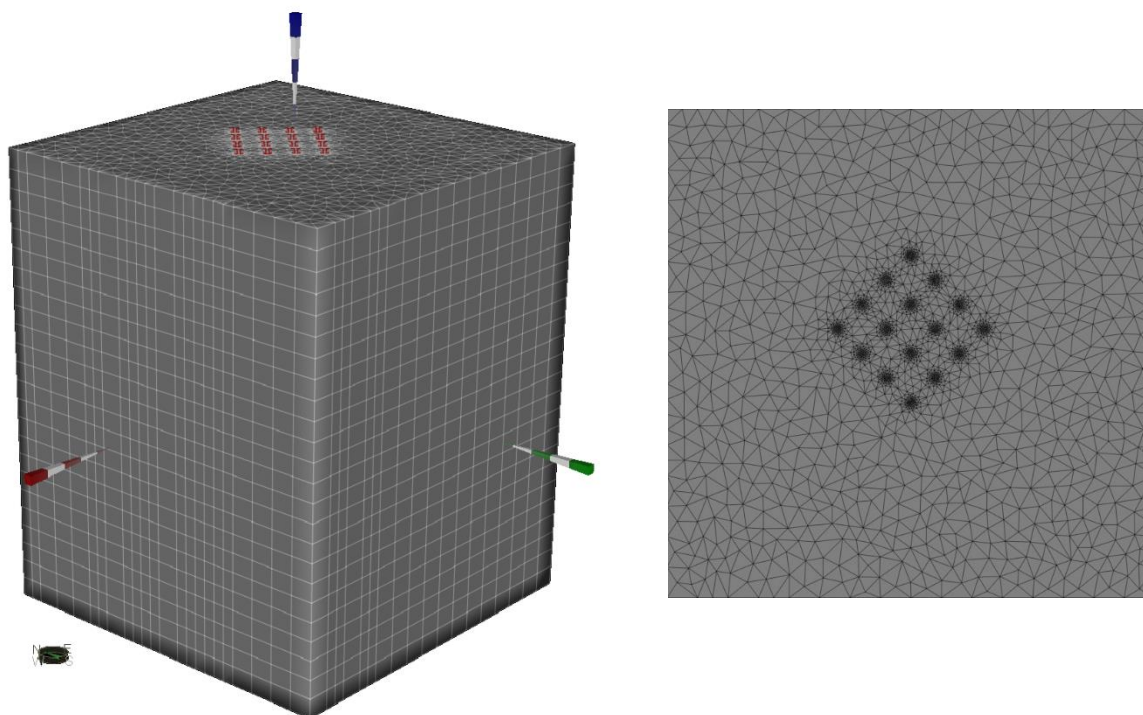
## 8.2. Hidrogeološke postavke scenarija u računalnim programima RES2GEO i FeFlow

U ovom radu biti će ispitana četiri različita scenarija. Svi scenariji imaju iste ulazne i hidrogeološke podatke, a jedina razlika je u broju postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline. Ulazni podaci su prikazani u Tablici 8-3., a dobiveni rezultati će biti prikazani u odlomku 9.

Tablica 8-3. Tablični prikaz ulaznih podataka za četiri različita scenarija

	Mjerna jedinica		S1-S4	
<b>P<sub>PV</sub></b>	kW		60	
<b>P<sub>heatermax</sub></b>	kW		50	
<b>P<sub>bat</sub></b>	kW		10	
<b>E<sub>batmax</sub></b>	kWh		20	
<b>P<sub>HP</sub></b>	kW		999	
<b>T<sub>Rlimit</sub></b>	°C		50	
	S01	S02	S03	S04
<b>N<sub>wells</sub></b>	6	8	10	16

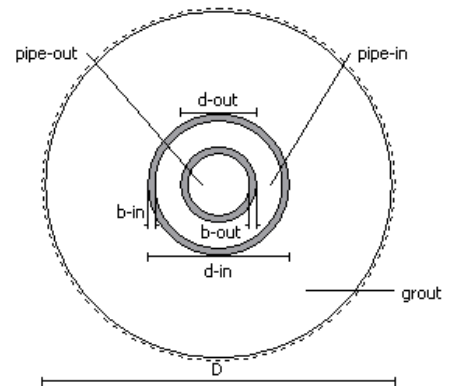
U računalnom programu Google Earth Pro odabrana je zelena površina udaljena 50 metara od odabranog stambenog nebodera korištenog za ovaj slučaj. Na zelenoj površini su postavljeni bušotinski izmjenjivači topline. Opcijom *Well Manager* u programu FeFlow lokacije su definirane kao bušotinski izmjenjivači topline. Dubina postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline iznosi 100 metara te je dodano 20 metara sloja kako bi se mogla uspostaviti kontrola što znači da sveukupna dubina modela iznosi 120 metara. Model se sastoji od 24 sloja, a debljina svakog sloja iznosi 5 metara (Slika8-2.).



**Slika 8-2.** 3D i 2D prikaz modela s bušotinskim izmjenjivačima topline iz programa FeFlow

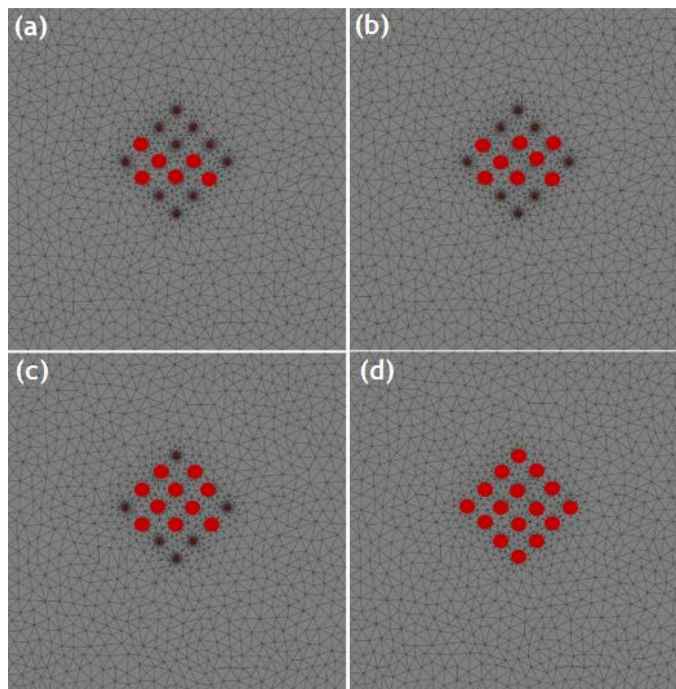
Bušotinski izmjenjivači topline su koaksijalnog tipa kod kojeg radni fluid ulazi u unutarnju cijev, a vanjska cijev služi kao izlazna cijev iz izmjenjivača topline. Podaci poput promjera i debljine stijenke unutarnje i vanjske cijevi i koeficijenta prolaza topline izmjenjivača topline ostaju isti kao što je već zadano u samom programu (Slika 8-3.).

Property	Value
Name	
Borehole Diameter (D)	0.15 [m]
Inlet Pipe Diameter (d-in)	0.06 [m]
Inlet Pipe Wall Thickness (b-in)	0.0029 [m]
Outlet Pipe Diameter (d-out)	0.032 [m]
Outlet Pipe Wall Thickness (b-out)	0.0029 [m]
▼ Computational Method	Quasi-stationary (Eskilson & Claesson)
▼ Heat-transfer coefficients	Computed
Inlet Pipe Thermal Conductivity (...)	0.42 [J/m/s/K]
Outlet Pipe Thermal Conductivit...	0.42 [J/m/s/K]
Grout volume thermal conductiv...	1 [J/m/s/K]
Grout to soil	0.04335 [m s K/J]
Pipe-in to grout	0.1776 [m s K/J]
Pipes-out to pipe-in	0.1478 [m s K/J]
Refrigerant volumetric heat capacity (Re...	4 [10+6 J/m <sup>3</sup> /K]
Refrigerant thermal conductivity (Ref. c...	0.48 [J/m/s/K]
Refrigerant dynamic viscosity (Therm. vi...	3 [10-3 kg/m/s]
Refrigerant density (Ref. mass dens.)	1.052 [10+3 kg/m <sup>3</sup> ]



**Slika 8-3.** Podaci koaksijalnog tipa izmjenjivača topline

Bušotinski izmjenjivači topline paralelno su povezani kako bi protok radnog fluida bio ravnomjerno raspoređen na izmjenjivače topline. Osim paralelnog povezivanja, izmjenjivači topline su mogli biti spojeni u seriju koja je manje učinkovita od paralelnog spoja te bi se tada koristila veća količina izmjenjivača topline. Napravljena su četiri scenarija s različitim brojem izmjenjivača topline: 6, 8, 10 i 16, a njihove pozicije prikazane su na Slici 8-4.



**Slika 8-4.** Prikaz pozicija bušotinskih izmjenjivača topline za sva četiri slučaja: (a) 6; (b) 8; (c) 10; (d) 16

Postavljanjem granica sustava (sjever, jug, zapad, istok, gore i dolje) primjenom opcije *Node selection* pomoću koje su se odabrali određeni čvorovi modela postavljeni su uvjeti protjecanja fluida i temperatura.

Provodljivost je bitan parametar kod modeliranja hidroloških sustava i vodonosnika jer utječe na brzinu protjecanja vode kroz tlo ili stijenu. U FeFlow-u, provodljivost se može definirati na različitim razinama, kao što su pojedinačne strane mreže, slojevi ili cijeli model. U ovom scenariju pretpostavljeno je da se u 1. sloju nalazi glina, sljedećih 11 slojeva je šljunak, a ostatak slojeva (12) je pijesak. Odabirom opcije *Conductivity* određena je provodljivost za svaki od slojeva.

Poroznost se definira kao količina praznog prostora u materijalu u odnosu na ukupni volumen materijala te je izražena kao postotak. Opcijom *Porosity* određena je poroznost svakog materijala.

Volumetrijski toplinski kapacitet je količina topline koju jedan  $m^3$  može akumulirati po jedinici promjene temperature, a izražen je mjernom jedinicom MJ/m<sup>3</sup>/K. Kao i za provodljivost i poroznost, određeni su podaci volumetrijskog toplinskog kapaciteta za svaki sloj primjenom opcije *Volumetric heat capacity*.

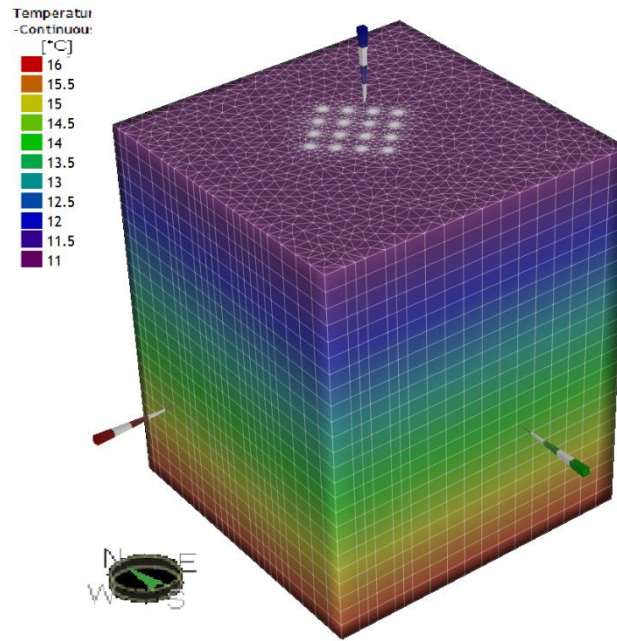
Podaci za provodljivost, poroznost i volumetrijski toplinski kapacitet prikazani su u Tablici 8-4.

**Tablica 8-4.** Postavke podataka za provodljivost, poroznost i volumetrijski toplinski kapacitet gline, šljunka i pijeska u FeFlow-u

	Provodljivost m/d	Poroznost /	Volumetrijski toplinski kapacitet MJ/m <sup>3</sup> /K
<b>Glina</b>	0	0,6	3
<b>Šljunak</b>	500	0,15	2,4
<b>Pijesak</b>	10	0,5	2,4

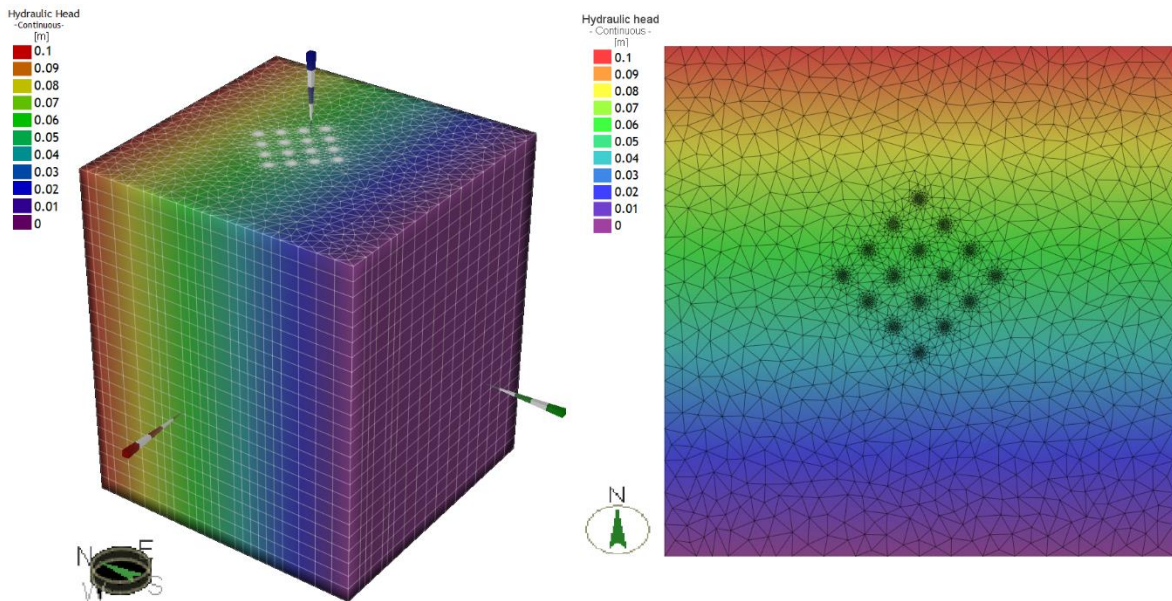
Na Slici 8-5. su prikazani rubni uvjeti temperature za sva četiri slučaja. Temperatura na površini iznosi 11 °C, dok na 120 metara iznosi 15 °C. Promjena temperature iznosi 0,04 °C/m.





**Slika 8-5.** Početni rubni uvjeti temperature iz programa FeFlow

*Hydraulic-head* je opcija kojom se postavlja visina u odnosu na neku referentnu točku u tlu. Slika 8-6. prikazuje razliku u visini sjeverne strane slučaja u odnosu na južnu stranu. Promjena visine iznosi 0,001 m/m.



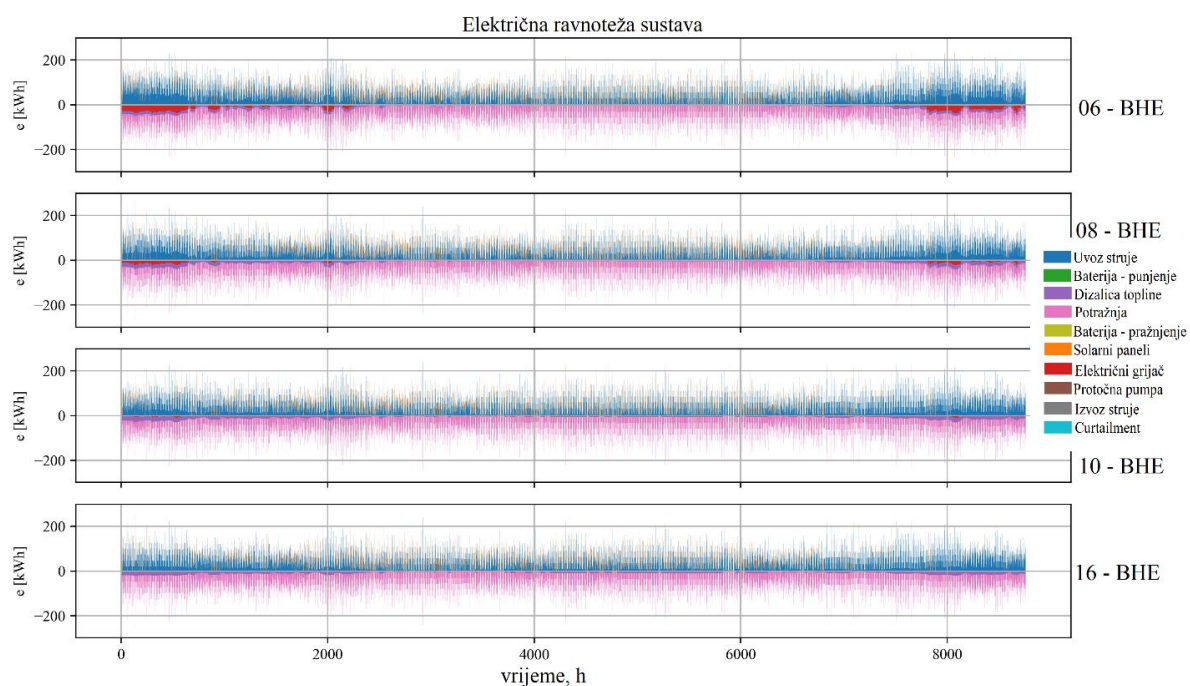
**Slika 8-6.** Prikaz početnih uvjeta razlike visina sjeverne i južne strane iz programa FeFlow



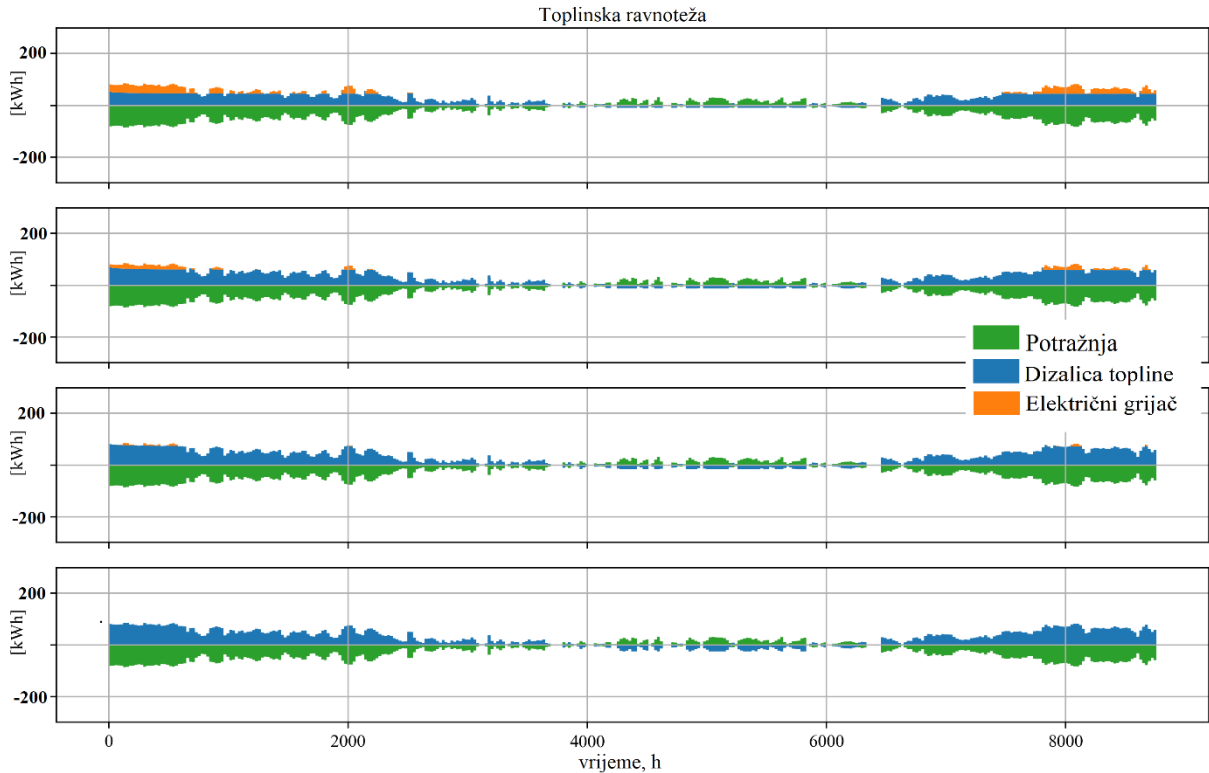
### 8.3. Analiza rezultata pojedinih scenarija

Postavljanjem podataka i pokretanjem simulacije za sva četiri slučaja dobiveni su podaci temperature ležišta u slojevima kroz čitavu godinu, izlazna i ulazna temperatura bušotinskih izmjenjivača topline, COP, protok te prosječna temperatura ležišta kroz godinu. Razmatran je utjecaj broja postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline u četiri slučaja. U scenariju 1 količina postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline je 6, u scenariju 2 ih je 8, u scenariju 3 ih je 10 i u scenariju 4 postavljeno je 16 izmjenjivača topline. Zbog jednostavnosti, rezultati će biti prikazani u odabranim ljetnim i zimskim danima za sva četiri scenarija, odnosno u sezoni grijanja, 31.12., te sezoni hlađenja na dan 01.07.. Na 2D prikazu temperature oko bušotinskih izmjenjivača topline biti će prikazan 14. sloj samog modela.

Ulazni podaci iz tablice 8-3. korišteni su za pokretanje modela RES2GEO kako bi se dobili potrebni rezultati za ekonomski i tehnički proračun dizalica topline te solarne elektrane. Slike 8-7. i 8-8. prikazuju toplinsku i električnu ravnotežu sustava.

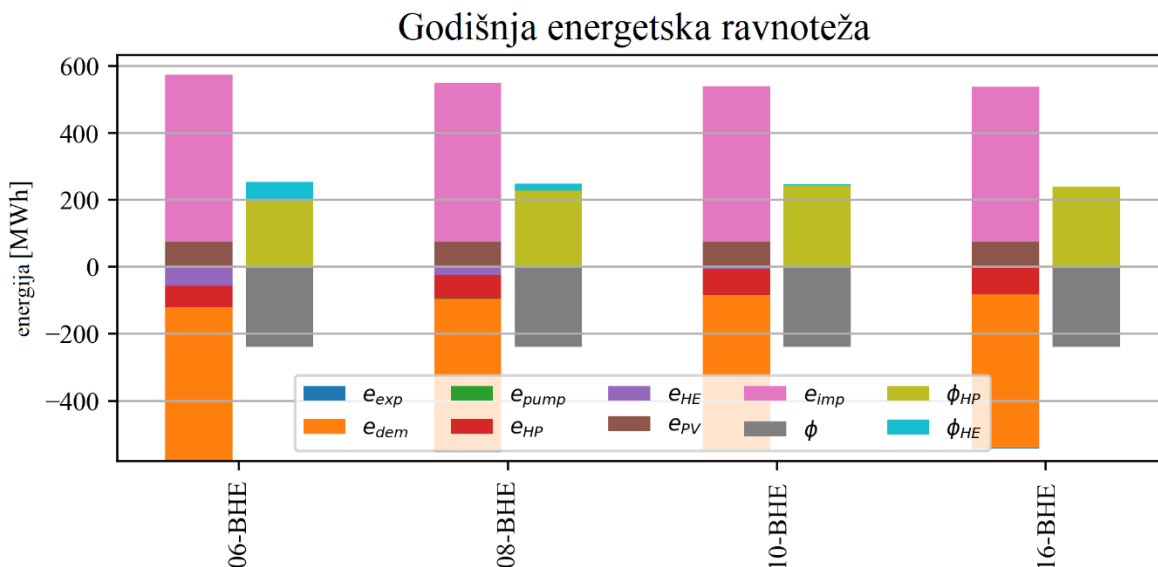


Slika 8-7. Prikaz električne ravnoteže za sva četiri slučaja



**Slika 8-8.** Prikaz toplinske ravnoteže sustava za sva četiri slučaja

Slike 8-7. i 8-8. prikazuju grafove godišnje potražnje za električnom i toplinskom energijom i iz kojih izvora su dobivene, za sva četiri slučaja. Grafovi su u sva četiri slučaja približno jednaki, osim u slučaju sa šest i osam bušotinskih izmjenjivača topline gdje se javlja veća potražnja električne energije za električni grijač. Električna energija se većinom uvozi dok se na nekim mjestima može vidjeti i njezina proizvodnja pomoću solarnih panela. Toplinska energija se proizvodi pomoću dizalice topline dok je u prva dva slučaja potrebno koristiti i električni grijač kako bi se zadovoljila sama potražnja.



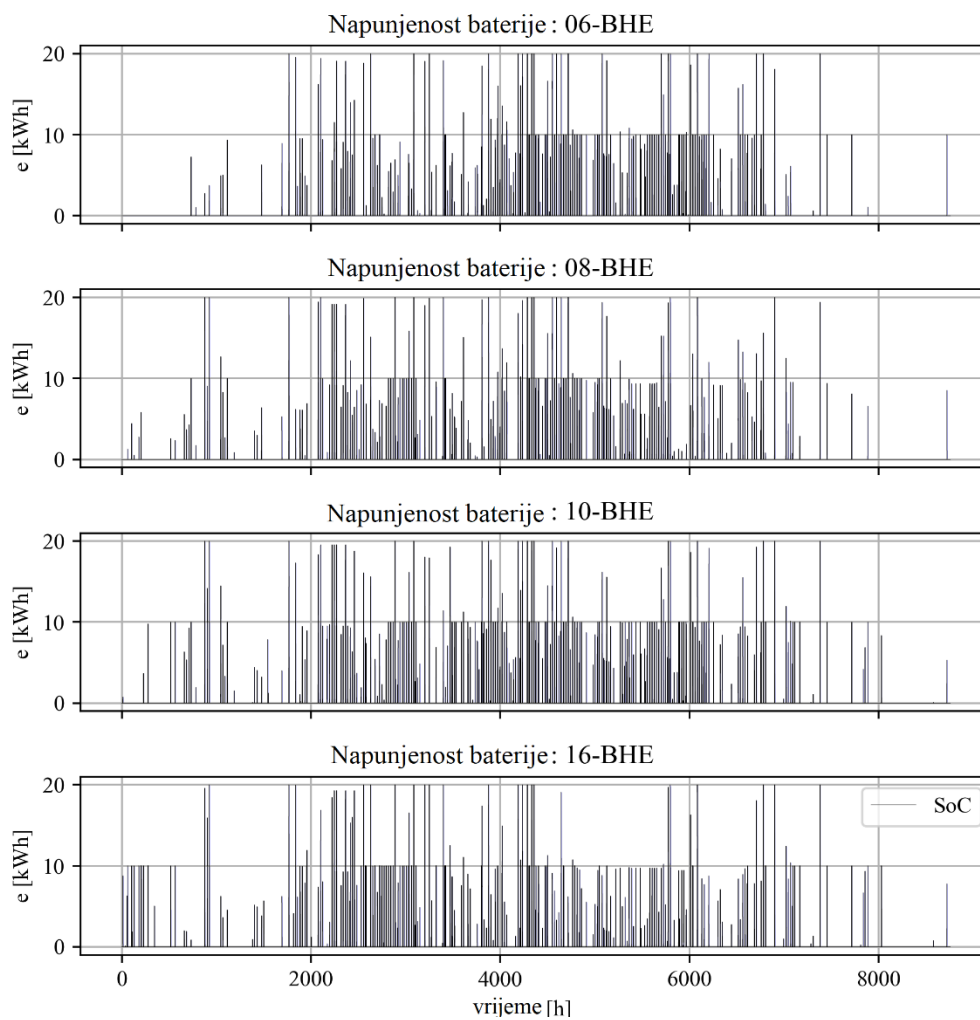
**Slika 8-9.** Godišnja energetska ravnoteža u sva četiri slučaja

Legenda:  $e_{exp}$  – izvoz;  $e_{dem}$  – potražnja;  $e_{pump}$  – protočna pumpa;  $e_{HP}$  – dizalica topline;  $e_{HE}$  – električni grijač;  $e_{PV}$  – solarna elektrana;  $e_{imp}$  – uvoz;  $\phi$  – potražnja;  $\phi_{HP}$  – dizalica topline;  $\phi_{HE}$  – električni grijač

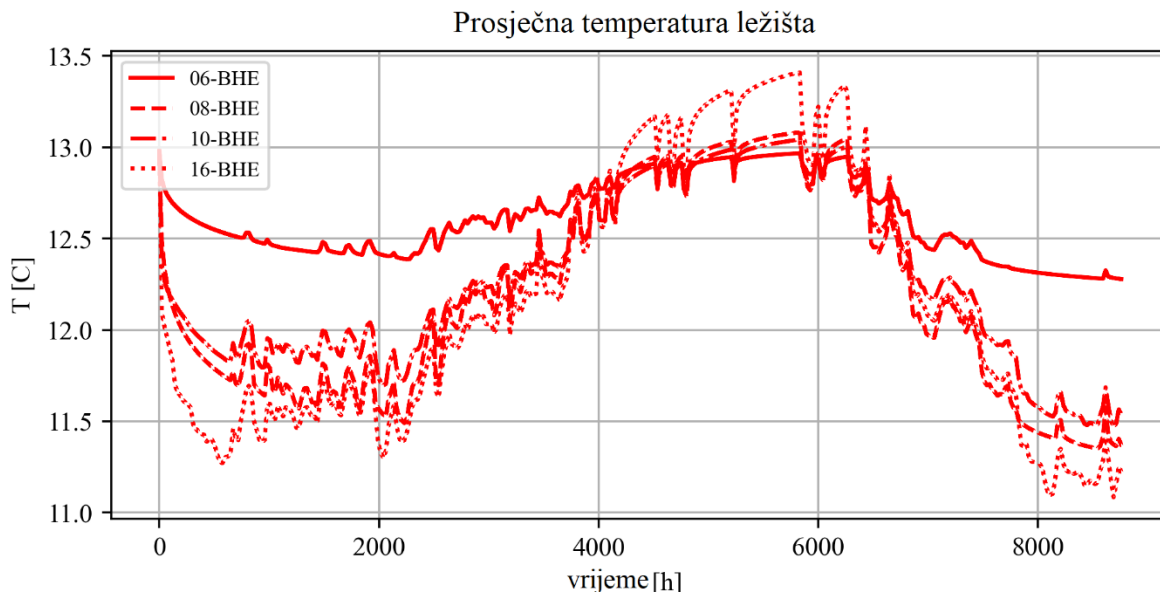
Lijeva strana svakog slučaja sa Slike 8-9. prikazuje godišnju električnu ravnotežu dok desna strana prikazuje godišnju toplinsku ravnotežu. Godišnja energetska ravnoteža prikazuje utjecaj promjene količine korištenih bušotinskih izmjenjivača topline, odnosno povećanje potrebe za korištenjem električnih grijača u slučajevima kada imamo manji broj bušotinskih izmjenjivača topline. U slučaju sa 16 bušotinskih izmjenjivača topline, toplina je u potpunosti pokrivena s dizalicama topline, dok se u ostalim slučajevima javlja potreba za korištenjem električnog grijača. Povećanje korištenja električnih grijača znači da se toplina daje s manjom učinkovitošću, a s time dolazi i do povećanja potražnje za električnom energijom i mogućeg povećanja uvoza električne energije.

Promjena potražnje za električnom i toplinskom energijom utječe i na napunjenost baterija. U zimskim danima, kada je povećana potražnja za toplinskom energijom, povećava se i potražnja za električnom energijom. S obzirom da je već utvrđeno kako se u slučajevima s manje bušotinskih izmjenjivača topline povećava korištenje električnih grijača, povećava se i potražnja za električnom energijom što znači da će se tada baterije više isprazniti. Na Slici 8-10. može se vidjeti kako je napunjenost baterije u slučaju sa 16 bušotinskih izmjenjivača veća u odnosu na

slučaj sa 6 izmjenjivača topline. Odnosno, može se reći kako broj bušotinskih izmjenjivača opada, smanjuje se i napunjenost baterije.

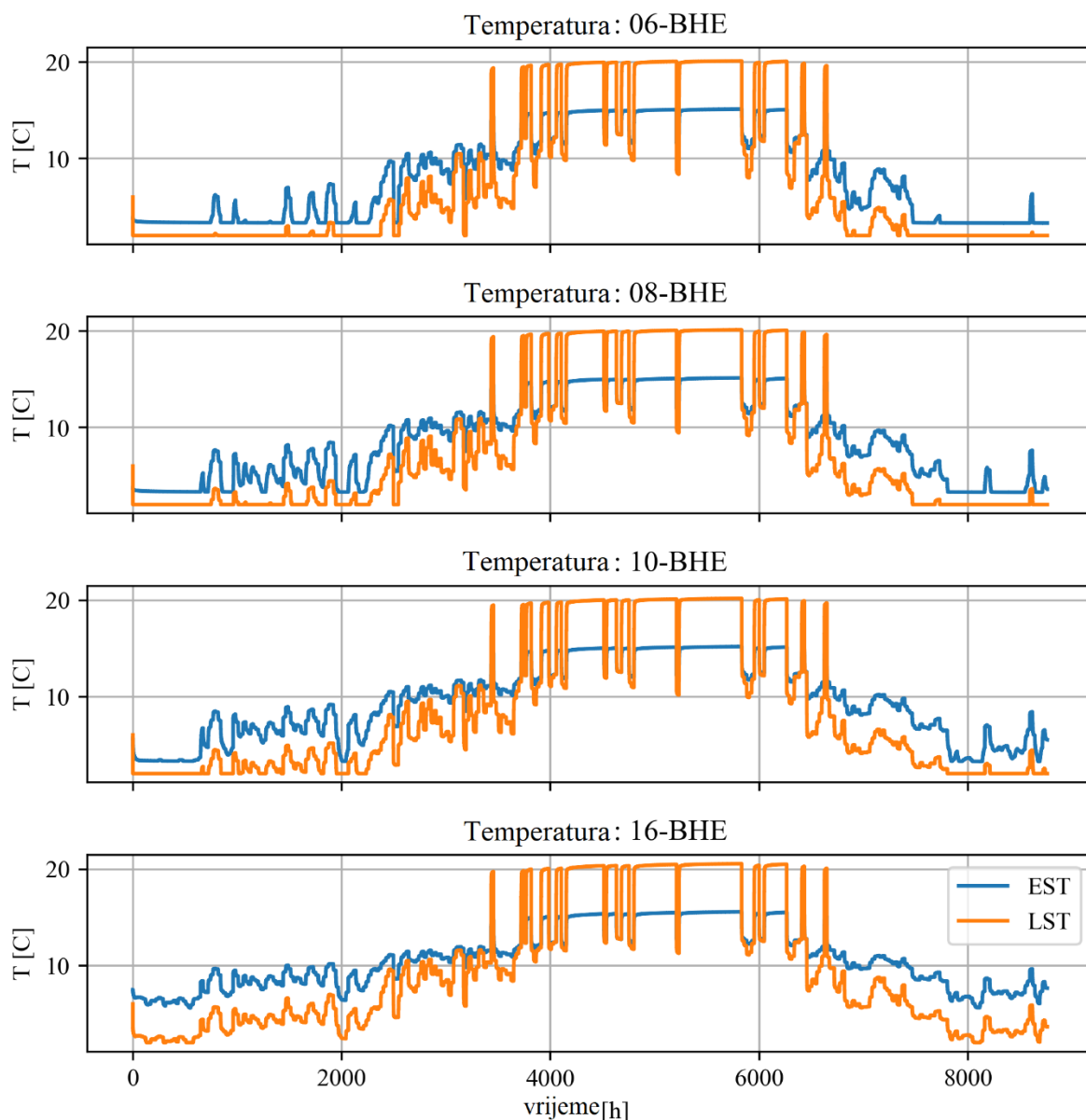


**Slika 8-10.** Stanje napunjenosti baterije u sva četiri slučaja; SoC – napunjenost baterije (engl. *State of Charge*)



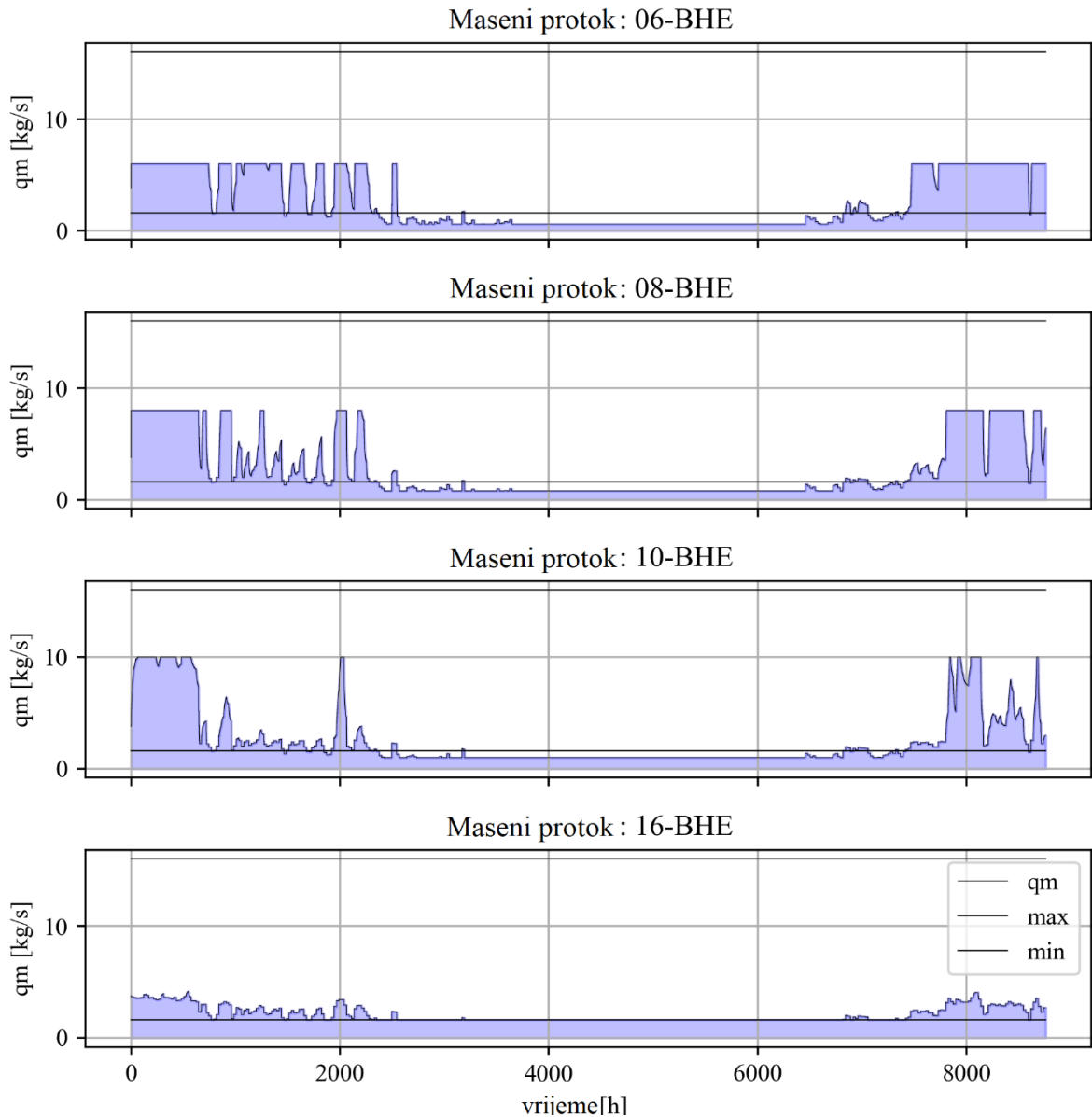
**Slika 8-11.** Prosječna temperatura ležišta za sva četiri slučaja

Slika 8-11. prikazuje godišnju prosječnu temperaturu ležišta za pojedino vremensko razdoblje. Prosječna temperatura ležišta predstavlja prosjek temperature čvorova koji se nalaze unutar 0,5 metara od centralne osi bušotinskih izmjenjivača topline. Do većih promjena, s obzirom na razdoblje godine, dolazi kod slučaja s osam, deset i šesnaest bušotinskih izmjenjivača topline, dok je kod slučaja sa šest izmjenjivača topline razlika u temperaturi ležišta nešto manja. U zimskom periodu, od 0 do 2180 sata te od 6500 do 8760 sata, temperature ležišta idu i do ispod 11,5°C. Odnosno, što je veći broj bušotinskih izmjenjivača topline, to dovodi do većeg pothlađivanja ležišta. U ljetnom periodu, od 4000 do 6200 sata, može se primijetiti veća temperatura ležišta zbog prijenosa veće temperature iz bušotinskih izmjenjivača topline na stijenu.



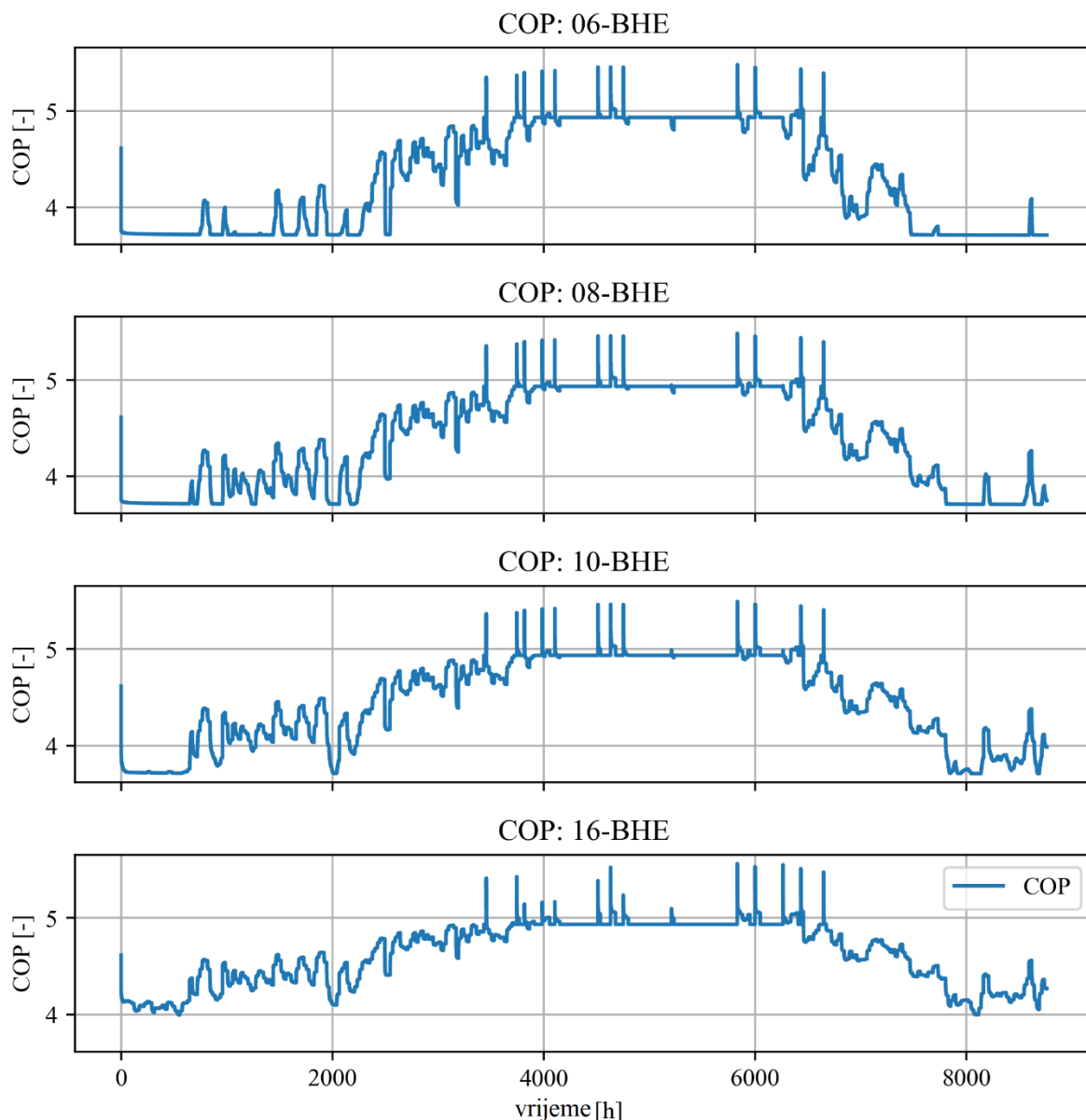
**Slika 8-12.** Ulazne i izlazne temperature u bušotinskim izmjenjivačima topline

Ulazna temperatura (EST, engl. *entering source temperature*) sredstva bušotinskih izmjenjivača topline označena je plavom bojom, dok je izlazna temperatura (LST, engl. *leaving source temperature*) označena narančastom bojom na Slici 8-12. Vidljivo je da nema prevelikih razlika u podacima ulaznih i izlaznih temperatura uspoređujući sva četiri slučaja.



**Slika 8-13.** Maseni protok za sva četiri slučaja

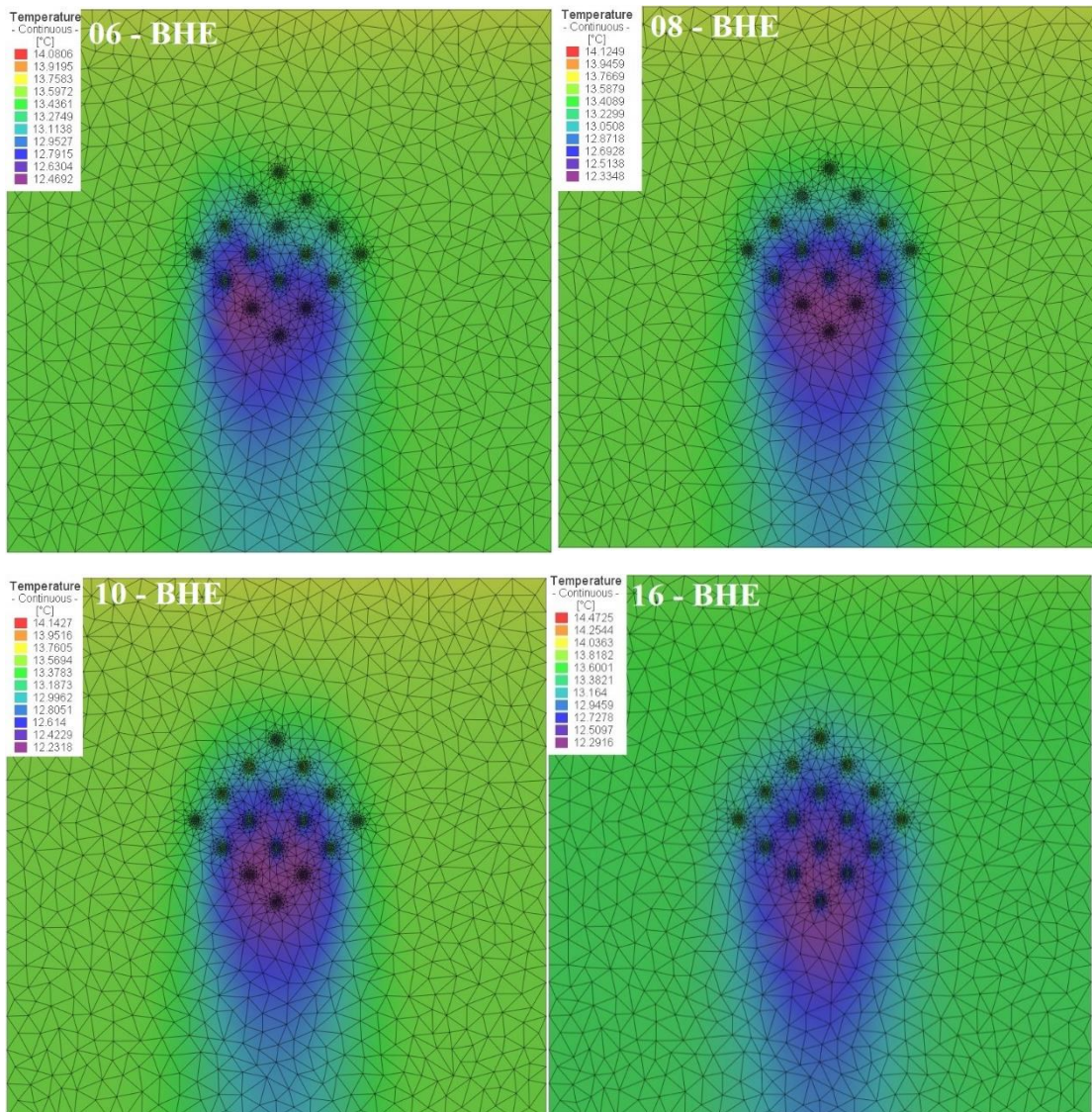
Maksimalan maseni protok po jednom bušotinskom izmjenjivaču topline iznosi 1 kg/s, što znači da ukoliko imamo više bušotinskih izmjenjivača topline, to ćemo imati i veći maseni protok. Maseni protok je ograničen kako bi se izbjegla moguća oštećenja na cijevima. Što je veći maseni protok, biti će i bolja učinkovitost sustava, odnosno prenositi će se više topline iz ležišta. Na Slici 8-13. može se vidjeti da su prva tri slučaja ograničena maksimalnim protokom dok slučaj sa 16 bušotinskih izmjenjivača topline nema to ograničenje jer je toplina raspoređena na veći broj bušotinskih izmjenjivača topline.



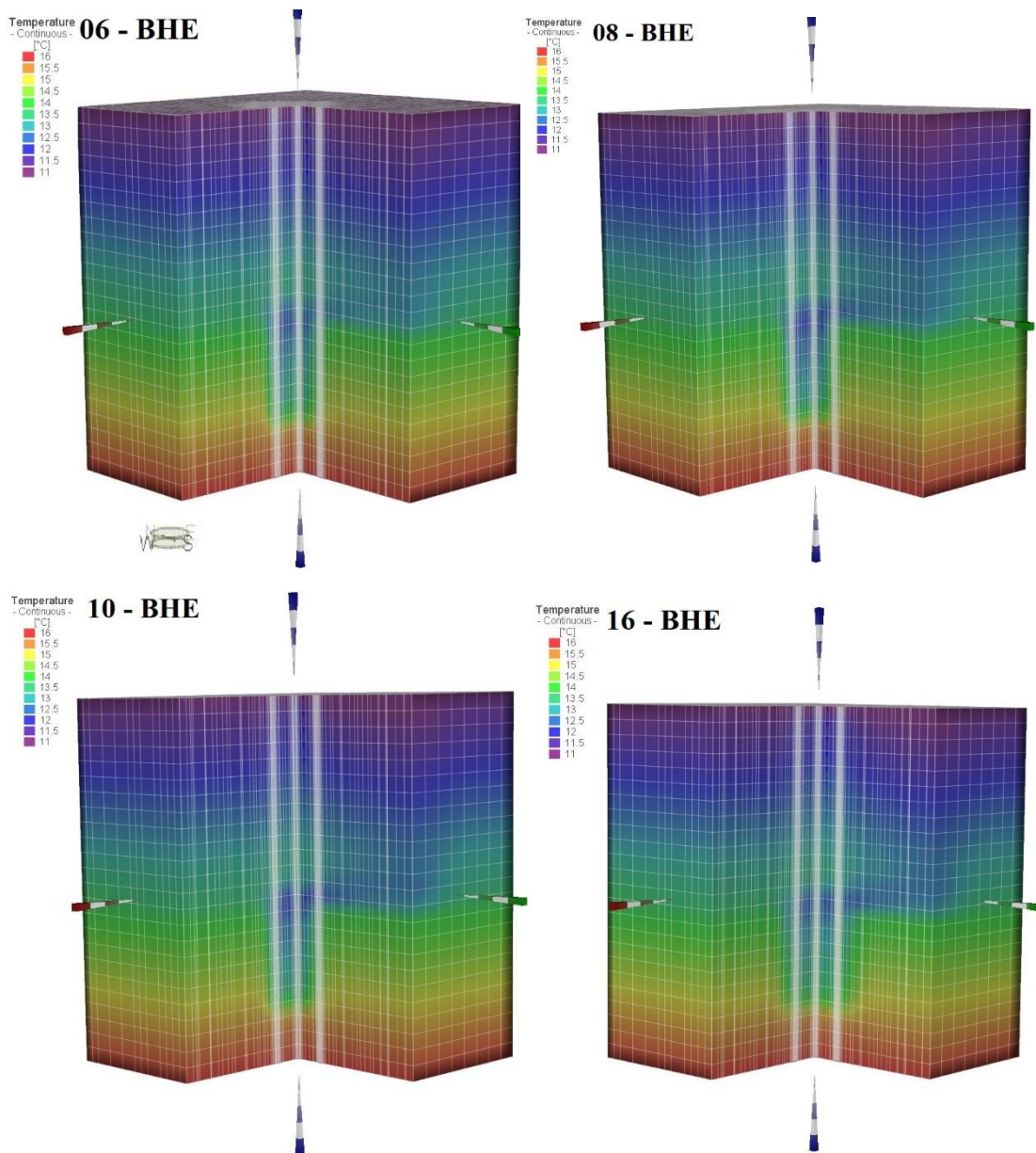
**Slika 8-14.** Koeficijent učinkovitosti za sva četiri slučaja

Slika 8-14. pokazuje koeficijent učinkovitosti za svaki od slučaja. Kao što je već navedeno u ranijem odlomku, COP je omjer količine hlađenja ili grijanja toplinske pumpe i količine energije, u ovom slučaju električne energije, koju koristi. Što je veći COP, bolja je i učinkovitost dizalice topline. U sezoni grijanja je vidljivo da je COP bolji ako imamo više bušotinskih izmjenjivača topline. Uzrok tome je veća potreba za električnom energijom koju trebamo dovesti da bi dobili željenu količinu topline.





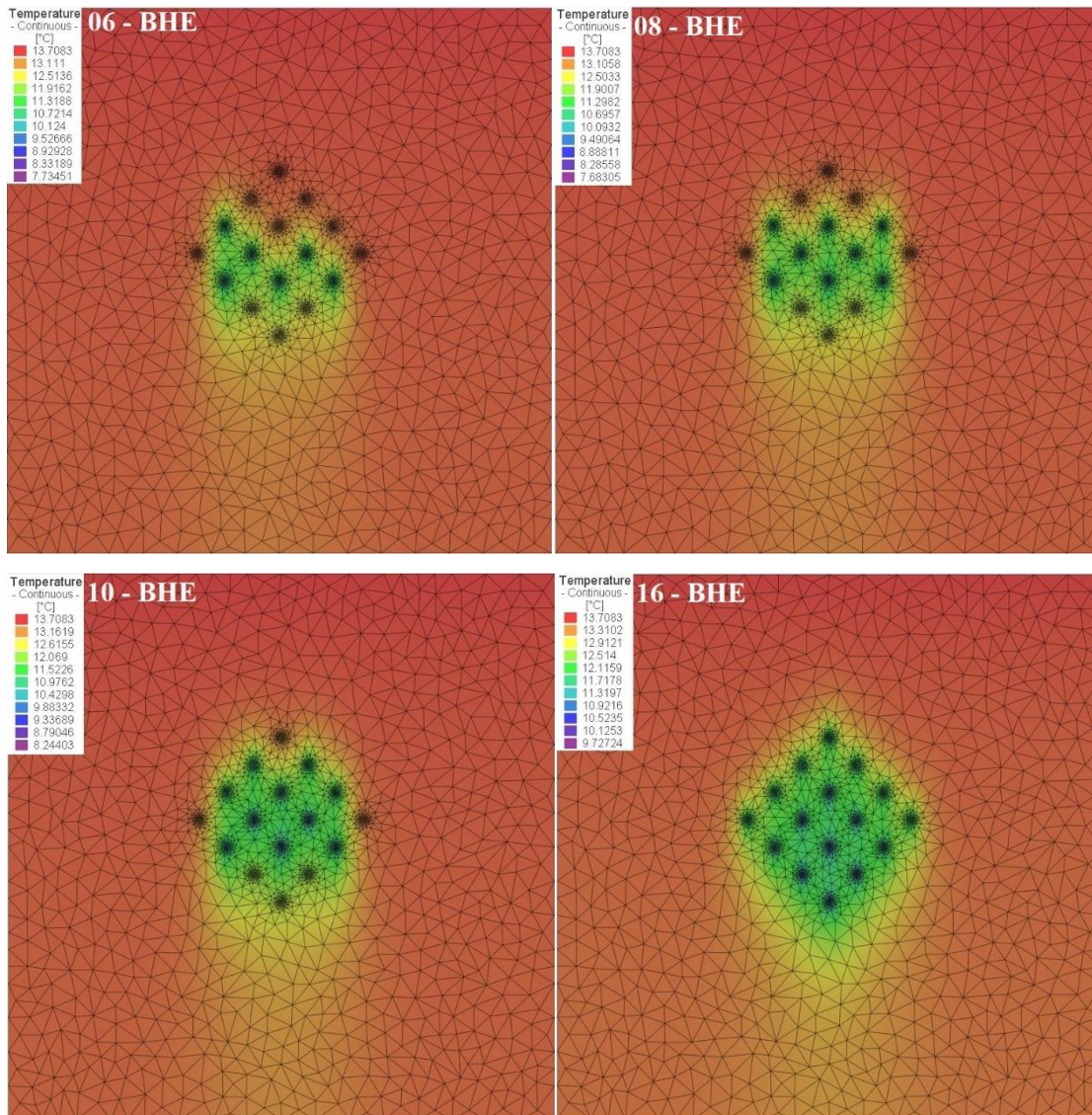
Slika 8-15. Prikaz stanja ležišta u sva četiri scenarija, 01.07.



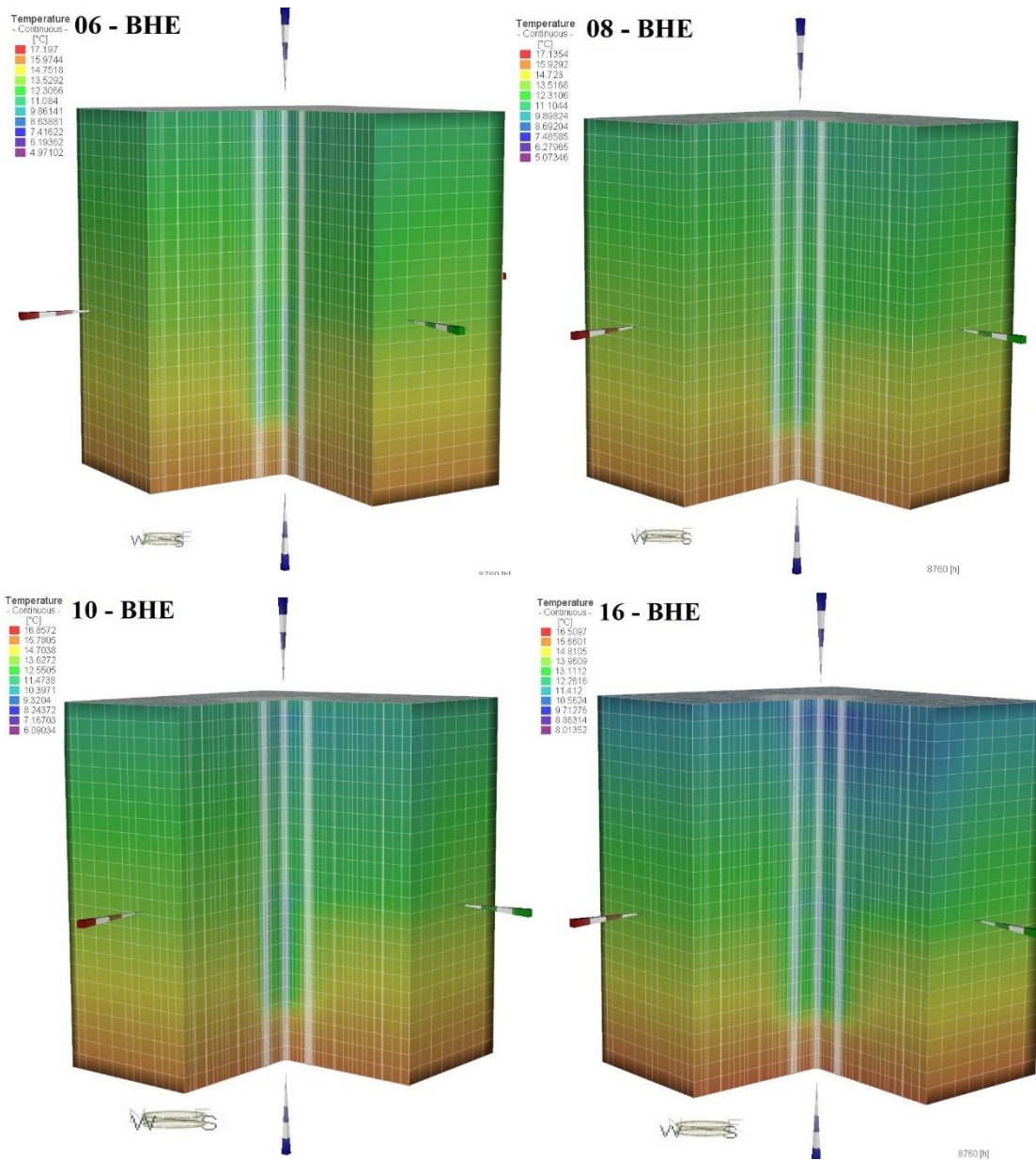
**Slika 8-16.** Prikaz stanja ležišta u 3D-u u sva četiri scenarija, 01.07.

Na Slikama 8-15 i 8-16. može se vidjeti temperaturna promjena ležišta u 14. sloju modela te poprečni presjek modela prilikom hlađenja u ljetnom periodu. Vidljivo je da dolazi do veće promjene temperature u slučaju sa 16 bušotinskih izmjenjivača topline zato što se tada i izmjenjuje više topline. U sezoni hlađenja bušotinski izmjenjivači prenose toplinu i zagrijavaju stijene, te zbog toga može doći do pregrijavanja stijena.





Slika 8-17. Prikaz stanja ležišta u sva četiri scenarija, 31.12.



**Slika 8-18.** Prikaz stanja ležišta u 3D-u u sva četiri scenarija, 31.12.

Zimski period, odnosno period grijanja, prikazan je na Slikama 8-17. i 8-18. Kao i u slučaju na dan 01.07. uočljivo je da je veća promjena temperature ležišta kada je postavljen veći broj bušotinskih izmjenjivača topline. Temperatura stijene oko bušotinskih izmjenjivača topline je manja zato što oni preuzimaju toplinu potrebnu za grijanje, a tako se hlade stijene.

### 8.3.1. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza odnosi se na procjenu troškova i koristi kako bi se provjerila održivost projekta, mogućnosti ulaganja, događaja ili bilo kojeg drugog pitanja. Uključuje identificiranje, procjenu i usporedbu troškova i koristi, te određenih pojmova kojima se određuje isplativost projekta. Proces analize pridonosi optimalnoj alokaciji i korištenju resursa, čineći važan element u procesu donošenja odluka (WallStreetMojo, 2023).

U ovom radu biti će određeni diskontinuirani i kumulativni neto novčani tokovi te troškovi energije, LCOE (engl. *Levelized cost of energy*).

Neto novčani tok je metrika profitabilnosti koja predstavlja količinu novca koju je tvrtka pridobila ili izgubila tijekom određenog razdoblja.

Diskontinuirani neto novčani tok odnosi se na niz novčanih tokova koji se ostvaruju tijekom određenog vremenskog razdoblja, obično za vrijeme trajanja projekta. To su novčani prihodi i troškovi koji se događaju u različitim vremenskim razdobljima i koji su povezani s provedbom projekta. Svaki od tih novčanih tokova diskontira se na sadašnju vrijednost kako bi se uzela u obzir vrijednost novca s obzirom na vrijeme. Diskontiranje je proces kojim se budući novčani tokovi prilagođavaju vrijednosti u sadašnjosti koristeći odgovarajuću diskontnu stopu (Wikipedia, 2023).

Kumulativni neto novčani tok predstavlja akumulirani neto novčani tok tijekom vremena. To znači da se svaki pojedinačni neto novčani tok zbraja ili oduzima od prethodnih kumulativnih neto novčanih tokova. Ovaj koncept pomaže u praćenju ukupne akumulirane financijske slike projekta tijekom vremena (Bizfluent, 2017).

LCOE je mjera koja se koristi za procjenu i usporedbu alternativnih metoda proizvodnje energije. LCOE predstavlja trošak ukupne električne energije proizvedene tijekom pretpostavljenog vijeka trajanja, gdje su uračunati ukupni kapitalni i operativni troškovi. LCOE je također važan izračun koji financijskim analitičarima omogućuje usporedbu različitih tehnologija za proizvodnju energije, poput vjetra, solarne i nuklearne energije. Proračun LCOE-a će pokazati isplati li se financirati neki projekt ili ne (CFI, 2023).

Kapitalni troškovi su izdaci koji se ulažu u projekt sa svrhom ostvarivanja dobiti. Konkretno za ovaj slučaj, u kapitalne troškove ubrajamo: izradu bušotine, bušotinske izmjenjivače topline, dizalicu topline, ugradnju dizalice topline i bušotinskih izmjenjivača topline, potrebnu dodatnu opremu i spajanje sustava.

Operativni troškovi se definiraju kao novac koji se troši na materijal ili plaće u svakodnevnom poslovanju poduzeća ili projekta. Operativni troškovi nisu dugotrajna imovina. Primjer operativnog troška za ovaj slučaj je korištenje električne energije iz distribuiranog sustava za rad dizalice topline (Casual, 2022).

Prema metodologiji Lazarda (2021) proračunat je LCOE za sustav dizalice topline za sva četiri slučaja i solarnu elektranu. Prema Danish Energy Agency (2021), određeni su kapitalni troškovi i operativni troškovi. Kapitalni trošak jednog bušotinskog izmjenjivača topline iznosi 60 €/m, a električnog grijača 685 €/kW. Ovisno o količini bušotinskih izmjenjivača topline i kapacitetu električnog grijača proračunat je kapitalni trošak za pojedinu komponentu. Detaljni prikaz ulaznih podataka za sva četiri slučaja dizalice topline i solarnu elektranu prikazani su u Tablicama 8-5. i 8-6.

**Tablica 8-5.** Ulazni podaci za ekonomsku analizu dizalice topline

	<b>S01</b>	<b>S02</b>	<b>S03</b>	<b>S04</b>
<b>Kapacitet dizalice topline, MW</b>	0,045	0,08	0,09	0,09
<b>Kapacitet električnog grijača, MW</b>	0,05	0,025	0,01	0
<b>Faktor kapaciteta</b>	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
<b>Trošak električne energije, €/MWh</b>	74	74	74	74
<b>Fiksni operativni troškovi, €/kW</b>	6,7	6,7	6,7	6,7
<b>Stopa eskalacije operativnih troškova</b>	2,25%	2,25%	2,25%	2,25%
<b>Kapitalna struktura</b>				
<b>Dug</b>	60%	60%	60%	60%
<b>Trošak duga</b>	8%	8%	8%	8%
<b>Trošak kapitala</b>	12%	12%	12%	12%
<b>Vrijeme, godina</b>	20	20	20	20
<b>Kapitalni troškovi</b>				



<b>Dizalica topline, materijali i ugradnja, €</b>	57 000	57 000	57 000	57 000
<b>Električni grijač, €</b>	34 250	17 125	6850	0
<b>Bušotinski izmjenjivači topline, €</b>	34 250	48 000	60 000	96 000
<b>Ukupni kapitalni trošak, €/kW</b>	127 250	122 130	123 850	153 000

**Tablica 8-6.** Ulazni podaci za ekonomsku analizu solarne elektrane

<b>Kapacitet solarne elektrane, MW</b>	0,06
<b>Faktor kapaciteta</b>	13,32%
<b>Fiksni operativni troškovi, €/kW</b>	2,97
<b>Stopa eskalacije operativnih troškova</b>	2,25%
<b>Kapitalna struktura</b>	
<b>Dug</b>	60%
<b>Trošak duga</b>	8%
<b>Trošak kapitala</b>	12%
<b>Vrijeme, godina</b>	20
<b>Kapitalni troškovi, €/kW</b>	1400

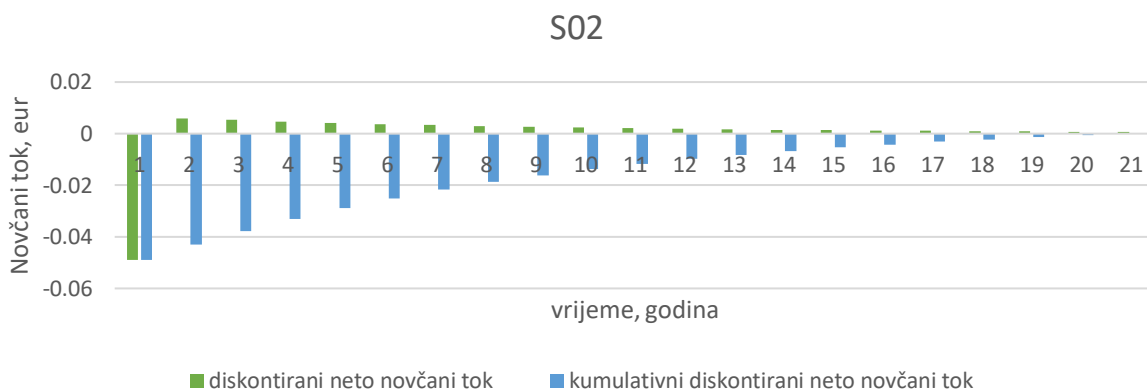
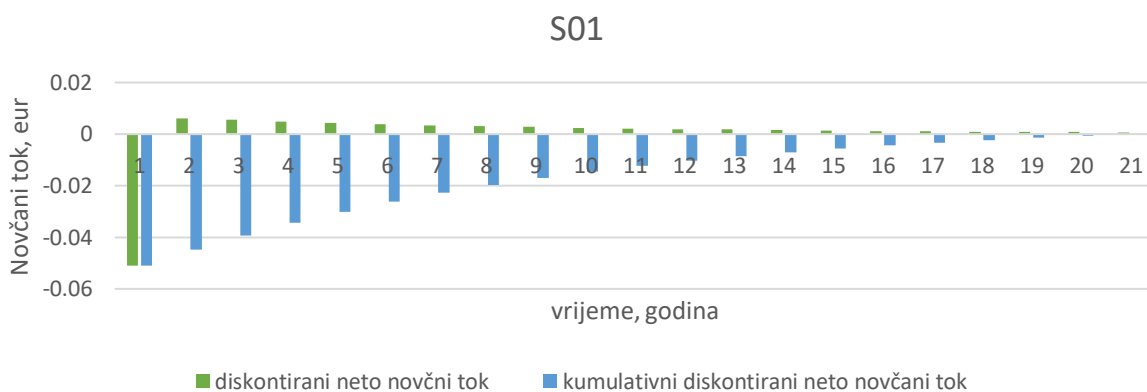
Prema metodologiji Lazarda (2021) i uvrštavanjem podataka u određene formule dobiveni su rezultati LCOE-a za svaki pojedini slučaj koji su prikazani u Tablici Tablica 8-7.

**Tablica 8-7.** Rezultati LCOE-a za svaki pojedini slučaj

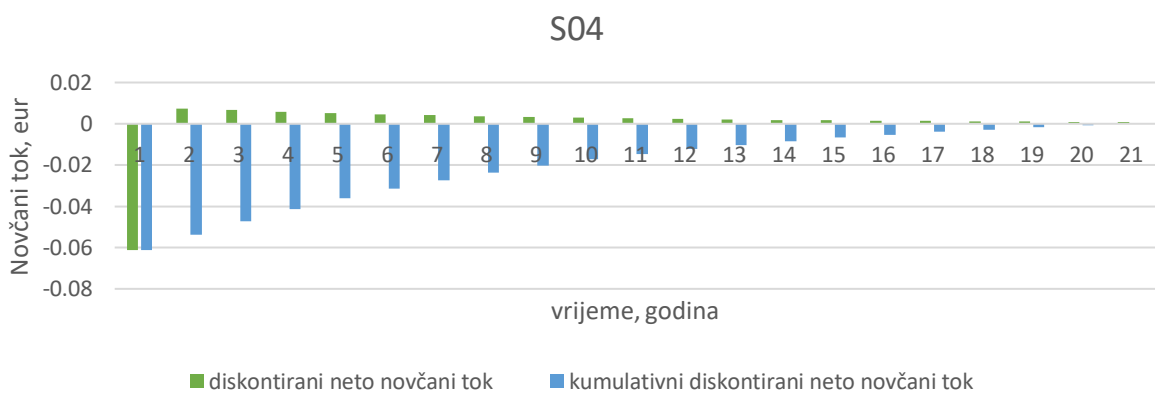
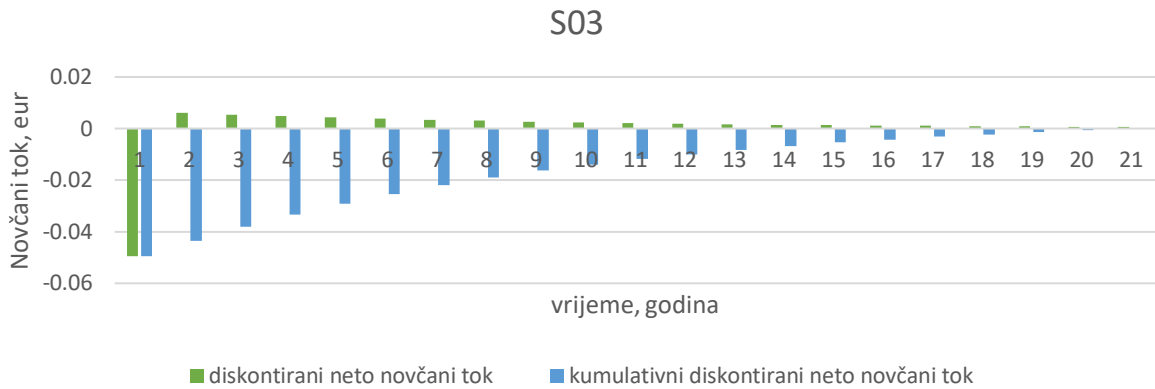
	<b>S01</b>	<b>S02</b>	<b>S03</b>	<b>S04</b>	<b>PV</b>
<b>LCOE, €/MWh</b>	42,12	23,18	20,99	25,70	61,89

Vidljivo je da je u prvom slučaju trošak energije puno veći od ostalih slučajeva, a razlog tome je veća potreba za električnim grijačem što znači da je potrebno dovesti i više električne energije za njegov rad. Uspoređujući dobivene rezultate sa sadašnjom cijenom toplinske energije za kućanstva spojena na CTS sustav koja iznosi 0,050594 €/kWh (HEP-toplinarstvo, 2023), cijenom plina oko 0,055 €/kWh (GPZ, 2023), te cijenom biomase oko 0,045 €/kWh (Drvni pelet, 2023), isplativo je investirati u instalaciju sustava sva četiri slučaja.

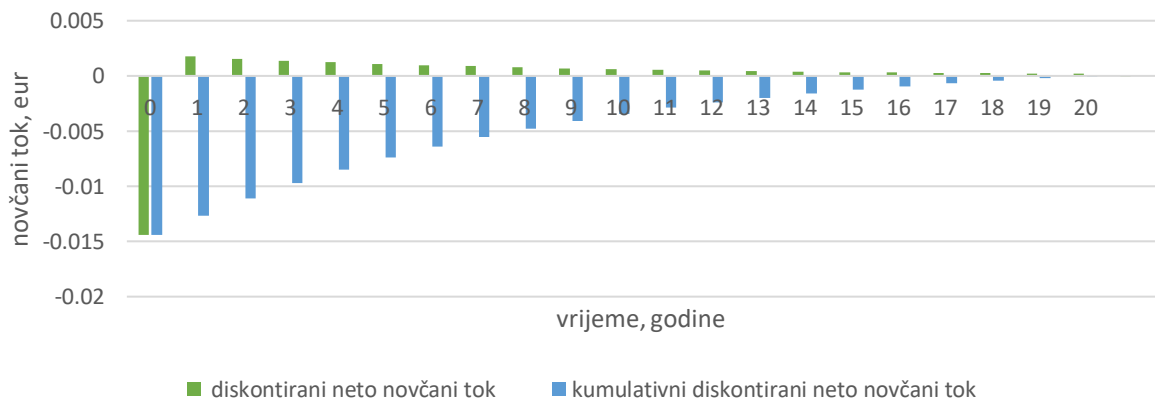
LCOE PV-a iznosi 0,06189 €/kWh što je niže od cijene električne energije prema HEP-elektri (2023) koja iznosi 0,074789 €/kWh.







**Slika 8-19.** Grafički prikaz diskontinuiranog i kumulativnog neto novčanog toka u sva četiri slučaja



**Slika 8-20.** Grafički prikaz diskontinuiranog i kumulativnog neto novčanog toka solarne elektrane

Na Slikama 8-19. i 8-20. se može vidjeti da su diskontirani i kumulativni neto novčani tokovi u prvoj godini u minusu. Ta godina zapravo označava godinu investiranja u projekt koji još nije napravljen pa zbog toga ne postoje prihodi koji bi mogli smanjiti novčane tokove. Diskontirani

neto novčani tok je pozitivan za vrijeme trajanja projekta, a u zadnjoj godini on iznosi 0. Diskontinuirani neto novčani tok se u zadnjoj godini postavlja na nulu kako bi se osigurao dosljedan pristup prilikom izračuna LCOE, kako bi se omogućila usporedba LCOE-a između različitih izvora energije.

## 9. ZAKLJUČAK

Povećanje korištenja obnovljivih izvora energije u svim sektorima aktualno je dugi niz godina. Paketom „Spremni za 55%“, koji je dio Europskog zelenog plana, nastoji se potaknuti države članice EU, ali i ostale države svijeta, na proizvodnju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora energije. Zbog veliki investicijskih troškova, kućanstva i poduzetnici ne žele investirati u obnovljivu energiju. Stoga je bitno osigurati novčane poticaje kako bi se odlučili na investiranje takvih projekata.

Kako bi se smanjila potrošnja električne i toplinske energije potrebno je povećati energetske učinkovitost stambenih objekata. U zgradarstvu je potrebno graditi stambene objekte nulte emisije zbog očuvanja okoliša i povećanja energetske učinkovitosti. Zbog toga je zgradarstvo podvrgnuto zakonima koji nalažu kriterije izgradnje novih stambenih objekata. Pridržavanjem smjernica izgradnje stambenih objekata i kvalitetnim projektiranjem nastoje se sagraditi zgrade s visokim energetske svojstvima.

Solarna energija je najkorišteniji oblik obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije kada su u pitanju kućanstva. Također, solarni kolektori se mogu koristiti i za zagrijavanje potrošne tople vode. Kada se govori o zagrijavanju prostorija pomoću obnovljivih izvora energije najkorišteniji energent je biomasa. U današnje vrijeme sve veću pozornost privlače dizalice topline koje za izvor topline mogu koristiti zrak, vodu i tlo. Geotermalna energija smatra se neiscrpnim oblikom energije, te se zbog gotovo konstante temperature tla smatra dobrim izvorom toplinske energije.

Da bi se postigla što bolja energetska učinkovitost geotermalne dizalice topline potrebno je poznavati hidrogeološke parametre podzemlja. U sva četiri slučaja postavljeni su isti hidrogeološki parametri. Model se sastoji od slojeva gline, šljunka i pijeska. Razlika je u broju postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline. Prema dobivenim podacima vidljivo je da slučaj sa 16 bušotinskih izmjenjivača topline prenosi veću količinu topline, a samim time u tom slučaju nema potrebe za uključivanjem električnog grijača. Također, u odnosu na slučajeve sa 6, 8 i 10 bušotinskih izmjenjivača topline, slučaj sa 16 izmjenjivača ima bolji koeficijent učinkovitosti zato što predaje veću količinu topline u odnosu na ostala tri slučaja. Uspoređujući temperaturne promjene stijena u zimskom i ljetnom periodu, zaključeno je da ukoliko imamo veći broj bušotinskih izmjenjivača topline, stijena se zimi više ohladi, a ljeti zagrije zbog veće prenesene

količine topline. Na 3D presjecima slojeva šljunka može se vidjeti da toplina brže „odlazi“ od postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline u odnosu na glinu i pijesak, zbog bolje provodljivosti šljunka.

Ekonomskom analizom provjerena je isplativost projekata. S obzirom na sadašnje cijene energenata korištenih za dobivanje toplinske energije te cijene toplinske energije CTS sustava isplativo je investirati u sva četiri slučaja.

## 10. LITERATURA

1. ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR (EIHP), 2022, Energija u Hrvatskoj: Godišnji energetska pregled 2021, Zagreb, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske
2. KUREVIJA, T., n.d., Primijenjena termogeologija i korištenje geotermalnih dizalica topline, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
3. LEKIĆ BRETTSCHEIDER, A., PERKOVIĆ, L., KUREVIJA, T., MACENIĆ, M., 2023, Theoretical Analysis of Using Multiple Borehole Heat Exchangers for Production of Heating and Cooling Energy in Shallow Geothermal Reservoirs with Underground Water Flow, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
4. LIMBERGER, J., BOXEM, T., PLUYMAEKERS, M., BRUHN, D., MANZELLA, A., CALCAGNO, P., BEEKMAN, F., CLOETINGH, S., DIDERIK VAN WEES, J., 2018, Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 82, part 1
5. MINISTARSTVO PROSTORNOG UREĐENJA GRADITELJSTVA I DRŽAVNE IMOVINE (MPGI), 2019, Smjernice za zgrade gotovo nulte energije, Zagreb, Prvi dio
6. NARODNE NOVINE br. 127/19, 2021, Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, Zagreb, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske
7. PERKOVIĆ, L., LEKO, D., LEKIĆ BRETTSCHEIDER, A., MIKULČIĆ, H., S. VRBANOV, P., 2011, Integration of Photovoltaic Electricity with Shallow Systems for Residential Microgrids: Proof of Concept and Techno-Economic Analysis with RES2GEO Model, Energies, 14
8. SLIWA, T., VYTYAZ, O., SAPINSKA-SLIWA, A., 2016, Study on efficiency of deep borehole heat exchangers, ResearchGate
9. TOTH, A., BOBOK, E., 2017, Borehole Heat Exchangers: Flow and Heat Transfer to Geothermal Systems, 287-290, Chapter 13

Web izvori:

10. BIZFLUENT, 2017, Net Cash Flow Vs. Cumulative Cash Flow  
URL: <https://bizfluent.com/13653651/net-cash-flow-vs-cumulative-cash-flow>  
(10.08.2023.)
11. BUILDING DESIGN, 2023, What are the benefits and challenges of using renewable energy sources in buildings?  
URL: <https://www.linkedin.com/advice/0/what-benefits-challenges-using-renewable-energy> (15.07.2023.)
12. CASUAL, 2022, Capital expenditure vs Operating expenditure  
URL: <https://www.causal.app/whats-the-difference/capital-expenditure-vs-operating-expenditure> (10.08.2023.)
13. CFI, 2023, Levelized cost of energy (LCOE)  
URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/> (10.08.2023.)
14. CIELO, 2023, Types of Heat Pumps: What are They, How Do They Work, and Which Is the Best for You?  
URL: <https://cielowigle.com/blog/types-of-heat-pumps/#section-4> (25.07.2023.)
15. CONSOLIDATE ELECTRIC COOPERATIVE, 2023, Ground source heat pumps  
URL: <https://www.consolidatedelectric.com/ground-source-heat-pumps> (25.07.2023.)
16. DANISH ENERGY AGENCY, 2021, Technology Data for Individual Heating Plants  
URL: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-individual-heating-plants> (15.08.2023.)
17. DRVNI PELET, 2023, Pelet je gorivo budućnosti  
URL: <https://www.drvnipelet.hr/o-drvnom-peletu/> (25.08.2023.)
18. ENERGY, 2019, Ground-source heat pump (GSHP) – households  
URL: <https://energy.nl/data/ground-source-heat-pump-gshp-households/> (27.07.2023.)
19. EPA, 2023, Energy Resources for State and Local Governments  
URL: <https://www.epa.gov/statelocalenergy/local-renewable-energy-benefits-and-resources> (15.07.2023.)
20. EUROPEAN COMMISSION 2023, Heat pumps  
URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heat-pumps\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heat-pumps_en) (16.07.2023.)

21. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2023, Aquifer  
URL: <https://www.eea.europa.eu/archived/archived-content-water-topic/water-resources/themes/water/wise-help-centre/glossary-definitions/aquifer> (05.08.2023.)
22. EUROSTAT, 2023, Energy balance flow for HR 2021  
URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html> (28.03.2023.)
23. GPZ, 2023, Pregled cijena po distribucijskim područjima GPZ – Opskrbe  
URL: [https://www.gpz-opskrba.hr/pregled-cijena-po-distribucijskim-podrucjima-gpz-opskrbe/1735?energetski\\_subjekt\\_id=1](https://www.gpz-opskrba.hr/pregled-cijena-po-distribucijskim-podrucjima-gpz-opskrbe/1735?energetski_subjekt_id=1) (25.08.2023.)
24. GREENMATCH, 2023, Heat Pumps in 2023: What, How & Why? + Pros and Cons  
URL: <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump#What-Are-the-Pros-and-Cons-of-Heat-Pumps> (16.07.2023.)
25. HEP-TOPLINARSTVO, 2023, Cijene  
URL: <https://www.hep.hr/toplinarstvo/krajnji-kupci/cijene-30/30> (25.08.2023.)
26. HVAC, 2022, Heat Pump Pros and Cons – What You Need to Know  
URL: <https://hvactrainingshop.com/heat-pump-pros-cons/> (16.07.2023.)
27. IEA, 2023a, Heat Pumps  
URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps> (16.07.2023.)
28. IEA, 2023b, Renewables  
URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (15.07.2023.)
29. INEWA, 2023, Geothermal - Geoz  
URL: <https://www.inewa.it/en/translate-to-it-energia/renewable-energy/geothermal-geoz> (15.07.2023.)
30. INTERSTUDIO, 2020, nZEB ili Zgrade gotovo nulte energije su novi standard u gradnji  
URL: <https://interstudio.hr/nzeb-ili-zgrade-gotovo-nulte-energije-su-novi-standard-u-gradnji/> (13.07.2023.)
31. KATASTAR, 2023, Baza zemljišnih podataka  
URL: <https://oss.uredjenazemlja.hr/map> (05.03.2023.)
32. KNAUF INSULATION, 2023, Energetski kalkulator- Koliko novca troši vaša kuća?  
URL: <https://www.knaufinsulation.hr/energetski-kalkulator-koliko-novca-trosi-vasa-kuca-0> (09.04.2023.)
33. LAZARD, 2021, Lazard's levelized cost of energy analysis - version 15

- URL: <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>  
(06.08.2023.)
34. MENERGA, 2020, What is shallow geothermal energy and why should you use it  
URL: <https://www.menerga-adria.com/blog/2020/09/23/what-is-shallow-geothermal-energy-why-use-it/> (11.08.2023.)
35. MIKE, 2023, Why use FEFLOW?  
URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow#> (30.03.2023.)
36. NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022, Aquifers  
URL: <https://education.nationalgeographic.org/resource/aquifers/> (05.08.2023.)
37. NATURE OF HOME, 2023, Types of Heat Pumps: (Air & Ground Source Explained)  
URL: <https://natureofhome.com/types-of-heat-pumps-explained/> (25.07.2023.)
38. SEALED, 2020, The ultimate guide to heat pumps  
URL: <https://sealed.com/resources/the-ultimate-guide-to-heat-pump/> (25.07.2023.)
39. THE CONVERSATION, 2023, Why so few UK homes are installing air-source heat pumps – and how to encourage takeup  
URL: <https://theconversation.com/why-so-few-uk-homes-are-installing-air-source-heat-pumps-and-how-to-encourage-takeup-201125> (25.07.2023.)
40. WALLSTREETMOJO, 2023, Economic Analysis  
URL: <https://www.wallstreetmojo.com/economic-analysis-2/#h-what-is-economic-analysis> (10.08.2023.)
41. WIKIPEDIA, 2023, Discounted cash flow  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Discounted\\_cash\\_flow](https://en.wikipedia.org/wiki/Discounted_cash_flow) (10.08.2023.)
42. YES ENERGY SOLUTIONS, 2023, What is an air source heat pump?  
URL: <https://www.yesenergysolutions.co.uk/advice/what-is-an-air-source-heat-pump>  
(25.07.2023.)



## **IZJAVA**

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*

  
\_\_\_\_\_  
**Ana Redep**



KLASA: 602-01/23-01/143  
URBROJ: 251-70-12-23-2  
U Zagrebu, 11.09.2023.

Ana Ređep, studentica

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/143, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 03.07.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA DEKARBONIZACIJE SUSTAVA GRIJANJA VIŠESTAMBENIH OBJEKATA KORIŠTENJEM MODELA FEFLOW I RES2GEO

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv.prof.dr.sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)