

# Analiza mogućnosti upotrebe geotermalnih dizalica topline na prostoru Panonskog bazena uz RES2GEO i FeFlow

---

Petrić, Filip

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:169:835028>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



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

**ANALIZA MOGUĆNOSTI UPOTREBE GEOTERMALNIH DIZALICA  
TOPLINE NA PROSTORU PANONSKOG BAZENA UZ RES2GEO I  
FEFLOW**

Diplomski rad

Filip Petrić  
R 304

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/25  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 20.02.23

Filip Petrić, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/25, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 20.02.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

**Analiza mogućnosti upotrebe geotermalnih dizalica topline na prostoru panonskog bazena uz RES2GEO i FeFlow**

Za voditelja 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

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

ANALIZA MOGUĆNOSTI UPOTREBE GEOTERMALNIH DIZALICA TOPLINE NA PROSTORU  
PANONSKOG BAZENA UZ RES2GEO I FEFLOW

Filip Petrić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Aktualne promjene na globalnom tržištu i lancima opskrbe pokazale su ranjivost nekih država prema energetske krizama. Oslanjanje na fosilna goriva, kako za proizvodnju struje tako i za toplinu, postalo je omraženo uslijed dizanja svijesti o klimatskim promjenama. Obnovljivi izvori energije postaju sve veći sudionici u ukupnoj proizvodnji električne i toplinske energije u svijetu. Kombiniranjem različitih vrsta obnovljivih izvora energije postiže se određeni stupanj energetske neovisnosti zgrade, isto kao i ušteda. Geotermalne dizalice topline iskorištavaju toplinsku inerciju podzemlja i dobro rade u zajednici s fotonaponskim panelima i vjetroelektranom. Mehanizmi prijelaza topline i analiza dugoročnog ponašanja ležišta biti će ispitani pomoću RES2GEO Python modela, koji uzima karakteristike okoline i energetske tokove u mikromreži. Programski paket FeFlow koristiti će se za proračun ponašanja podzemnog skladišta topline u radu s zamišljenom geotermalnom dizalicom topline, te će rezultati obje simulacije biti prodiskutirani i odabrati će se najbolja konfiguracija instaliranih kapaciteta proizvodnje i režima potrošnje energije.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, dizalice topline, bušotinski izmjenjivači topline, toplina, energija, nZEB, simulacija energetske tokova, optimizacija rada toplinske pumpe, grijanje, hlađenje

Diplomski rad sadrži: 79 stranica, 58 slika, 7 tablica, 19 referenci

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. Mario Klanfar, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Tomislav Kurevija, redovni profesor RGNF

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING GEOTHERMAL HEAT PUMPS IN PANNONIAN BASIN  
WITH RES2GEO AND FEFLOW

Filip Petrić

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum  
Institute for mining and geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Recent changes in the global market and supply chains have shown the vulnerability of some countries to energy crises. Reliance on fossil fuels, both for electricity and heat production, has become hated due to rising awareness of climate change. Renewable energy sources are becoming increasingly important participants in the total production of electric and heating energy in the world. By combining different types of renewable energy sources, a certain degree of energy independence of the building is achieved as well as savings. Geothermal heat pumps take advantage of the thermal inertia of the underground and work well in conjunction with photovoltaic panels and wind power. Heat transfer mechanisms and long-term reservoir behavior analysis will be applied and tested using the RES2GEO Python model, which takes environmental characteristics and energy flows into the microgrid. The FeFlow software package will be used to calculate the behavior of the underground heat storage in operation with the imaginary geothermal heat pump, and the results of both simulations will be discussed, and the best configuration of the installed production capacity and energy consumption regime will be selected.

Keywords: renewable energy sources, heat pumps, borehole heat exchangers, heat, energy, nZEB, simulation of energy flows, optimisation of heat pump operation, heating, cooling

Thesis contains: 79 pages, 58 pictures, 7 tables, 19 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Ph.D. Luka Perković, associate professor RGNF

Technical assistance: Amalia Lekić Brettschneider, mag. ing. petrol., research assistant

Reviewers  
Ph.D. Luka Perković, associate professor RGNF  
Ph.D. Mario Klanfar, associate professor RGNF  
Ph.D. Tomislav Kurevija, full professor RGNF

Defence date: February 24, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum, University of Zagreb

## SADRŽAJ

I. POPIS SLIKA .....	I
II. POPIS TABLICA .....	IV
III. POPIS KRATICA .....	V
IV. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA .....	VII
1. UVOD .....	1
2. ANALIZA ENERGETSKOG STANJA U REPUBLICI HRVATSKOJ .....	3
2.1. Toplinska energija .....	10
2.2. Energetska učinkovitost.....	12
2.3. Emisije stakleničkih plinova iz energetskeg sektora .....	14
3. PRIJENOS TOPLINE .....	16
4. DIZALICE TOPLINE .....	18
4.1. Razlozi slabe primjene geotermalnih dizalica topline .....	18
4.2. Dizalice topline koje rade s geotermalnim izvorom topline i ostali izvori.....	18
4.3. Izmjenjivači za geotermalne dizalice topline .....	19
4.4. Dijelovi dizalice topline.....	21
4.5. Opis procesa .....	22
4.6. Gubici koji se javljaju u sustavu.....	24
4.7. Geologija i struktura stijena panonskog bazena .....	24
5. UTJECAJ PODZEMNE VODE .....	27
5.1. Podzemna voda u panonskom bazenu .....	28
5.2. Temperatura za pojedinu cjelinu .....	30
6. TOPLINSKI POBOLJŠAN BETON .....	32
6.1 Grafit kao aditiv.....	33
6.2. Čelična žica kao aditiv betonu.....	34
6.3. Čelične mreže kao aditiv betonu .....	38

6.4. Silan i precipitirana silika kao aditiv betonu .....	39
7. METODE PRORAČUNA URAVNOTEŽENJA ENERGETSKIH TOKOVA U SUSTAVIMA S BUŠOTINSKIM IZMJENJIVAČIMA TOPLINE .....	41
7.1. Model RES2GEO .....	41
7.2. Programski paket FeFlow 8.0 .....	42
7.3. Proračun pomoću modela RES2GEO i programskog paketa FeFlow 8.0 .....	42
8. ANALIZA SLUČAJA: PRORAČUN GRIJANJA I HLAĐENJA INDUSTRIJSKE HALE 45	
8.1. Opis lokacije .....	45
8.2. Proračun pomoću modela RES2GEO .....	45
8.3. FeFlow - postavke analize slučaja .....	51
8.4. Rezultati FeFlow simulacije .....	55
8.5. Zajednički rezultati modela RES2GEO I FeFlow .....	61
9. ZAKLJUČAK .....	65
10. POPIS LITERATURE .....	66

## I. POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Ukupna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj .....	3
<b>Slika 2-2.</b> Realna stopa rasta BDP-a u razdoblju od 2010. do 2020. godine .....	4
<b>Slika 2-3.</b> Struktura potrošnje energije u Republici Hrvatskoj .....	4
<b>Slika 2-4.</b> Struktura potrošnje energije u Republici Hrvatskoj za sektor industrije.....	5
<b>Slika 2-5.</b> Potrošnja energije u određenim industrijskim granama .....	5
<b>Slika 2-6.</b> Potrošnja električne energije po svim sektorima, zajedno s gubitcima.....	6
<b>Slika 2-7.</b> Potrošnja električne energije po svim sektorima, zajedno s gubitcima.....	6
<b>Slika 2-8.</b> Prosječna prodajna cijena prirodnog plina s PDV-om .....	7
<b>Slika 2-9.</b> Kretanje prosječnih cijena prirodnog plina s PDV-om .....	7
<b>Slika 2-10.</b> Struktura potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj električnom energijom.....	8
<b>Slika 2-11.</b> Prosječne cijene električne energije u Republici Hrvatskoj bez PDV-a .....	9
<b>Slika 2-12.</b> Prosječne cijene električne energije za sektor poduzetništva, bez PDV-a .....	9
<b>Slika 2-13.</b> Nacionalni ciljevi udjela OIE za Republiku Hrvatsku .....	10
<b>Slika 2-14.</b> Kapaciteti za proizvodnju toplinske i električne energije iz OIE u Republici Hrvatskoj 2020. godine .....	11
<b>Slika 2-15.</b> Kapaciteti za proizvodnju toplinske energije iz OIE u pogonu 2020. godine.....	12
<b>Slika 2-16.</b> Proizvodnja toplinske energije iz OIE u Republici Hrvatskoj 2020. godine .....	12
<b>Slika 2-17.</b> Agregirani bottom-up indeks energetske efikasnosti (ODEX) u Republici Hrvatskoj od 2000. do 2020. godine .....	13
<b>Slika 2-18.</b> Ukupna površina korisne površine grijanog dijela zgrade .....	14
<b>Slika 2-19.</b> Trend emisije ugljičnog dioksida uslijed izgaranja goriva.....	15
<b>Slika 4-1.</b> Različite vrste izmjenjivača topline kod dizalica topline.....	19
<b>Slika 4-2.</b> Različite izvedbe bušotinskih izmjenjivača topline: a) jednostruka U-petlja, b) dvostruka U-petlja, c) koaksijalni sistem .....	20
<b>Slika 4-3.</b> Shematski prikaz kompresijske dizalice topline .....	21
<b>Slika 4-4.</b> Termodinamički ciklus dizalice topline u režimu grijanja (1-2-3-4) i hlađenja (4-3-2-1) .....	24
<b>Slika 4-5.</b> Geotermalni gradijent na širem području Panonskog bazena .....	25
<b>Slika 4-6.</b> Geotermalni gradijenti na području Republike Hrvatske.....	26
<b>Slika 5-1.</b> Distribucija temperature oko bušotinskog izmjenjivača bez protjecanja podzemne vode (a) i s protjecanjem vode (b) brzinom od 10-6 m/s .....	28



<b>Slika 5-2.</b> Prosječna hidraulička vodljivost aluvijalnih vodonosnika u Hrvatskom djelu Panonskog bazena .....	29
<b>Slika 6-1.</b> Toplinska provodljivost triju različitih mješavina betona.....	36
<b>Slika 6-2.</b> Specifični toplinski kapacitet triju ispitivanih receptura betona .....	37
<b>Slika 7-1.</b> Skica mikromreže s centraliziranom dizalicom topline i energetske tokovi .....	41
<b>Slika 8-1.</b> Prikaz simulirane bilance energije u periodu od 17. do 31. ožujka.....	46
<b>Slika 8-2.</b> Prikaz simulirane napunjenosti baterije u periodu od 17. do 31. ožujka .....	47
<b>Slika 8-3.</b> Bilanca energije za sva četiri slučaja u cijeloj godini .....	48
<b>Slika 8-4.</b> Prikaz simuliranih rezultata punjenja i pražnjenja baterije .....	49
<b>Slika 8-5.</b> Prikaz simulirane razmjena energije između baterije i distribucijske mreže .....	50
<b>Slika 8-6.</b> Godišnja bilanca energije za posljednju godinu simulacije .....	51
<b>Slika 8-7.</b> Postavke pri modeliranju parametara bušotine .....	52
<b>Slika 8-8.</b> Isječak iz grafičkog prikaza početne geometrije i poligona iz programskog alata FeFlow.....	52
<b>Slika 8-9.</b> Postavke geometrije bušotinskog izmjenjivača te njihovo spajanje .....	53
<b>Slika 8-10.</b> Grafički prikaz stanja i početni uvjeti pri modeliranju izmjenjivača .....	54
<b>Slika 8-11.</b> Grafički prikaz stanja i rubni uvjeti pri modeliranju izmjenjivača .....	55
<b>Slika 8-12.</b> Stanje ležišta u scenariju 1 na dan 1. srpanj (ljetni period).....	56
<b>Slika 8-13.</b> Stanje ležišta u scenariju 1 na dan 31. ožujak (zimski period) .....	57
<b>Slika 8-14.</b> Temperatura ležišta kroz godinu za scenarij 1 .....	58
<b>Slika 8-15.</b> Temperaturni profili pri strujanju fluida kroz prstenasti i centralni prostor te cementaciju bušotine po dubini ležišta za (a) 90. dan i (b) 365. dan simulacije scenarija 1....	58
<b>Slika 8-16.</b> Stanje ležišta u scenariju 2 na dan 1. srpanj (ljetni period).....	59
<b>Slika 8-17.</b> Stanje ležišta u scenariju 2 na dan 31. ožujak (zimski period) .....	59
<b>Slika 8-18.</b> Temperatura ležišta kroz godinu za scenarij 2 .....	60
<b>Slika 8-19.</b> Temperaturni profili pri strujanju fluida kroz prstenasti i centralni prostor te cementaciju bušotine po dubini ležišta za (a) 90. dan i (b) 365. dan simulacije scenarija 2....	61
<b>Slika 8-20.</b> Temperatura u izmjenjivaču u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)....	62
<b>Slika 8-21.</b> Temperatura u izmjenjivaču u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)...	62
<b>Slika 8-22.</b> Toplinski tokovi u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje) .....	62
<b>Slika 8-23.</b> Toplinski tokovi u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje) .....	63
<b>Slika 8-24.</b> Razmjena energije u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje).....	63
<b>Slika 8-25.</b> Razmjena energije u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje).....	63
<b>Slika 8-26.</b> Bilanca energije u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje).....	64

**Slika 8-27.** Bilanca energije u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)..... 64

**Slika 8-28.** Godišnja bilanca električne energije za (a) režim hlađenja i (b) režim grijanja.... 64

## II. POPIS TABLICA

<b>Tablica 5-1.</b> Prosječna temperatura podzemne vode u hidrografskoj cjelini .....	30
<b>Tablica 6-1.</b> Udio grafita kao aditiva i vode u betonu .....	33
<b>Tablica 6-2.</b> Rezultati ispitivanja na testnim uzorcima .....	34
<b>Tablica 6-3.</b> Promjena termalne provodljivosti u betonima s različitim aditivima .....	36
<b>Tablica 6-4.</b> Specifični toplinski kapacitet triju ispitivanih receptura betona prikazan tablično .....	37
<b>Tablica 6-5.</b> Rezultati ispitivanja orijentacije čelične mreže na provodljivost betona.....	39
<b>Tablica 8-1.</b> Tablični prikaz ispitanih scenarija .....	45

### III. POPIS KRATICA

CO<sub>2</sub> – Ugljikov dioksid

nZEB – eng. *Nearly Zero Energy Building*, građevina skoro nulte energetske potrošnje

MPGI – Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine

OIE – Obnovljivi izvori energije

BDP – Bruto domaći proizvod

PDV – Porez na dodanu vrijednost

EU – Europska Unija

RES – eng. *Renewable Energy Sources*, udio obnovljivih izvora energije

RES – E – Udio obnovljivih izvora energije u bruto neposrednoj potražnji el. Energije

RES H&C – Udio odnvljivih izvora energije u bruto neposrednoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje

RES – T – Udio obnovljivih izvora energije u neposrednoj potrošnji energije u prometu

ESTIF – eng. *European Solar Thermal Industry Federation*, Europska industrijska federacija za solarnu toplinsku energiju

ODEX – eng. *Energy efficiency index*, indeks energetske učinkovitosti

UNFCCC – Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime

PE – Polietalen

COP – eng. *Coefficient of performance*, toplinski množitelj

TRT – eng. *Thermal response test*, Test toplinskog odaziva

EGRT – eng. *Enhanced geothermal response test*, Napredni geotermalni test odaziva

NRC1, NRC2 i NEC3 – Uzorci betona u ispitivanju provođenja topline

RES2GEO – eng. *Renewable energy sources to geothermal*, obnovljivi izvori energije u geotermalnu energiju

P\_PV – kapacitet proizvodnje električne struje fotonaponskim panelima

P\_vjetar – kapacitet proizvodnje električne struje vjetroelektranom

$P_H$  – snaga grijača

$N_{BHE}$  – broj geotermalnih izmjenjivača topline

$P_{bat}$  – snaga baterije korištene za pohranu viška struje proizvedene pomoću OIE

$E_{bat}$  – kapacitet baterije korištene za pohranu viška struje proizvedene pomoću OIE

$P_{HP}$  – snaga geotermalne dizalice topline

$T_R$  – maksimalna temperatura vode u bilo kojoj točki unutar izmjenjivača topline

#### IV. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

$COP$	Koeficijent rada dizalice topline	-
$Q$	Toplina	J
$W$	Rad	J
$T$	Temperatura	°C
$\rho_w$	Gustoća vode	kg/m <sup>3</sup>
$c_w$	Specifični toplinski kapacitet vode	J/kgK
$S_H$	Volumenski izvor topline	W/m <sup>3</sup>
$\lambda$	Efektivna toplinska provodljivost vodom zasićene stijene	W/mK
$c_e$	Volumenski toplinski kapacitet vodom zasićenog poroznog medija	J/m <sup>3</sup> K
$v$	Darcy-jeva brzina	m/s

## 1. UVOD

Geotermalna energija jedna je od najpogodnijih energija u smislu utjecaja na okoliš, ali i na dugoročne troškove korisnika. Potencijal kojeg posjeduje mogao bi zamijeniti izgaranje fosilnih goriva na koja smo se dugi period ljudske povijesti oslanjali. Aktualne promjene na globalnom tržištu i u geopolitici ukazale su na nužnost energetske neovisnosti svake države. Tehnološki napredci, volatilitnost cijena energenata i njihova dostupnost, a svakako i neizbježne emisije koje se nastoje smanjiti, ponovno su bacile svjetlo na geotermalnu energiju, posebice za grijanje ili hlađenje objekata (Mastrocicco i dr., 2014).

Smanjenje emisija CO<sub>2</sub> i općenito smanjenje potrošnje energije u Europi jedni su od glavnih ciljeva i težnji Europske unije ka dekarbonizaciji i klimatskoj neutralnosti. U doba velike ekonomske nesigurnosti, divljanja cijena energenata i aktualnim klimatskim promjenama Europska unija se obvezala graditi energetske efikasnije zgrade po kriterijima nZEB (eng. *Nearly Zero Energy Building – građevina skoro nulte energetske potrošnje*). Uvjet je da svaki novi projekt nakon 31. prosinca 2017. bude projektiran i izveden po kriterijima nZEB zgrada za sve javne građevine, a nakon 31. prosinca 2019. za privatne zgrade stambenih, industrijskih i mješovitih namjena (MPGI – Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine). Kriteriji koji zgradu čine nZEB građevinom su ti da se minimalno 30 % energije koju troši zgrada dobiva iz obnovljivih izvora energije (OIE). Naime, sektor zgradarstva je u Europi odgovoran za 40 % sveukupno utrošene energije i 36 % emisija CO<sub>2</sub>, te je kao takav vrlo zanimljiv kandidat za implementaciju tehnologija koje raspolažu s obnovljivim izvorima energije. Starije zgrade moguće je (premda skupo), adaptirati da se bolje slažu s nZEB direktivama, te je puno isplativija opcija graditi nove zgrade koje su projektirane upravo da maksimiziraju mogućnost korištenja OIE. Takav pothvat sastojao bi se od vješte interdisciplinarnе suradnje svih struka koje sudjeluju u gradnji zgrada od podruma do krova.

Grijanje, klimatiziranje i ventilacija zgrade su energetske najzahtjevnije radnje koje čine 50 % njene ukupne energetske potrošnje. Taj podatak ukazuje na potrebu pravilnog projektiranja u svrhu smanjivanja potrošnje energije, za što možemo koristiti obnovljive izvore energije. Učinkovitih i gotovo ugljično-neutralnih opcija grijanja i hlađenja zgrada nema puno, no između ostalih ističe se iskorištavanje plitkih geotermalnih ležišta za svrhu grijanja prostorija. Plitka geotermalna energija za grijanje objekata posjeduje veliki potencijal, no zbog velikih kapitalnih investicija koje iziskuje taj je potencijal rijetko iskorišten. Aktualnim povišenjem cijena energenata i klimatskih prilika koje uvelike odskaču od prosjeka ta je tehnologija zrela

za njenu širu implementaciju. Cijene energenata posebice su se povećale za poduzetnički sektor, koji bi se mogao ozbiljno oplemeniti korištenjem OIE i energije plitkih geotermalnih ležišta. Nestašica plina, odnosno njegova visoka cijena, za tvrtke i industriju znače velike gubitke te se samim time osiguralo plodno tlo za implementaciju novih tehnologija grijanja i hlađenja.

Cilj ovog rada jest prikazati da se kroz integraciju OIE s plitkim geotermalnim ležištima u industrijama mogu smanjiti troškovi, osigurati djelomična energetska neovisnost te pritom smanjiti negativni utjecaj industrije na klimatske promjene. Tvrtke bi takvom praksom u određeno vrijeme ostvarile uštede uslijed svojih velikih potreba, a ekonomska analiza isplativosti takvog rješenja je još jedan od ciljeva ovog rada.



## 2. ANALIZA ENERGETSKOG STANJA U REPUBLICI HRVATSKOJ

U jeku pandemije virusa COVID-19, ukupna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj u 2020. godini iznosila je 387,4 PJ (1 PJ = 10<sup>15</sup> J), što je za 4,5 % manje u odnosu na 2019. godinu (Slika 2-1). Ukupna proizvedena primarna energija u Republici Hrvatskoj iznosi 196,06 PJ (Energetski Institut Hrvoje Požar [EIHP], 2020).

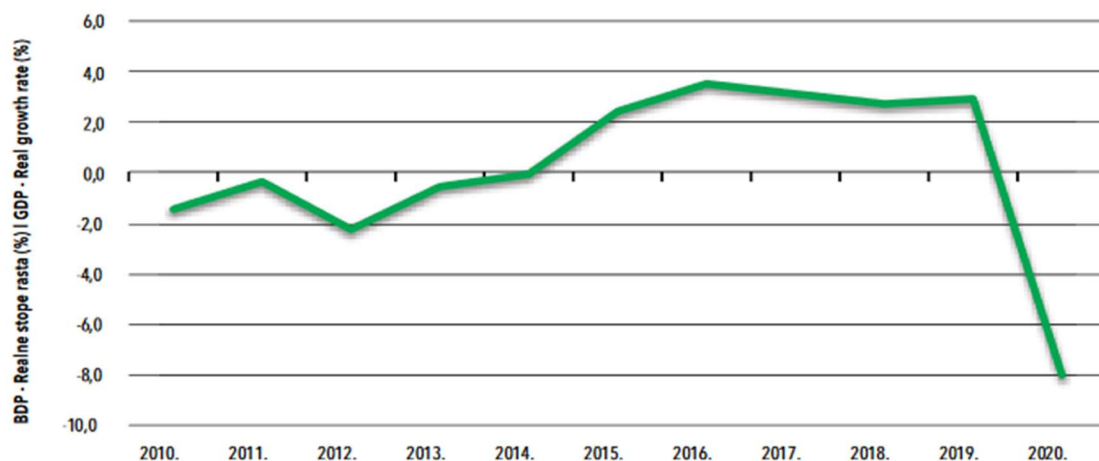
	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2020./19.	2015.-20.
	PJ						%	
Ugljen i koks Coal and Coke	29,86	32,14	21,65	20,36	20,77	18,25	-12,1	-9,4
Drvo i Biomasa Biomass	52,69	52,47	52,09	53,20	54,18	55,98	3,3	1,2
Tekuća goriva Liquid Fuels	130,99	130,85	139,90	134,59	133,27	112,85	-15,3	-2,9
Prirodni plin Natural Gas	87,16	91,08	104,67	96,43	101,22	106,10	4,8	4,0
Vodne snage Hydro Power	61,63	65,63	53,81	66,98	51,54	51,62	0,2	-3,5
Električna energija Electricity	24,44	19,91	25,03	19,40	22,08	16,70	-24,4	-7,3
Toplinska energija Heat	0,62	0,66	0,66	0,63	0,60	0,61	1,4	-0,3
Obnovljivi izvori Renewables	11,36	12,90	16,11	17,32	22,12	25,33	14,5	17,4
<b>UKUPNO TOTAL</b>	<b>398,75</b>	<b>405,63</b>	<b>413,92</b>	<b>408,91</b>	<b>405,78</b>	<b>387,43</b>	<b>-4,5</b>	<b>-0,6</b>

Slika 2-1. Ukupna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj

Premda proizvodnja energije pokazuje trend opadanja u iznosu od 2,3 %, instalirane snage obnovljivih izvora energije se povećavaju, što je s aspekta smanjenja klimatskih promjena pozitivno. Proizvodnja električne energije obnovljivim izvorima energije porasla je za 16 % (u što je uključeno iskorištenje energije vjetra, Sunca, bioplina, tekućih biogoriva i geotermalna energija korištena u svrhu dobivanja električne energije). Proizvodnja toplinske energije iz dizalica topline porasla je za 1,4 %, a dobivena toplinska energija iz ogrjevnog drva i biomase porasla je za 2,4 %. Samim time udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošenoj energiji je za 2020. godinu iznosio 31,05 %, što je povećanje za 2,6 % u odnosu na 2019. godinu (EIHP, 2020).

Prema proračunatim rezultatima emisije CO<sub>2</sub>, Republika Hrvatska je sa svim stacionarnim i pokretnim izvorima energije emitirala 14,4 milijuna tona tog stakleničkog plina, što je pad u iznosu od 6,9 % u odnosu na 2019. godinu koji je uzrokovan pandemijom koronavirusa (EIHP, 2020).

Gospodarska je aktivnost uslijed pandemije pala u svim pogledima, a godišnja stopa rasta bruto domaćeg proizvoda (BDP) u 2020. godini iznosila je -8,0 %. U predpandemijskoj 2019. godini stopa BDP-a narasla je za 2,9 % prema podacima iz Državnog zavoda za statistiku (slika 2-2) (EIHP, 2020).



**Slika 2-2.** Realna stopa rasta BDP-a u razdoblju od 2010. do 2020. godine

Energija koja se koristi dolazi u raznim oblicima. Tijekom razdoblja od 2015. do 2020. godine zabilježen je trend opadanja potrošnje fosilnih goriva (ugljen, koks, tekuća goriva), hidroenergije, električne i toplinske energije. Tablični prikaz ukupne potrošene energije, kategoriziran prema njenim oblicima prikazan je na slici 2-3 a ista je prikazana i za sektor industrije na slici 2-4 (EIHP, 2020).

	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2020./19.	2015.-20.
	PJ						%	
Ugljen i koks Coal and Coke	8,14	7,71	8,93	8,57	7,73	7,35	-4,9	-2,0
Kruta biomasa Solid biomass	51,02	48,52	47,29	47,08	47,58	48,87	2,7	-0,9
Ostali obnovljivi izvori Other renewables	0,81	0,86	0,88	0,90	0,95	0,86	-8,9	1,3
Tekuća goriva Liquid Fuels	109,18	111,96	118,94	116,63	118,41	101,56	-14,2	-1,4
Plinovita goriva Gaseous Fuels	33,96	35,06	36,98	37,31	37,51	37,72	0,6	2,1
Električna energija Electricity	55,15	55,04	57,46	58,03	57,96	54,61	-5,8	-0,2
Toplinska energija Heat	16,82	18,19	19,08	17,77	18,71	19,13	2,2	2,6
<b>UKUPNO TOTAL</b>	<b>275,08</b>	<b>277,34</b>	<b>289,55</b>	<b>286,29</b>	<b>288,86</b>	<b>270,09</b>	<b>-6,5</b>	<b>-0,4</b>

**Slika 2-3.** Struktura potrošnje energije u Republici Hrvatskoj

	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2020./19.	2015.-20.
	PJ						%	
Ugljen i koks Coal and Coke	8,05	7,61	8,81	8,48	7,64	7,27	-4,8	-2,0
Ogrjevno drvo i biomasa Fuel Wood and biomass	1,17	0,98	1,25	1,99	2,24	2,85	26,9	19,5
Tekuća goriva Liquid Fuels	1,91	1,78	1,74	1,76	1,64	1,63	-0,6	-3,0
Plinovita goriva Gaseous Fuels	7,30	6,85	7,88	8,29	8,48	8,00	-5,6	1,8
Električna energija Electricity	12,09	12,08	12,74	13,00	12,74	12,61	-1,1	0,8
Para i vrela voda Steam and Hot Water	8,49	9,74	10,74	9,83	10,88	10,93	0,5	5,2
<b>UKUPNO TOTAL</b>	<b>39,00</b>	<b>39,03</b>	<b>43,16</b>	<b>43,35</b>	<b>43,62</b>	<b>43,29</b>	<b>-0,8</b>	<b>2,1</b>

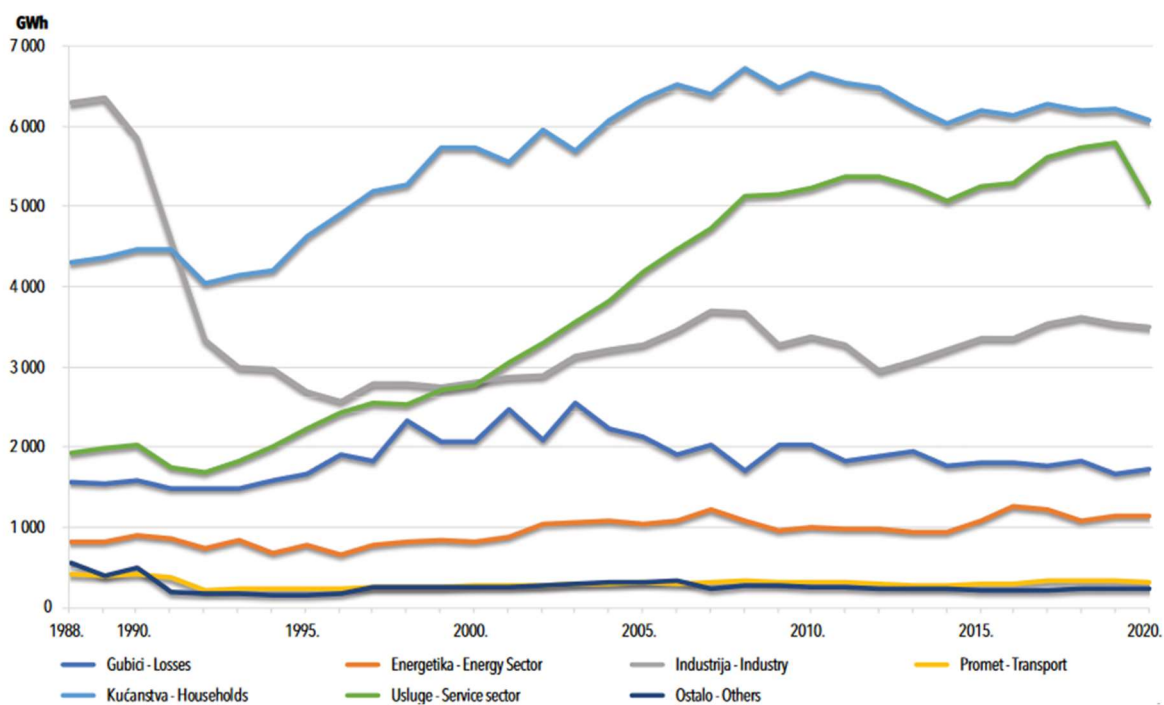
**Slika 2-4.** Struktura potrošnje energije u Republici Hrvatskoj za sektor industrije

Prema potrošnji energije u pojedinoj grani industrije može se pretpostaviti količina toplinske energije koja bi se mogla nadomjestiti korištenjem dizalica topline, no za točnost te pretpostavke potrebno je provesti anketu. Pri tome je potrebno imati na umu da kod nekih grana industrije postoji određena količina otpadne topline koja zagrijava prostor, te primjena dizalice topline u režimu grijanja za takve grane nema smisla (na primjer industrija čelika i željeza uslijed visokih peći, industrija građevnog materijala koja se djelomično može grijati otpadnim plinovima cementara i slično). Potrošnja energije u određenim industrijskim granama prikazana je na slici 2-5.

	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2020./19.	2015.-20.
	PJ						%	
Industrija željeza i čelika Iron and Steel Industry	2,13	1,51	1,59	2,23	1,99	1,74	-12,7	-4,0
Industrija obojenih metala Non-Ferrous Metals Industry	0,31	0,29	0,68	0,83	0,85	0,82	-3,9	21,5
Industrija nemetalnih minerala Non-Metallic Minerals Industry	1,92	2,34	2,40	2,35	2,32	2,11	-9,0	1,9
Kemijska industrija Chemical Industry	5,43	5,42	6,20	5,55	5,85	6,33	8,2	3,1
Industrija građevnog materijala Construction Materials Industry	12,13	11,23	13,44	13,61	13,23	13,57	2,6	2,3
Industrija papira Pulp and Paper Industry	1,76	2,38	2,12	2,16	2,25	2,58	14,6	7,9
Prehrambena industrija Food Industry	7,78	7,95	7,64	7,49	7,60	7,02	-7,7	-2,0
Ostala industrija Other Manufacturing Industries	7,54	7,91	9,08	9,13	9,54	9,13	-4,2	3,9
<b>UKUPNO INDUSTRIJA TOTAL INDUSTRY</b>	<b>39,00</b>	<b>39,03</b>	<b>43,16</b>	<b>43,35</b>	<b>43,62</b>	<b>43,29</b>	<b>-0,8</b>	<b>2,1</b>

**Slika 2-5.** Potrošnja energije u određenim industrijskim granama

Potrošnja električne energije po svim sektorima u Republici Hrvatskoj prikazana je na slici 2-6.



**Slika 2-6.** Potrošnja električne energije po svim sektorima, zajedno s gubitcima

Gledajući ispitivanja provedena u 2020. godini, za grijanje se najviše koristio prirodni plin u udjelu od 91,1 %, ako isključimo toplinsku energiju koja se proizvela u kogeneracijskim postrojenjima. Osim plina koji dominira koristi se i loživo ulje (3,7 %), ekstra lako loživo ulje (4,8 %) te geotermalne dizalice topline u udjelu od samo 0,4 %. Jedna od sastavnica koja uvelike ograničava potrošnju energenata je i njihova cijena, čije kretanje na globalnom tržištu možemo vidjeti na slici 2-7 koja se odnosi na maloprodajne cijene (EIHP, 2020).

Godina   Year	BMB EURO 98/10	BMB EURO 95	DG-EURO	DG-PLAVI	LUEL	Autoplin - LPG
2010.	8,45	8,41	7,82	4,64	5,08	4,59
2011.	10,00	9,63	9,05	5,48	6,17	4,97
2012.	10,90	10,51	9,87	6,26	7,06	5,46
2013.	10,68	10,34	9,69	6,23	6,75	5,16
2014.	10,99	10,47	9,85	6,03	6,52	5,09
2015.	9,82	9,49	8,73	4,87	4,79	3,96
2016.	9,19	8,88	8,05	4,05	4,00	3,81
2017.	9,85	9,40	8,71	4,69	4,60	4,40
2018.	10,48	9,95	9,60	5,49	5,40	4,71
2019.	10,39	9,85	9,67	5,07	5,29	4,53
2020.	9,54	8,97	8,61	3,96	3,7	4,12

**Slika 2-7.** Potrošnja električne energije po svim sektorima, zajedno s gubitcima

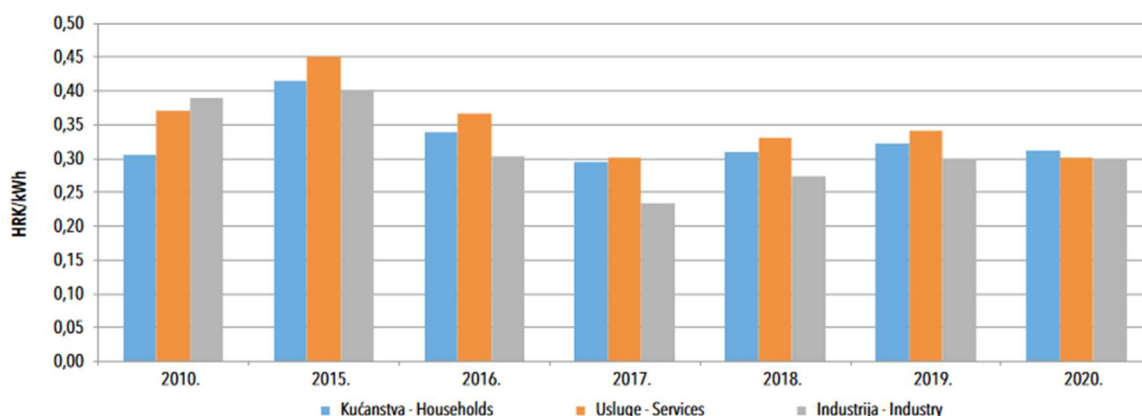
Što se tiče prirodnog plina i hrvatskih potreba, Republika Hrvatska proizvodi prirodni plin na 17 eksploatacijskih polja u Panonskoj regiji te 3 eksploatacijska polja na Jadranu, čime se u

2020. godini podmirilo 25,3 % domaćih potreba (ako uzimamo u obzir samo ona polja koja na Jadranu pripadaju Republici Hrvatskoj) (EIHP, 2020).

Cijena opskrbe plina se sastoji od tarifnog djela za isporučenu količinu plina i mjesečne naknade koja je fiksna. Krajnja cijena javne usluge opskrbe za najmanje potrošače u 2020. godini iznosila je od 0,2298 do 0,3162 kn/kWh, dok je za najveće potrošače ta krajnja cijena opskrbe iznosila od 0,2087 do 0,2482 kn/kWh. Iznos fiksne naknade je za sve javne opskrbljivače propisan da bude isti. Tarifna cijena distribucije plina iznosila je od 0,0241 do 0,1101 kn/kWh za najmanje potrošače (bez PDV-a), dok je za najveće potrošače ta cijena iznosila od 0,0033 do 0,0400 kn/kWh (bez PDV-a). Cijena ukupnog troška plina zajedno s PDV-om prikazana je na slici 2-8, a kretanje prosječnih cijena plina na slici 2-9 (EIHP, 2020).

Vrsta potrošača Customer category		2010.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.
Kućanstva Households	kn/m <sup>3</sup>	2,83	3,85	3,25	2,84	2,99	3,11	3,01
	kn/kWh	0,3056	0,4157	0,3385	0,2948	0,3109	0,3229	0,3121
Usluge Services	kn/m <sup>3</sup>	3,43	4,17	3,52	2,90	3,19	3,29	2,91
	kn/kWh	0,3704	0,4503	0,3667	0,3011	0,3317	0,3419	0,3010
Industrija Industry	kn/m <sup>3</sup>	3,60	3,70	2,92	2,26	2,65	2,89	2,89
	kn/kWh	0,3887	0,3995	0,3042	0,2345	0,2750	0,3004	0,2997

Slika 2-8. Prosječna prodajna cijena prirodnog plina s PDV-om

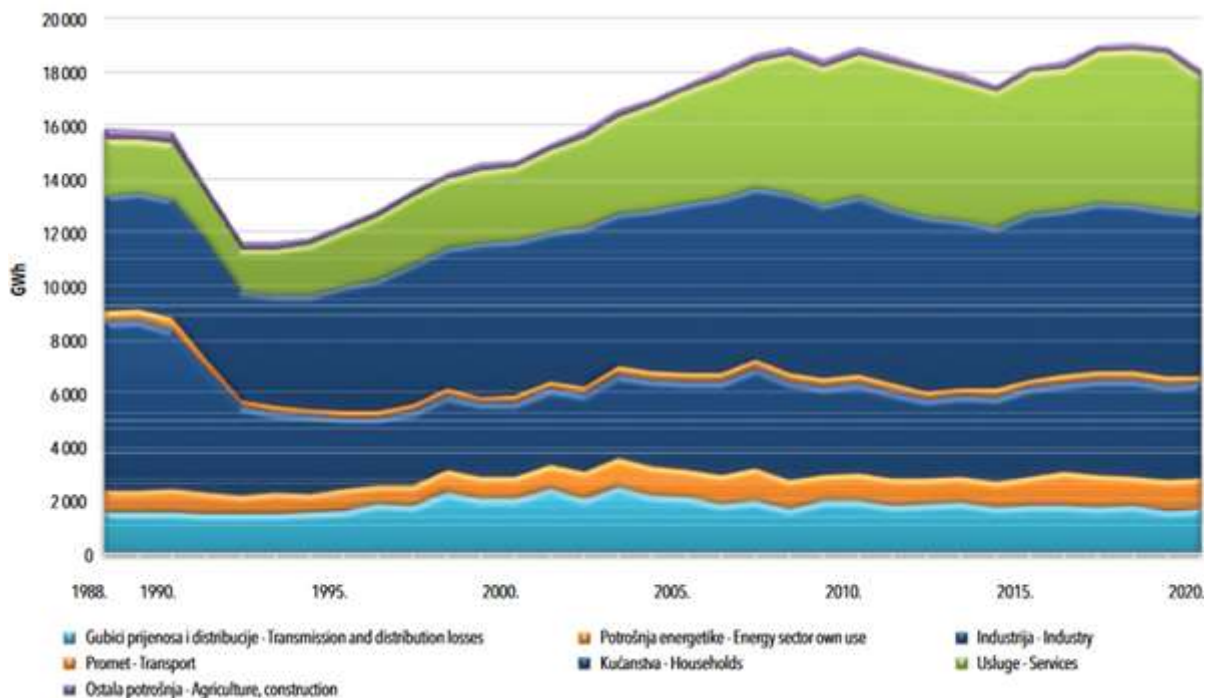


Slika 2-9. Kretanje prosječnih cijena prirodnog plina s PDV-om

Kada promatramo proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj, možemo zamijetiti da se većina električne energije proizvede u termoelektranama ili pak hidroelektranama, dok su tu još i vjetroelektrane, elektrane na obnovljive izvore energije i određeni broj termoelektrana

koje su u funkciji napajanja industrijskih postrojenja. Privatni proizvođači drže većinu postrojenja za proizvodnju energije iz OIE, a uz to Hrvatska elektroprivreda (HEP - ujedno i glavni distributer energije) ima i polovinu udjela proizvodnog kapaciteta nuklearne elektrane Krško na području Slovenije zbog čega se vodi kao uvezena električna energija (EIHP, 2020).

Instaliranjem solarnih panela ili vjetrenjača zajedno ili zasebno može se postići lokalizirana dodatna proizvodnja. Takvom praksom moguće je djelomično ili potpuno napajati dizalicu topline električnom energijom, te tako smanjiti pritisak na distribucijsku mrežu, pogotovo danju kada je potrošnja energije velika. Isto tako, napajanjem iz obnovljivih izvora energije postiže se manja emisija stakleničkih plinova vezanih uz proizvodnju u termoelektranama ili drugim načinima. Potrošnja električne energije po sektorima prikazana je na slici 2-10.

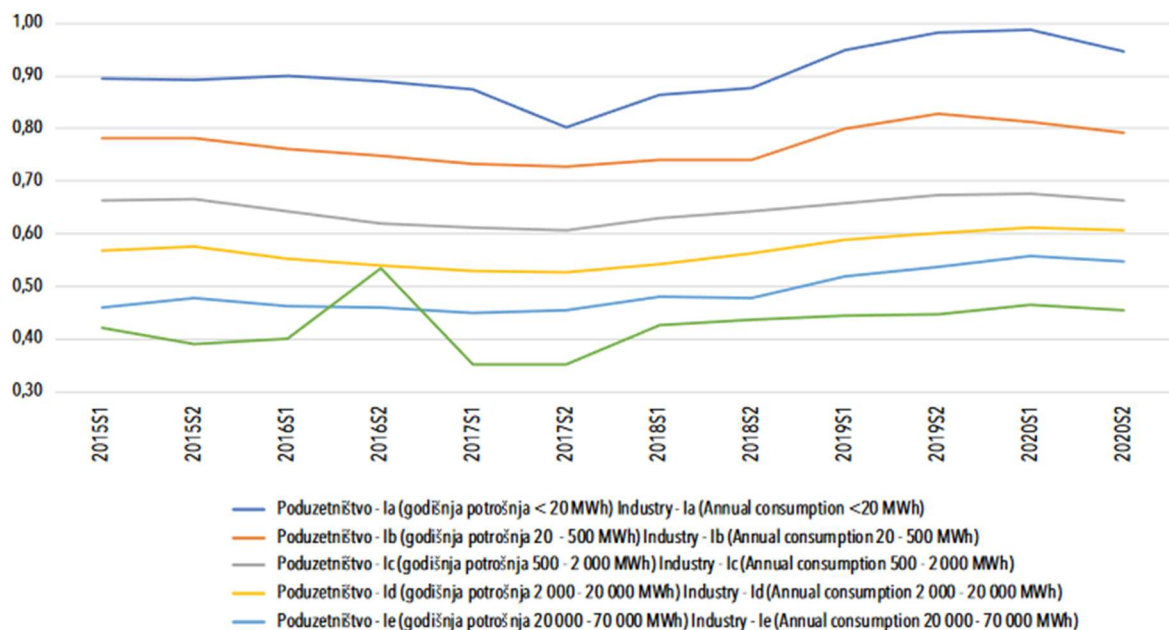


**Slika 2-10.** Struktura potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj električnom energijom

Lokalna proizvodnja električne energije putem obnovljivih izvora također znači i smanjenje troškova režija, premda su investicijska ulaganja velika i povrat investicije dugotrajan. Ipak, privatna proizvodnja električne energije odaje i određenu razinu slobode i sigurnosti pri korištenju električnih strojeva, pa tako i dizalica topline. Prosječne prodajne cijene električne energije u Republici Hrvatskoj prikazane su na slici 2-11, a cijene električne energije za kategoriju poduzetništva prikazane su na slici 2-12.

Kategorija / Godina Category / Year	1-6 2012.	7-12 2012.	1-6 2013.	7-12 2013.	1-6 2014.	7-12 2014.	1-6 2015.	7-12 2015.	1-6 2016.	7-12 2016.	1-6 2017.	7-12 2017.	1-6 2018.	7-12 2018.	1-6 2019.	7-12 2019.	1-6 2020.	7-12 2020.
Poduzetništvo - Ia (godišnja potrošnja < 20 MWh) Industry - Ia (Annual consumption < 20 MWh)	0,8779	0,9723	0,9528	0,9485	0,9518	0,9293	0,8941	0,8919	0,8993	0,8904	0,8756	0,8017	0,8636	0,8771	0,9489	0,9829	0,9868	0,9474
Poduzetništvo - Ib (godišnja potrošnja 20 - 500 MWh) Industry - Ib (Annual consumption 20 - 500 MWh)	0,7846	0,8349	0,8463	0,8213	0,8086	0,7947	0,7819	0,7806	0,7602	0,7474	0,7333	0,7272	0,7394	0,7402	0,8006	0,8290	0,8138	0,7927
Poduzetništvo - Ic (godišnja potrošnja 500 - 2 000 MWh) Industry - Ic (Annual consumption 500 - 2 000 MWh)	0,6727	0,7000	0,7133	0,6931	0,6886	0,6631	0,6626	0,6654	0,6434	0,6192	0,6118	0,607	0,6293	0,6432	0,6584	0,6729	0,6766	0,6623
Poduzetništvo - Id (godišnja potrošnja 2 000 - 20 000 MWh) Industry - Id (Annual consumption 2 000 - 20 000 MWh)	0,5655	0,5977	0,6093	0,5835	0,5855	0,5633	0,5681	0,5759	0,5532	0,5408	0,5302	0,5284	0,5435	0,5644	0,5885	0,6025	0,6114	0,6060
Poduzetništvo - Ie (godišnja potrošnja 20 000 - 70 000 MWh) Industry - Ie (Annual consumption 20 000 - 70 000 MWh)	0,4414	0,4457	0,4739	0,4635	0,4684	0,4750	0,4607	0,4797	0,4641	0,4609	0,4509	0,455	0,4799	0,4781	0,5190	0,5375	0,5577	0,5481
Poduzetništvo - If (godišnja potrošnja 70 000 - 150 000 MWh) Industry - If (Annual consumption 70 000 - 150 000 MWh)	0,4760	0,4470	0,4659	0,5054	0,4197	0,4000	0,4209	0,3913	0,4025	0,5351	0,3515	0,3518	0,4273	0,4363	0,4463	0,4480	0,4648	0,4563
Poduzetništvo - Ig (godišnja potrošnja > 150 000 MWh) Industry - Ig (Annual consumption > 150 000 MWh)																		

Slika 2-11. Prosječne cijene električne energije u Republici Hrvatskoj bez PDV-a



Slika 2-12. Prosječne cijene električne energije za sektor poduzetništva, bez PDV-a

## 2.1. Toplinska energija

Centralizirano grijanje (eng. *district heating*) još uvijek nije dobilo maha u Republici Hrvatskoj. Mogući razlozi tome su mnogobrojni, a jedan od njih je zasigurno i dosadašnja niska cijena fosilnih goriva za grijanje objekata. Zanimljiv je podatak da su Top-terme d.o.o. u Topuskom jedini centralizirani sustav u Republici Hrvatskoj koji se svodi na korištenje geotermalne topline iz dubokih ležišta. Premda je moguće izgraditi centralizirani sustav grijanja uz pomoć plitkih geotermalnih ležišta, takvi se pothvati još uvijek ne izvode u Republici Hrvatskoj te ih nema u funkciji. Top-terme d.o.o. ukupno isporučuju 3 746 MWh toplinske energije, a tu energiju koristi 201 potrošač s ukupnom grijanom površinom od 13 844 kvadratna metra (EIHP, 2020).

Energetska politika Republike Hrvatske, pri ulasku u EU, uvela je povećanje udjela OIE kao jedan od svojih osnovnih ciljeva. Postoji nekoliko osnovnih indikatora za praćenje udjela OIE, od kojih su neki (EIHP, 2020):

- udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije (RES)
- udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji električne energije (RES-E)
- udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje (RES – H&C)
- dio OIE u neposrednoj potrošnji energije u prometu (RES-T)

Ciljevi su definirani za neki vremenski period, pa je tako predložen službeni dokument pod nazivom Indikativni nacionalni ciljevi udjela OIE za Republiku Hrvatsku, koji je prikazan na slici 2-13 (EIHP, 2020).

Udio OIE RES Share	Ciljevi 2030 2030 Goals
U bruto neposrednoj potrošnji energije Gross final energy consumption	39,4 %
U bruto neposrednoj potrošnji električne energije Gross final electricity consumption	63,8 %
U bruto neposrednoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje Gross final energy consumption in heating and cooling	47,8 %
U neposrednoj potrošnji energije u prometu Final energy consumption in transport	14,0 %

**Slika 2-13.** Nacionalni ciljevi udjela OIE za Republiku Hrvatsku



Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje u posljednjih je 10 godina rastao u prosjeku za 0,4 postotna poena godišnje. Ako Republika Hrvatska želi postići cilj od 47,8 % do 2030. godine (slika 2-13), morati će implementirati dodatne mjere ili na neki drugi način inicirati povećanje ulaganja u OIE za grijanje i hlađenje. Na sljedećoj tablici vidljivi su ukupni instalirani kapaciteti obnovljivih izvora energije (slika 2-14) (EIHP, 2020).

Vrsta izvora Type of renewable energy source	Instalirana toplinska snaga Installed heat capacity (MW)	Instalirana električna snaga Installed power capacity (MW)
Sunce Solar	201,6	108,5*
Vjetar Wind	-	801,3
Blomasa Biomass	243,1**	80,2
Biplin Biogas	54,9	55,1
Male hidroelektrane Small hydro	-	33
Geotermalna Geothermal	46,5***	10
<b>Ukupno Total</b>	<b>546,1</b>	<b>1 088,1</b>

\* sustavi priključeni na elektroenergetsku mrežu | systems connected to the grid

\*\* odnosi se samo za kogeneraciju na biomasu | refers only to biomass cogeneration

\*\*\* geotermalna toplinska energija za grijanje prostora | geothermal heat for space heating

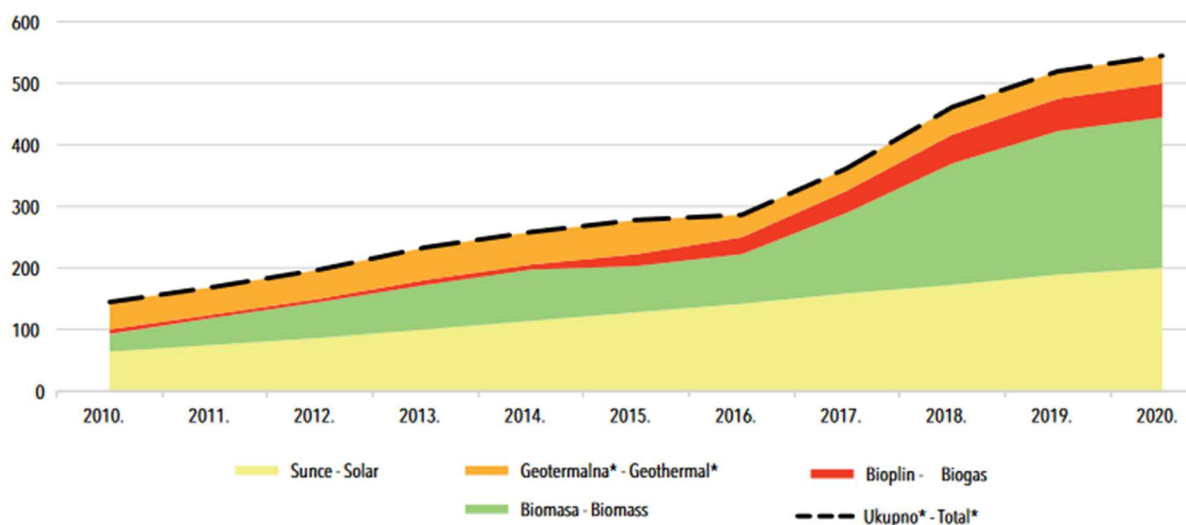
**Slika 2-14.** Kapaciteti za proizvodnju toplinske i električne energije iz OIE u Republici Hrvatskoj 2020. godine

Kod tumačenja ovih podataka bitno je uzeti u obzir da ne postoje pouzdani statistički podaci o instaliranim snagama postrojenja za proizvodnju energije iz Sunca i biomase, dok za geotermalnu toplinsku energiju postoje dvije metode praćenja. Instalirana toplinska snaga za solarne kolektore procjenjuje se na temelju podataka o njihovoj površini (dobivenih putem ankete EIHP), a toplinska se snaga sunčanih sustava proračunava prema smjernicama udruge pod nazivom *European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF)* (EIHP, 2020).

Podaci za instaliranu toplinsku snagu kotlovnica na biomasu odnose se na industrijske kotlovnice, te kao takvi ne uzimaju u obzir male peći ili štednjake na drva koje koriste pojedina kućanstva (EIHP, 2020).

Geotermalna energija se u ovom smislu iskorištava samo za grijanje prostora ili u kogeneraciji s toplom vodom za kupanje (na primjer toplice). Ako se promatra samo toplinska energija za grijanje prostora, ukupni instalirani kapacitet geotermalnih izvora iznosi 45,7 MWt, a ako se promatra grijanje prostora i pripremu tople vode, onda ta snaga iznosi 75,4 MWt (EIHP, 2020).

Proizvodnja toplinske energije iz obnovljivih izvora u Republici Hrvatskoj u godini 2020. prikazana je na slici 2-15 i 2-16, a izražena je u TJ (EIHP, 2020).



\*geotermalna toplinska energija za grijanje prostora

Slika 2-15. Kapaciteti za proizvodnju toplinske energije iz OIE u pogonu 2020. godine

Vrsta izvora Type of renewable energy source	Proizvodnja toplinske energije Heat production (TJ)
Sunce Solar	684,3
Blomasa Blomass	48 974,0
Geotermalna* Geothermal*	179,5 232,4

\*Za proizvodnju toplinske energije iz geotermalne energije u 2020. godini iskorišteno je 179,5 TJ samo za grijanje prostora odnosno ukupno 232,4 TJ, ako se promatra zajedno grijanje prostora i pripremu tople vode / During 2020 for heat production from geothermal energy 179,5 TJ was used exclusively for space heating purposes, respectively 232,4TJ if space heating and warm water preparation is considered

Slika 2-16. Proizvodnja toplinske energije iz OIE u Republici Hrvatskoj 2020. godine

## 2.2. Energetska učinkovitost

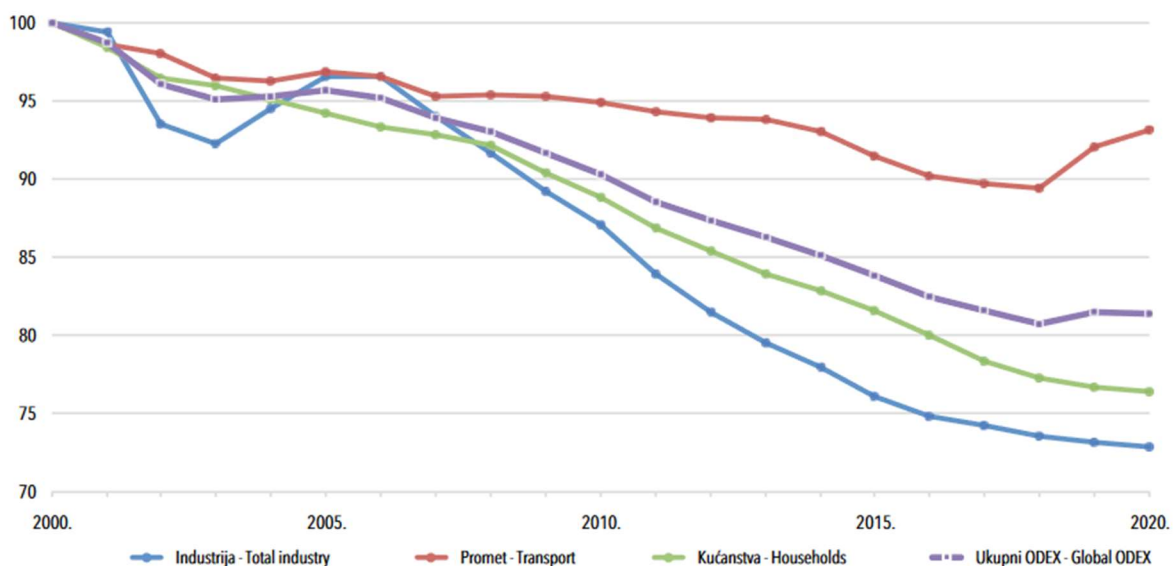
Analiziranje energetske učinkovitosti počinje od identificiranja svih sektora potrošnje energije na lokalnoj ili nacionalnoj razini. Razmatrani sektori uključuju praktički sve vrste građevina te relevantne grane kojima su one dio, no za potrebe ovog rada osvrnut ćemo se samo na industriju.

Za praćenje energetske učinkovitosti Europska unija je razvila poseban, lako razumljiv i usporediv indeks napretka u energetske učinkovitosti pod nazivom „Agregirani bottom-up indeks energetske efikasnosti“ ili skraćeno *ODEX (Energy efficiency index)*. On nam u suštini

prikazuje prosjek specifičnog indeksa potrošnje energije u pojedinom sektoru, a određuje se na temelju podataka koji odražavaju promjenu potrošnje energije, ili pak prikazuju namjenu u koju se spomenuta energija uložila u određenom vremenskom razdoblju. Sastoji se od dva dijela – agregiranog i tehničkog indeksa. Tehnički indeks označava energetska učinkovitost, dok agregirani indeks uključuje čimbenike koji utječu na potrošnju, no nisu direktno vezani za učinkovitost (nadogradnja prostora i povećanje površine, klimatski utjecaji i slično) (EIHP, 2020).

Smanjenje ili pad *ODEX*-a za određenu vrijednost naspram prethodne ocjene izvedene u nekom prošlom vremenu znači porast energetske učinkovitosti. Prema tome, vrijednost *ODEX*-a od 85 znači 15 povećanje energetske učinkovitosti (EIHP, 2020).

U razdoblju od 2000. do 2020. godine vidljiv je blagi pad indeksa u sektorima industrije i kućanstva (slika 2-17). Rezultati su izraženi i tablično i prikazani na slici 2-18.



**Slika 2-17.** Agregirani bottom-up indeks energetske efikasnosti (ODEX) u Republici Hrvatskoj od 2000. do 2020. godine

Postoji nekoliko vrsta zgrada prema namjeni, a prema tome se također i temeljno razlikuju u energetske potrebama. Energetske potrebe zgrada mogu se povezati s ukupnom površinom koja se grije. Prikaz takve digresije energetske potreba prikazan je na slici 2-18.

Vrsta zgrade Building type	Ukupna ploština korisne površine grijanog dijela zgrada Total useful heated area (m <sup>2</sup> )	Udio u ukupnom fondu zgrada Share in total building stock (%)
Stambene zgrade Residential buildings	128 930 959	76,33
Obiteljske kuće Single family homes	83 481 377	50,07
Višestambene zgrade Multiapartment buildings	45 449 582	27,26
Nestambene zgrade Multiapartment buildings	37 811 064	22,67
<b>Ukupno Total</b>	<b>166 742 024</b>	<b>100</b>

**Slika 2-18.** Ukupna površina korisne površine grijanog dijela zgrade

### 2.3. Emisije stakleničkih plinova iz energetskeg sektora

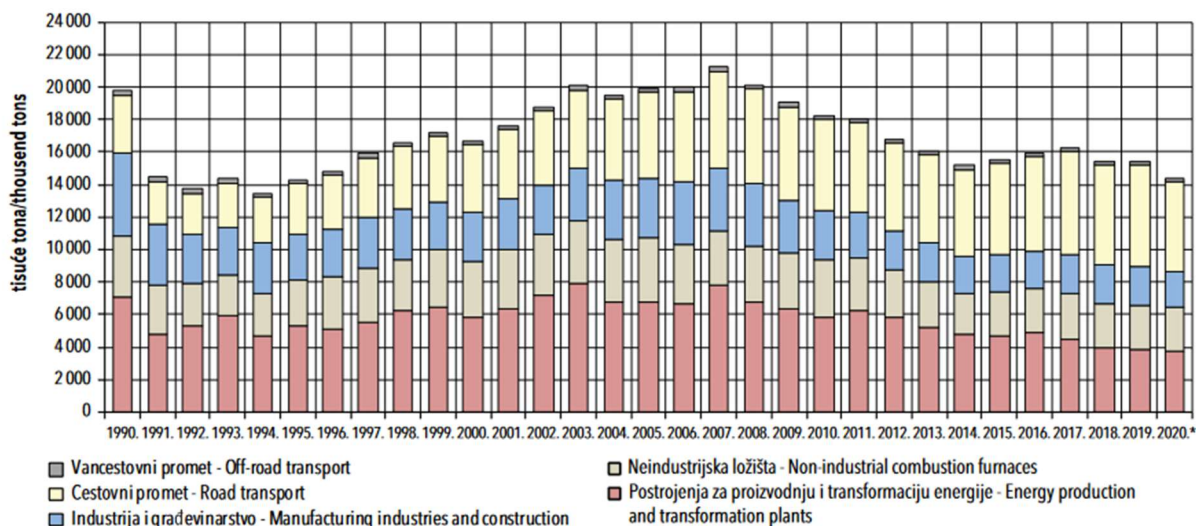
Republika Hrvatska je u travnju 2007. godine potpisala Kyoto Protokol, čime je preuzela obvezu smanjenja stakleničkih plinova za 5 % u razdoblju od 2008. do 2012. godine. Taj cilj uspješno je postignut, jednim dijelom uslijed truda građana a jednim djelom uslijed ekonomske krize koja je zahvatila svijet (EIHP, 2020).

Za sljedeći vremenski period od 2013. do 2020. godine Republika Hrvatska je na 18. Konferenciji država stranaka UNFCCC-a (Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime) u Dohi, Katar, pristala biti dijelom amandmana na Prilog B protokola iz Kyota, čime se obvezala na daljnje smanjenje emisije stakleničkih plinova od minimalno 20 % u odnosu na referentnu 1990. godinu (EIHP, 2020).

Krajem 2015. godine, u Parizu je postignut globalni sporazum o klimi, prigodno nazvan Pariški sporazum. Ovaj ambiciozni korak uključuje sve zemlje i temelji se na 3 cilja koja je nužno ispuniti (EIHP, 2020):

1. Globalni prosječni porast temperature mora biti manji od 2 °C (u odnosu na preindustrijsko doba), s nastojanjem da se isti ograniči na 1,5 °C
2. Povećanje otpornosti zemalja na klimatske promjene, povećanje sposobnosti prilagodbe na negativne aspekte klimatskih promjena te poticanje razvoja s niskim emisijama i određenom otpornošću na istoimene promjene
3. Omogućavanje i jačanje stabilnih financijskih tokova radi ostvarenja razvoja velike klimatske otpornosti i niskih emisija

Daljnje nastojanje Europske komisije podrazumijeva obvezu smanjenja emisije stakleničkih plinova za 55 % do 2030. godine u odnosu na referentnu godinu. Daleko najambicioznija dugoročna želja Europske komisije jest da Europski kontinent postane klimatski neutralan do 2050. godine. Iz trenda emisija (slika 2-19) očito je da se taj veoma ambiciozni cilj ne može ostvariti, te bi trebalo pojačati aktivnosti u cilju smanjenja stakleničkih plinova (EIHP, 2020).



Slika 2-19. Trend emisije ugljičnog dioksida uslijed izgaranja goriva

### 3. PRIJENOS TOPLINE

Iskustveno znamo da s pogleda prijelaza topline postoje dvije vrste tvari – izolatori i provodnici topline. Izolator koji potpuno sprečava prijelaz naziva se adijabatskim (iz grčkog značenja *a-ne*, i *diabaino*-prolaziti, odnosno propustiti) a onaj koji bi savršeno provodio toplinu mogli bi nazvati dijatermičkim. Naravno, takvi materijali idealizirani su te u stvarnosti ne postoje (Paić, 1994).

Toplina može spontano prelaziti isključivo s toplijeg tijela na hladnije, ali za to ta dva tijela moraju biti u termičkom dodiru, što omogućava prijelaz topline na hladnije tijelo. Pri takvoj spoznaji možemo utvrditi da je toplina zapravo energija u prijelazu, a to nam ujedno služi i kao mogućnost mjerenja topline. Osnovna jedinica za bilo koju vrstu energije, pa tako i za toplinu, jest džul (Joule), uz SI oznaku J (Paić, 1994).

U termodinamici se toplina ne shvaća kao da je sadržana u tijelu ili da je ona neko svojstvo sustava, već da se ona pojavljuje samo prilikom prelaska. Toplina je, dakle, procesna veličina, a prema dogovoru se toplina koja je predana sustavu označava pozitivnim predznakom, dok je toplina koju je sustav predao okolini označava negativnim (Paić, 1994).

Glede načina prijenosa topline između različitih tijela, postoji nekoliko vrsta prijenosa (Paić, 1994):

1. Konvekcija – takav prijenos možemo osjetiti ukoliko stavimo ruku iznad toplog predmeta – zrak se pri dodiru s toplim tijelom grije, te se uslijed toga ekspandira što pak rezultira smanjenjem gustoće naspram okolnog, hladnijeg zraka i taj se topli zrak uzdiže (na ovom principu rade baloni na vrući zrak). Taj način zagrijavanja, gdje se javlja gibanje toplog fluida prema hladnijem, nazivamo širenje topline konvekcijom ili prenošenje
2. Kondukcija - način prijelaza koji se može opisati toplinskom strujom ili strujanjem topline kroz neki materijal, a ovisi o termičkoj konduktivnosti spomenutog materijala. Termička konduktivnost tvari je brzina kojom toplina prelazi kroz tvar i to u smjeru gradijenta temperature kroz poprečni presjek oblika tijela. SI jedinica ovog svojstva je W/mK, a tvari s velikom termičkom konduktivnošću nazivamo dobrim vodičima topline (metali, voda) a one s malom konduktivnošću nazivamo toplinski izolatori (suho drvo, stiropor, kamena vuna)

3. Radijacija – ili širenje topline zračenjem, može se dokazati ukoliko odmaknemo ruku paralelno od izvora topline. Sada se toplina koju osjećamo ne širi kondukcijom (jer topli zrak ide vertikalno uvis), nego topli predmet zagrijava našu ruku emitiranjem elektromagnetskih valova koju naša ruka upija (na ovaj način Sunce grije sve osunčane predmete danju kada nema oblaka)

Kod geotermalnih se izmjenjivača toplina sadržana u stijeni ili tlu prenosi konvekcijom ukoliko je stijena suha, a konvekcijom i kondukcijom ukoliko je prisutna podzemna voda (Tinti i dr., 2015).

## 4. DIZALICE TOPLINE

Dizalice topline, često zvane i toplinske pumpe (eng. *Heat pump*), su transformatori topline čija je minimalna temperatura radnog medija manja ili jednaka temperaturi okoline, a maksimalna temperatura radnog fluida viša od okoline (Budin, 2012).

Drugi zakon termodinamike govori da toplina prelazi s toplijeg tijela na hladnije, te da je iz takve razlike temperatura moguće dobiti koristan rad. Spontani prijelaz topline s hladnijeg tijela na toplije nije moguće ostvariti bez kompenzacije, odnosno uloženog rada u taj proces. Ovaj princip predstavlja temelj načina rada dizalica topline (Budin, 2012).

### 4.1. Razlozi slabe primjene geotermalnih dizalica topline

Nove tehnologije i poboljšanja koje donose često nisu dovoljno dobro shvaćeni ili brzo riješeni od strane legislative, a spori zupčanici birokracije otežavaju pokretanje novih projekata. Kao osnovne sile koje koče širu primjenu geotermalnih dizalica topline navode se sljedeći razlozi (Tinti i dr., 2015):

- Financijska potpora novih projekata
- Kvalitetno formirani zakoni, podzakoni i pravilnici te regulativa općenito
- Certificiranje kvalitete projekata
- Osposobljavanje aktera u građevinskom sektoru na rad s novim tehnologijama
- Svijest javnosti
- Tehnička problematika u pogledu cijena bušenja, osiguranja projekta, manjak poznavanja toplinskog potencijala podzemlja, svojstva materijala cijevi i betonske ispune (primarno se gleda elastičnost i trajnost, a ne toplinska provodljivost). Kalibriranje dizalica topline provodi se dominantno za potrebe grijanja što ograničava primjenjivost u toplijim dijelovima svijeta te ograničenost primjene u urbanim sredinama

### 4.2. Dizalice topline koje rade s geotermalnim izvorom topline i ostali izvori

Dizalice topline mogu prenijeti toplinu s medija koji imaju relativno nisku temperaturu, poput okolnog zraka, voda tekućica ili stajačica, te stijene ili tla (slika 4-1). Prijenos energije ostvaruje se radnim medijem koji može biti amonijak, freoni, smjesa vode i amonijaka ili zrak.



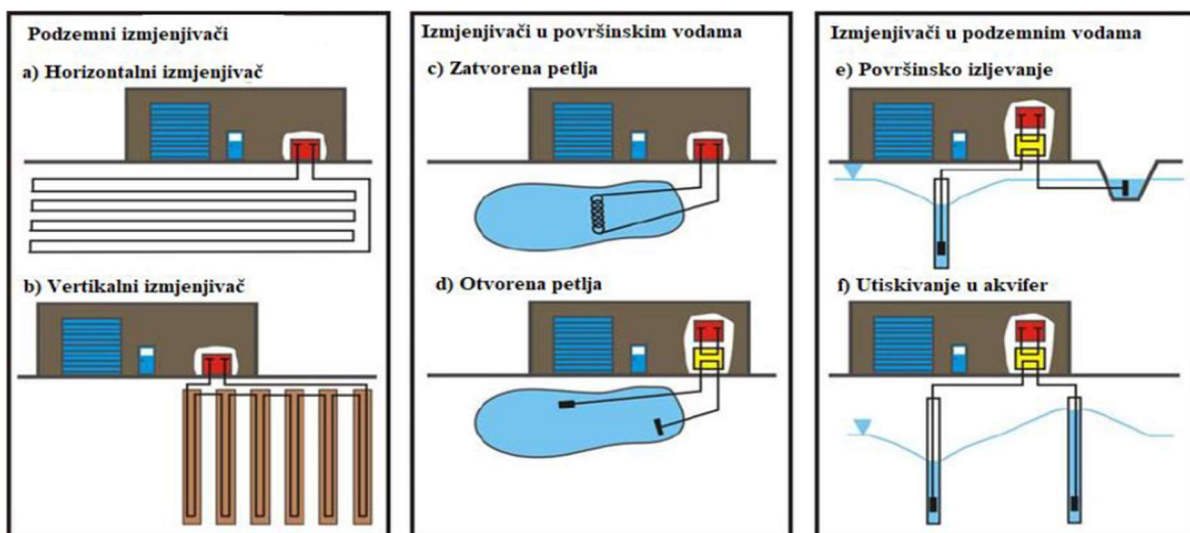
Dizalice topline vrlo su važan toplinski stroj koji može raditi u kombiniranom sustavu, što znači da može grijati, a i hladiti neki prostor, te isto tako može oduzimati ili predavati toplinu nekom od već spomenutih medija (Budin, 2012).

### 4.3. Izmjenjivači za geotermalne dizalice topline

Izmjenjivači topline koji rade s energijom plitkog podzemlja u pravilu rade na dva principa (Tinti i dr., 2015):

- 1) Crpljenjem podzemne vode kroz bušotine te utiskivanje vode nakon izmjenjivanja topline
- 2) Cirkuliranjem radnog medija unutar zatvorene petlje čime se on pasivno zagrijava ili hladi.

Ovakav sistem je izoliran od prodora podzemne vode i zbog toga je smatran boljim (slika 4-1)



**Slika 4-1.** Različite vrste izmjenjivača topline kod dizalica topline

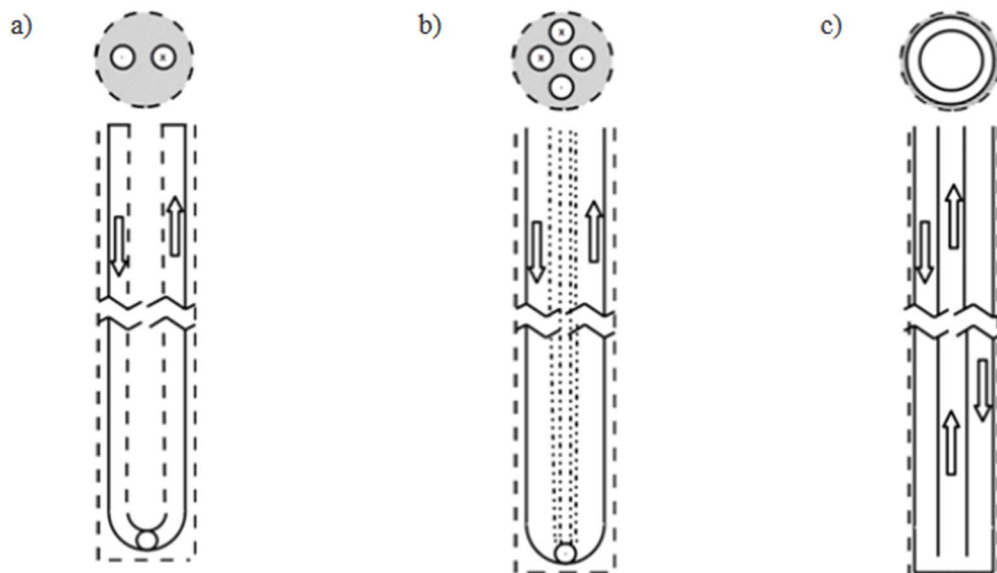
U ovom radu promatraju se vertikalni izmjenjivači topline, čija popularnost u novija vremena raste naspram ostalih. Osobita prednost ovakvog tipa izmjenjivača jest njegov mali tlocrt zbog čega se može izraditi na mjestima gdje se ostali tipovi jednostavno ne mogu. Još jedna važna prednost vertikalnog sustava je doseg do stabilnijeg, dubljeg djela stijene koja je ujedno i toplija. Dubina do koje seže izmjenjivač topline bitno je uvjetovana potrebama za toplinom, odnosno potrebama za odlaganje topline u režimu hlađenja. Za pravilno dimenzioniranje potrebno je poznavati parametre stijene poput vrste i tipa stijene, termalne otpornosti ili provodljivosti, volumetrijskog toplinskog kapaciteta i hidrogeoloških parametara u slučaju postojanja podzemne vode. Vertikalni sustavi su trajni, ostvaruju visoku učinkovitost,

niske energetske potrebe nakon instalacije, imaju visok učinak iskorištenja geotermalne energije i jednostavni su za ugradnju bez obzira na tlakove podzemnih voda. Neke od negativnosti bušotinskog izmjenjivača topline su velika početna ulaganja i troškovi eventualnog popravka, ograničenja s pogleda mogućnosti bušenja, korozija stijenke i kompleksnost transporta (Silwa i dr., 2017 i Tinti i dr., 2015).

Ključni faktori za razvoj i primjenu geotermalnih izmjenjivača topline su povećanje postotka iskorištene toplinske energije i smanjenje troškova instalacije. No, neki oblici izmjenjivača preferiraju se ne zbog svoje niske cijene nego zbog jednostavnosti (Tinti i dr., 2015).

Bušotinski izmjenjivači topline u suštini se sastoje od nekoliko osnovnih dijelova:

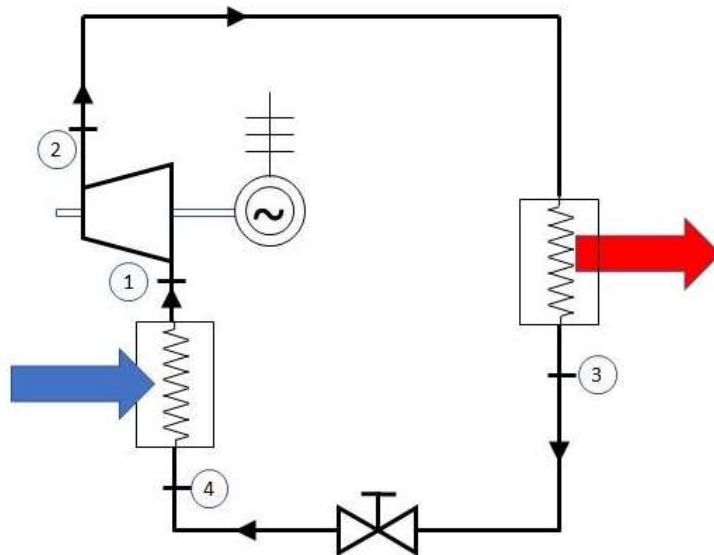
- Bušotina – prosječnih duljina od 50 do 200 metara, ove bušotine nalaze se zapunjene s cementnom ili bentonitno-cementnom mješavinom, više informacija na tu temu nalazi se u poglavlju Toplinski poboljšani beton.
- Cijevi za cirkulaciju radnog fluida – najčešće izrađene od polietilena (PE), mogu se postaviti na tri načina; jednostruka ili dvostruka U petlja, te koaksijalna izvedba u kojoj je jedna cijev postavljena unutar cijevi većeg promjera (slika 4-2)
- Cirkulirajući radni fluid – u principu najčešće se koristi voda uz dodatak antifrizna



**Slika 4-2.** Različite izvedbe bušotinskih izmjenjivača topline: a) jednostruka U-petlja, b) dvostruka U-petlja, c) koaksijalni sistem

#### 4.4. Dijelovi dizalice topline

Osnovni su dijelovi dizalice topline kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač (slika 4-3).



**Slika 4-3.** Shematski prikaz kompresijske dizalice topline

**KOMPRESOR** – služe za cirkulaciju radne tvari. Kod dizalica topline se koriste dvije vrste kompresora s obzirom na snagu dizalice topline. Uglavnom se koriste volumenski kompresori, dok se centrifugalni turbo kompresori koriste u uređajima veće snage (Budin, 2012).

**KONDENZATOR** – uređaj za jednostupanjsku ili višestupanjsku kondenzaciju, hlađenje i pothlađivanje radne tvari pri čemu se radna tvar zagrijava (Budin, 2012)

**ISPARIVAČI** – ovaj element oduzima toplinu davaocu preko radnog medija koji se nalazi na nižoj temperaturi od temperature davaoca. Toplinska moć isparivača ovisi o rashladnoj snazi kompresora.

Svaka dizalica topline u sebi sadrži dva izmjenjivača topline:

1. kondenzator, čija je funkcija hlađenje radnog medija koji pritom predaje svoju toplinu i zagrijava neki prostor, bazen ili slično
2. isparivač koji ekspaniranom radnom mediju služi da se opet zagrije, te na taj način oduzima toplinu hlađenog objekta, tijela ili bazena s fluidom (Budin, 2012).

DAVAOC ILI IZVOR TOPLINE – mogu biti prirodni ili umjetni. Prirodni davaoci topline mogu biti okolišni zrak, razne vode bez obzira da li su podzemne ili nadzemne, da li potječu od rijeka, mora ili stajačica, a u ovom je radu posebno zanimljiv davaoc topline tlo. Umjetni izvori topline su razni nus-produkti koji nastaju u industriji, pa su između ostalih to: otpadni zrak iz raznih procesa, otpadne vode ili plinovi nastali izgaranjem. Jedini uvjeti da bi se neki medij koristio kao izvor za dizalicu topline jesu ti da medij mora imati zadovoljavajuću raspoloživost, stalnu i relativno visoku temperaturu tijekom cijele godine, veliku specifičnu toplinu, a moraju biti i jeftini, čisti i nereaktivni prema građevnom materijalu izmjenjivača topline (Budin, 2012)

#### 4.5. Opis procesa

Rashladni se medij stlačuje na određeni tlak, te se pritom ulaže rad, a sami medij se zagrijava izentropski (od točke 1 do 2 na slici 4-4). Ovo je idealizirani proces, a ukoliko se razmatra stvarni proces, dužina koja povezuje točku 1 i 2 ne bi bila ravna, nego bi točka 2 bila odmaknuta udesno od svoje sadašnje pozicije (Budin, 2012). Rashladni se medij sada hladi i kondenzira, pritom predaje (u režimu grijanja) svoju toplinu rashladnoj vodi ili zraku te proces dopijeva u točku 3. Ta rashladna voda ili zrak tada se mogu koristiti za zagrijavanje nekog prostora (Budin, 2012). Nakon kondenzacije medija on se prigušuje pri čemu ekspanzira te mu se smanjuje tlak i temperatura u još jednom izmjenjivaču topline koji se naziva isparivač (od točke 3 do 4) (Budin, 2012). Mokra para nakon stanja koje je opisano u točki 4 sada oduzima toplinu hladnom tijelu (u slučaju dizalice topline koja radi u režimu grijanja to tijelo je okolišni zrak, voda ili tlo) te pritom isparava u plinovito stanje. Takav plin sada se opet komprimira u kompresoru, zatvarajući lijevokretni ciklus (od 4 do 1) (Budin, 2012).

Ako okrenemo Carnotov proces, tada on dovođenjem rada u sustav uzima toplinu od hladnijeg spremnika i postaje davaoc topline, a grijanom spremniku predaje preuzetu toplinu. Jedno bitno svojstvo takvog inverznog Carnotovog procesa je koeficijent rada, odnosno *COP*, koji možemo definirati na dva načina (Paić, 1994):

1. Dizalica topline služi za grijanje – koeficijent rada tada se definira kao omjer topline  $Q$  (koju je dizalica predala grijanom objektu) i mehaničkog rada  $W$  (kojeg je bilo potrebno uložiti u sustav)

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (4-1)$$

2. Dizalica topline služi za hlađenje – koeficijent rada tada definiramo kao omjer topline  $Q'$  koju je hlađeni objekt predao dizalici topline i rada  $W$  koji je uložen u svrhu prijenosa topline

$$COP = \frac{Q'}{W} \quad (4-2)$$

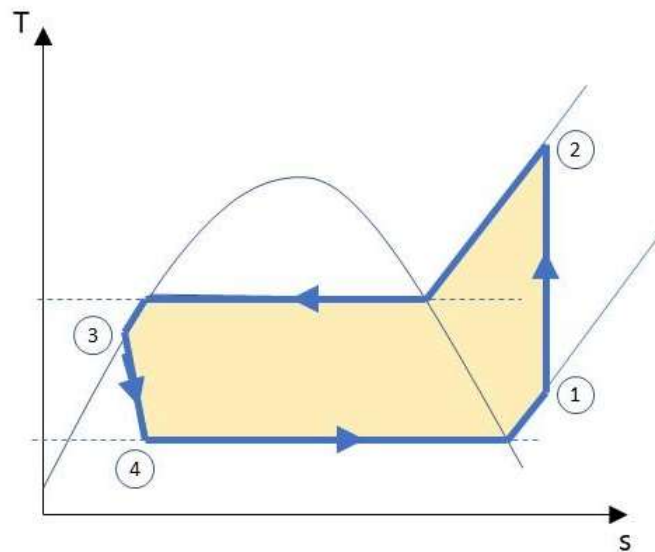
Koeficijent rada direktno ovisi o razlici temperatura  $T-T'$ , pa ako pretpostavimo da je grijani prostor na temperaturi od  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , a davaoc topline (u ovom slučaju tlo) na temperaturi od  $T' = 15^{\circ}\text{C}$ , dobiti ćemo vrijednost koeficijenta učinkovitosti. Ovaj koeficijent rada ili toplinski množitelj znači da ćemo uz uloženi rad od 1 kW u obliku električne energije dizalici topline, dobiti toplinsku energiju u vrijednosti  $COP$ -a pomnoženog s količinom uložene energije u kW. Iz ovog jednostavnog pokaznog primjera vidljiva je važnost i pogodnost dizalica topline za grijanje prostora. No, zbog nesavršenosti procesa i strojnih elemenata takva se iskoristivost ne može postići (Paić, 1994).

Ukoliko je dizalica topline projektirana za rad u režimu grijanja i hlađenja, koriste se kombinirani uređaji koji mogu grijati i hladiti. Kao i kod jednostavnih dizalica topline, uređaj može raditi s nekoliko načina prijelaza topline: zrak-rashladni medij-zrak, zrak-rashladni medij-voda-zrak, voda-rashladni medij-voda-zrak ili zrak-rashladni medij-voda-tlo, između ostalih mogućnosti. Razlika ovakve izvedbe u odnosu na jednostavnu dizalicu topline leži u dodatnom strojnom elementu – prestrujnom ventilu (Budin, 2012).

Prestrujni ventil ima svrhu okrenuti smjer cirkulacije rashladnog medija, a termodinamički proces hlađenja (1-2-3-4) i grijanja (4-3-2-1) prikazan je na slici 4-4. Kada se radni medij zagrije uslijed prolaska 'hladnog' zraka (ili bilo kojeg drugog medija koji zagrijava prostor, spremnik ili slično) kroz isparivač te se komprimira, takav se rashladni medij tada može dovesti u kondenzator uz pomoć prestrujnog ventila i ohladiti se okolnim zrakom koji se pri tom koraku zagrijava (Budin, 2012).

U režimu hlađenja ventilator upuhuje okolni zrak čija je temperatura niža od komprimiranog rashladnog medija te se on strujanjem okolnog zraka na stijenke kondenzatora hladi i ukapljuje. Rashladni se medij tada ekspandira u prigušnom ventilu do tlaka u isparivaču. Isparavanje rashladnog medija uzima toplinu hlađenog objekta uslijed niže temperature i nakon isparavanja ulazi u kompresor, čime se termodinamički ciklus zatvara. Kompresija i ekspanzija može se

izvesti u jednom ili više stupnja, čime se uz manju snagu kompresora postižu manje temperature radnog fluida (Budin, 2012).



**Slika 4-4.** Termodinamički ciklus dizalice topline u režimu grijanja (1-2-3-4) i hlađenja (4-3-2-1)

#### 4.6. Gubici koji se javljaju u sustavu

Usljed nesavršenosti procesa, radnih fluida i strojnih elemenata, javljaju se gubici koji se pri proračunu moraju uzeti u obzir. Gubici koji se javljaju potječu iz cjevovoda, kompresora i odstupanja svojstava stvarnog rashladnog medija od idealnog plina, a manifestiraju se kroz mehaničke i električne gubitke. Također, temperatura toplijeg medija je za nekoliko stupnjeva niža od temperature na kojoj rashladni medij kondenzira, a isto tako temperatura hladnijeg medija viša je od temperature isparavanja. Ako obuhvatimo sve gubitke, ukupni stupanj djelovanja dizalica topline kreće se od 25 do 75 % (Budin, 2012).

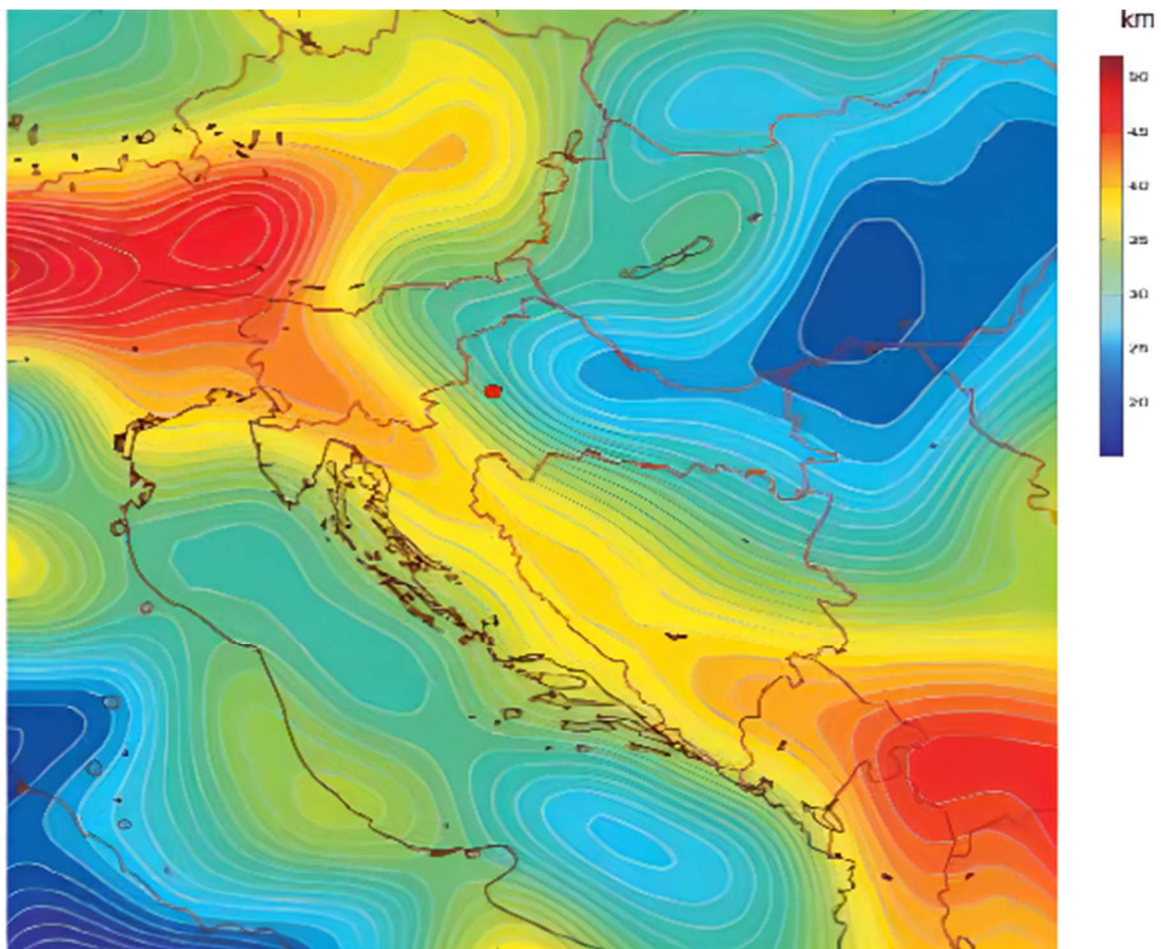
#### 4.7. Geologija i struktura stijena panonskog bazena

S obzirom na geotermalni gradijent, Republika Hrvatska se može podijeliti na tri područja – Panonsko, centralno i područje Dinarida. Panonski bazen se odlikuje visokim geotermalnim gradijentom i visokom gustoćom toplinskog toka, što je dobro za moguću primjenu

geotermalnih dizalica topline (Renewable energy policies advocacy and monitoring [REPAM], 2020).

Panonski bazen kao strukturalna cjelina ograničen je planinskim lancima Alpi, Karpata i Dinarida. Litologiju Panonskog bazena karakteriziraju klastiti i vapnenci miocenske starosti. Naslage nastale eolskim ili aluvijalnim procesima datiraju iz doba kvartara, a podina ovih stijena su trijasko i eocenske naslage koje izdanjuju samo mjestimično, a ispresijecane su mnogim rasjedima koji pospješuju tok topline u gornje slojeve (REPAM, 2020).

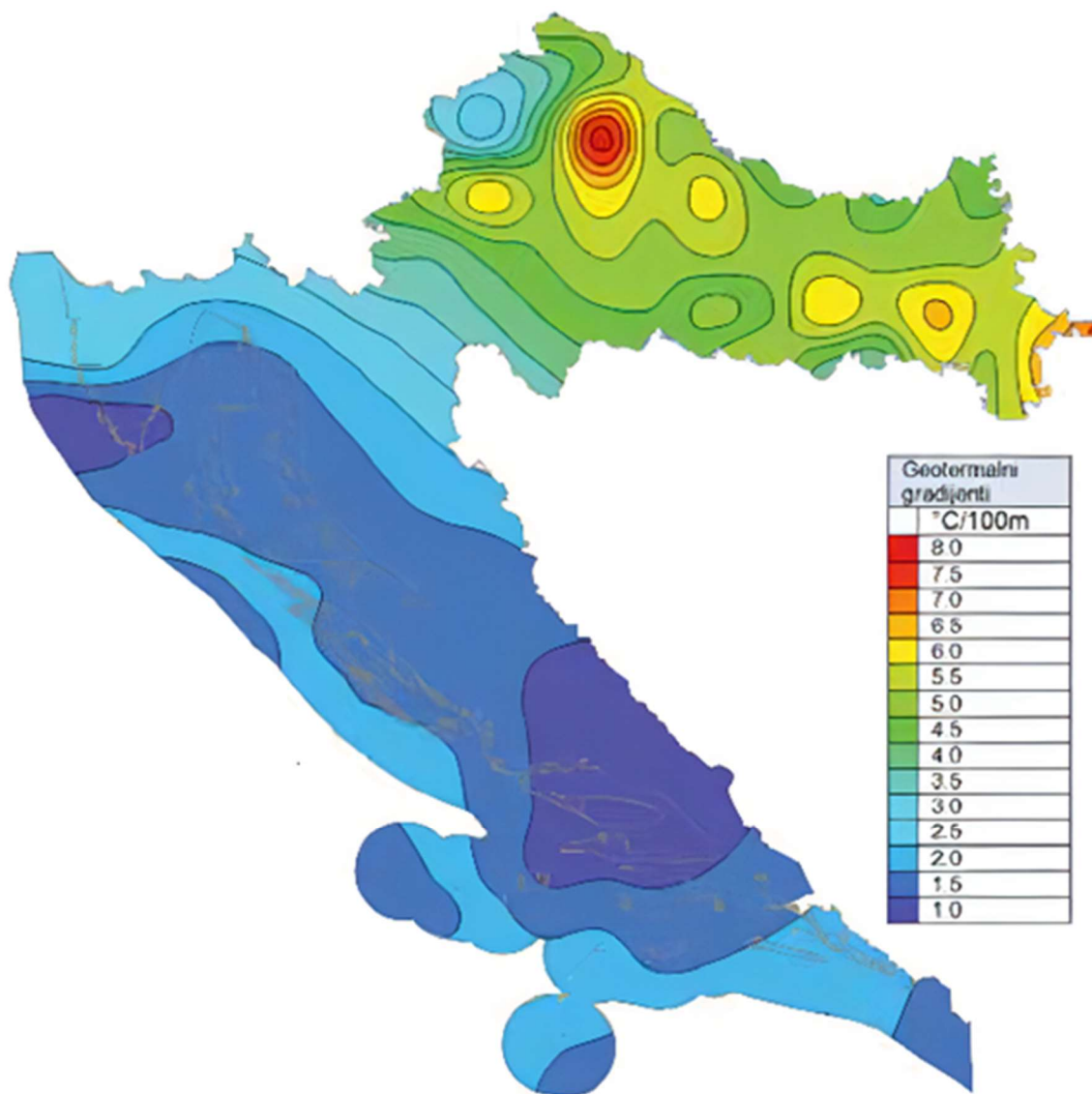
Geotermalni gradijent je u Republici Hrvatskoj pod najvećim utjecajem male dubine Mohorovičićevog diskontinuiteta (odnosno granice između Zemljine kore i plašta), te se u prosjeku nalazi na dubini od 25 i 30 kilometara u području Panonskog bazena (slika 4-5) (REPAM, 2020).



**Slika 4-5.** Geotermalni gradijent na širem području Panonskog bazena

Tako mala dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta u kontinentalnoj kori razlog je regionalnoj pozitivnoj anomaliji gdje gustoća toplinskog toka na površini doseže vrijednosti

veće od  $100 \text{ mW/m}^2$ . Geotermalni gradijent na području sjeverozapadne Hrvatske kreće se od  $0,04$  do  $0,05 \text{ }^\circ\text{C/m}$ , uz lokalne anomalije koje imaju vrijednosti i preko  $0,06 \text{ }^\circ\text{C/m}$  (slika 4-6). Varijacije gradijenta na određenim lokacijama uzrokovane su konvektivnim prijenosom topline uslijed cirkulacije fluida, pored općenitog konduktivnog prijenosa (REPAM, 2020).



**Slika 4-6.** Geotermalni gradijenti na području Republike Hrvatske



## 5. UTJECAJ PODZEMNE VODE

Postojanje podzemne vode bitno utječe na prijenos toplinske energije i pravilno dimenzioniranje bušotinskog izmjenjivača i njegovu dugoročnu učinkovitost. Razlog tome je što se uz vodu toplina prenosi i kondukcijom i konvekcijom. Podzemna voda također bolje prenosi toplinu s bušotinskog izmjenjivača na stijenu ili obrnuto uslijed veće kontaktne površine koju fluid ostvaruje (Michalski i Klitzsch, 2018).

Kretanje podzemne vode također odnosi dio topline u smjeru svojeg kretanja, što može negativno utjecati na susjedne bušotinske izmjenjivače ukoliko su postavljeni u pravcu toka podzemne vode. Da bi se održala visoka učinkovitost grupe bušotinskih izmjenjivača, poznavanje karakteristika podzemne vode od iznimne je važnosti (Michalski i Klitzsch, 2018).

Velika toplinska provodljivost pri ispitivanju TRT (eng. *thermal response test*) ili EGRT (eng. *enhanced geothermal response test*) metodom ne može se objasniti samom litologijom, što nam ukazuje na postojanje podzemne vode koja se kreće u vodonosniku. Osim toga, EGRT metoda ne daje primjenjive veličine za brzinu kretanja vode i njezin smjer (Michalski i Klitzsch, 2018).

Toplina se s izmjenjivača u nepokretnoj podzemnoj vodi širi po principu skoro savršenih koncentričnih krugova, ukoliko bi se u okolno tlo ugradili senzori topline. Ako bi, pak, tok podzemne vode postojao, toplina će se širiti u obliku elipsi, čiji bi dulji krak predstavljao smjer u kojem se voda kreće (slika 5-1) (Michalski i Klitzsch, 2018).

Da bismo izračunali utjecaj podzemne vode na prijenos topline, mogao bi se iskoristiti modificirani Fourierov zakon o energetskej ravnoteži (Michalski i Klitzsch, 2018):

$$\nabla \cdot (\rho_w c_w T_w \mathbf{v} - \lambda \nabla T) + S_H = c_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad 5-1$$

Gdje je:  $T$  – temperatura [°C]

$\rho_w$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

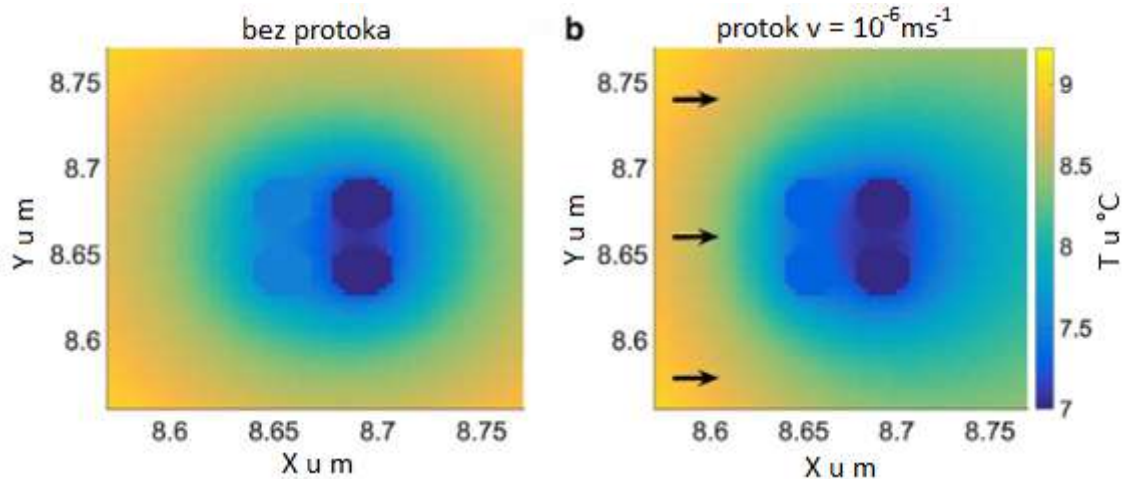
$c_w$  – specifični toplinski kapacitet vode [J/kgK]

$S_H$  – volumenski izvor topline [W/m<sup>3</sup>]

$\lambda$  - efektivna toplinska provodljivost vodom zasićene stijene [W/mK]

$c_e$  – volumetrijski toplinski kapacitet vodom zasićenog poroznog medija [ $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ ]

$v$  – Darcy-jeva brzina strujanja podzemne vode [ $\text{m}/\text{s}$ ]



**Slika 5-1.** Distribucija temperature oko bušotinskog izmjenjivača bez protjecanja podzemne vode (a) i s protjecanjem vode (b) brzinom od  $10^{-6}$  m/s

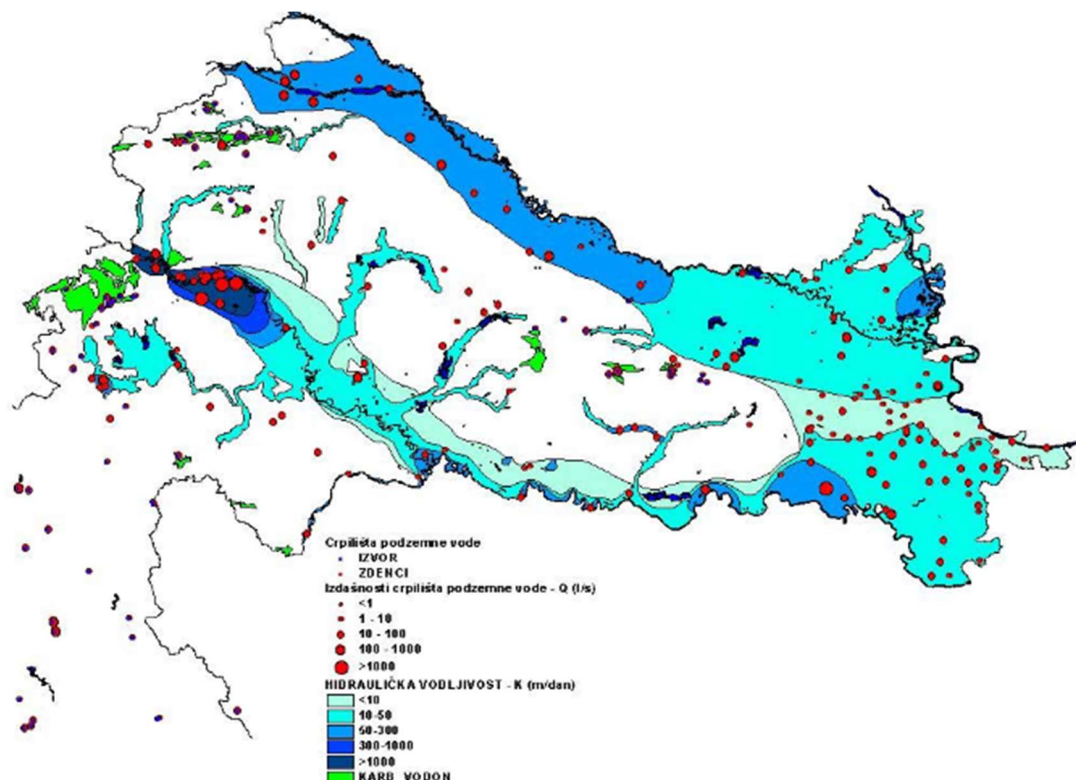
### 5.1. Podzemna voda u panonskom bazenu

Hrvatski dio panonskog bazena nalazi se na njenom sjevernom i istočnom djelu, a karakteriziraju ga prostrane ravnice rijeke Drave i Save. U navedenim ravnicama nalaze se vodonosnici s intergranularnom poroznošću, a površinsko otjecanje tvori mnoge rijeke različitih veličina. Značaj Hrvatskog djela Panonskog bazena uviđa se i činjenicom da se od ukupno 363 cjeline podzemnih voda čak njih 316 odnosi na Panonski dio (Hrvatski Geološki Institut, [HGI], 2009).

Klastiti porijeklom iz jezerskih, močvarnih, riječnih ili eolskih sedimentacijskih procesa taložili su se u velikim količinama, a djelom su uzdignuti boranjem ili tektonskim procesima rasjedanja. Na ovaj način nastali su Murski i Dravski vodonosnik na krajnjem sjeveru Hrvatske, te Savski i Slavonsko-srijemski bazen na jugu Panonskog bazena. Ovi tektonski procesi uvjetovali su lateralno širenje Dravskog bazena koji se znatno širi s istoka prema zapadu, te je mnogo veći nego Savski. Ovi vodonosnici nastali su u kvartaru, a Savski vodonosnik je, naspram Dravskog, mnogo raznolikije građe i manje debljine (HGI, 2009).

Kako se taloženjem čestica uzdužni pad smanjivao, tako je energija kojom voda djeluje na klastite također padala, što je uzrokovalo ranije taloženje većih čestica, dok je udaljeniji put bio prekriven sa sve više sitnih čestica. Zbog tog razloga zapadni dio Dravskog bazena sastoji se od valutica šljunka i krupnozrnatog pijeska, a kretanjem prema istoku nailazimo na sve sitnije čestice, sve do pojave pa i dominacije sitnozrnatog pijeska istočno od Suhopolja. Mjestimični prosljoci pijeska u inače dominantnom šljunkovitom zapadnom djelu Dravskog bazena ukazuju na promjene u energiji tekuće vode. Savski bazen karakteriziran je valuticama manje zaobljenosti (HGI, 2009).

Zapadni dio Dravskog i Savskog vodonosnika vrlo je hidraulički vodljiv, te se ta vrijednost postepeno smanjuje kretanjem prema istoku (slika 5-2). Što se tiče poroznosti i načina na koji podzemna voda kola vodonosnicima, dominira međuzrska poroznost. Gorski i brežuljkasti dijelovi koji čine rubove sliva slabo su propusni pa se većina meteorske vode ne procjeđuje u vodonosnik. Izdašnost vodonosnika stoga varira, od 1/s do 60 l/s, pa sve do 120 l/s kao što je primjer u izvoru Veličanke na Papuku. Ova podzemna voda vrlo je čista zbog nenastanjenosti i pokrivenosti brežuljaka šumom (HGI, 2009).



**Slika 5-2.** Prosječna hidraulička vodljivost aluvijalnih vodonosnika u Hrvatskom djelu Panonskog bazena

U zapadnom djelu oba vodonosnika krovinskih naslaga skoro da i nema ili su pak vrlo tanke, što taj dio vodonosnika čini otvorenim. Procjenjuje se da se čak 30 % vode porijeklom od padalina procjeđuje i opskrbljuje vodonosnik vodom. Rijeke se urezuju u najviši vodonosnik i s njime imaju izravan kontakt, te se iz njega napajaju ili ga dreniraju, ovisno o intenzitetu padalina (HGI, 2009).

## 5.2. Temperatura za pojedinu cjelinu

Temperatura podzemnih voda varira s obzirom na godišnje doba, no u pravilu ona odražava srednju vrijednost temperature zraka na mjestu upijanja vode u vodonosnik. Eventualna greška u očitavanju temperature podzemne vode posljedica je slabe, odnosno spore cirkulacije vode, zbog čega se voda u cijevi piezometra zagrijava ili hladi (označeno s „\*“ u tablici). U tablici 5-1 prikazane su vrijednosti temperature podzemne vode sistematizirane po cjelinama, počevši od zapada prema istoku (HGI, 2009).

**Tablica 5-1.** Prosječna temperatura podzemne vode u hidrografskoj cjelini

Cjelina	Područje	Minimalna temperatura (°C)	Maksimalna temperatura (°C)
Međimurje		12	15,4
Varaždinsko područje		9	14
Sliv Bednje	Ivanščica	9,1	10,5
	Ravna gora	8,9	12,7
Legrad – Slatina		11	13,6
Novo Virje	Nema podataka		
Istočna Slavonija, sliv Drave I Dunava		10	15
Sliv Sutle i Krapine		9,1	13
Sliv Ilova – Lonja – Pakra		9,5	14
Sliv Orljave		11,7	13,5
Zagreb	Crpilište Bregana	10,8	15,8
	Crpilište Šibice	8,4	14,4
	Crpilište Strmec	9,7	18,2
	Crpilište Stara loza	8,4	17

	Prečko - Horvati	12,3	17,7
	Crpilište Zaprude*	4,3	26
	Crpilište Sašnjak – Žitnjak	11,5	15,9
	Crpilište Petruševac*	9,4	20,7
	Crpilište Kosnica (buduće) *	7,8	16,2
	Crpilište Mala Mlaka	11	15,1
	Crpilište Velika Gorica *	10,3	21
	Crpilište Ivanja Reka	12,5	13,9
Lekenik – Lužani*		11,5	16,3
Istočna Slavonija – sliv Save*		10	25
Žumberak – Samoborsko gorje	Nema podataka		
Donji tok Kupe *		11	19

Osim temperature podzemne vode, vrlo je važna i njena razina. Monitoring razina na spomenutim područjima započet je u različito doba uslijed ispitivanja provedenih za velike projekte od nacionalnog interesa ili sličnih pothvata. Motrenje variranja razine podzemnih voda obavljeno je piezometrima koji su u vlasništvu Državnog hidrometeorološkog zavoda ili Hrvatske elektroprivrede. Na svim piezometrima se u posljednjih 11 godina uviđa trend padanja razine podzemne vode, osim na području Baranje koja bilježi porast. Razina podzemne vode varira s obzirom na mjesto ispitivanja te će se u ovom radu ona procijeniti (HGI, 2009).

## 6. TOPLINSKI POBOLJŠAN BETON

Beton koji gradi stijenku bušotine vrlo je bitna komponenta izmjenjivača topline i osigurava pravilan rad tog dijela dizalice topline. Njegov je osnovni zadatak dobro popuniti prostor između stjenki bušotina i izmjenjivača, osigurati strukturnu stabilnost i ostvariti dobro protjecanje topline od stijene prema izmjenjivaču ili obratno (Silwa i dr., 2017).

Iako se beton uobičajenih receptura ističe svojom niskom toplinskom provodljivošću i zato koristi kao izolator, neki dodaci mogu mu povećati toplinsku provodljivost i kapacitet. Ovakve mješavine svojim karakteristikama smanjuju naprezanja koja se u betonu javljaju uslijed različitih temperaturnih gradijenata. Toplinsko širenje i skupljanje mogu izobličiti beton ili ga mehanički oštetiti. Upravo zbog pojave tih naprezanja klasični se beton mora izolirati ne bi li ih smanjio na minimum. Promotrimo li građevine poput mostova koje nisu toplinski izolirane (poput stambenih zgrada), uviđamo problem i potrebu kontroliranja tih naprezanja ( Xu i Chung, 2000). Da bi se betonu povećao toplinski kapacitet, a samim time i njegova temperaturna stabilnost, u njega se miješaju razni aditivi koji djeluju kao izolatori. Mijenjanje svojstava toplinske provodljivosti i kapaciteta povezane su recipročnom vezom, pa ako neki dodatak povećava toplinski kapacitet, isto tako smanjuje i njegovu toplinsku provodljivost. Aditivi betona koji služe ovoj svrsi su mješavine polimera poput lateksa čije čestice predstavljaju toplinski barijeru između konduktivne provodljivosti mineralnih zrna. To isto tako mogu biti i kratka ugljična vlakna (koja, premda posjeduju svojstvo provođenja topline, u manjim koncentracijama djeluju suprotno) ili porozni dodaci poput vermikulita ili perlita ( Xu i Chung, 2000). Prijašnja istraživanja za povećanje toplinske provodljivosti betona temeljila su se na recepturi s više vlage ili s mineralnim agregatom bolje provodljivosti za toplinu, s dodatkom čeličnih niti ili mreža ( Xu i Chung, 2000). Neka istraživanja, koja su se bavila dodatcima poput silana (vodeni amino vinil) i precipitirane silike, što je tema poglavlja 6.4. Toplinska provodljivost u suštini ovisi o 3 faktora – toplinskoj difuzivnosti, specifičnom toplinskom koeficijentu i gustoći. Povećanje bilo kojeg od ovih faktora rezultirati će u povećanju toplinske provodljivosti nastalog betona (Xu i Chung, 2000). Beton za zacjevljivanje trebao bi se lako pumpati i imati povećanu toplinsku provodljivost uz malu propusnost. Propusnost stijenke bušotine važna je glede izoliranja utjecaja geotermalnog bušotinskog izmjenjivača topline s podzemnom vodom u koju je djelomično uronjen (Silwa, Kowalski, Stryczek, 2017). Oštećenja na izmjenjivaču uslijed potresa, klizišta i sličnih tektonskih pojava svakako su moguća, pa korišteni beton za zacjevljivanje također mora posjedovati određenu čvrstoću i žilavost da bi preživio sile koje se javljaju (Tinti i dr., 2015). Postoje mnogi toplinski

poboljšani betoni, odnosno recepti za mješavinu, koji imaju zadovoljavajuće parametre za primjenu u stijenkama bušotine ove namjene. Ti recepti poznatiji su pod imenima Calidutherm–Terra Calidus, Hekoterm–Hekobentonity, Raugeotherm–Rehau, Stüwa Therm–Stüwa Graz i ThermoCem Plus–Góraždze. Zbog njihove dobre termalne propusnosti oni su skupi, ali postoje određena istraživanja koja su se posvetila različitim aditivima čija prisutnost u betonu diže toplinsku provodljivost u različitim mjerama (Silwa i dr., 2017).

## 6.1 Grafit kao aditiv

Grafit u obliku krhotina prirodni je materijal, nastao sličnim procesima kao i ugljen, no uz viši stupanj metamorfoze. Odlikuje se pravilnom kristalnom strukturom i svojstven mu je metalični sjaj. Njegova bitna svojstva su velika toplinska i električna provodljivost, velika otpornost na kemizam i promjene u temperaturi te se baš zato koristi za kvalitetne lijevačke kalupe ili kokile (Silwa i dr., 2017).

Ispitivanja su provedena na testnim uzorcima u obliku valjčića debljine 12 mm, a sadržavali su različite udjele grafita u mješavini metalurškog betona i različite udjele vode (tablica 6-1). Uzorci su izrađeni u suglasju sa standardom PN-EN ISO 10426-2, a pripremljeni su na 3 načina (Silwa i dr., 2017):

1. Uzorak A – njegova temperatura prije testiranja iznosila je 25°C
2. Uzorak B – pripremljen je tako da se prethodno nalazio potopljen u vodi
3. Uzorak C – je predgrijan u peći na 80°C

**Tablica 6-1.** Udio grafita kao aditiva i vode u betonu

Tip cementa	Omjer vode i cementa	Postotak grafita (%)
CEM III/B-V 32,5 R	0,8	5
CEM III/B-V 32,5 R	0,8	10
CEM III/B-V 32,5 R	0,8	15
CEM III/B-V 32,5 R	1	10
CEM III/B-V 32,5 R	1	20
CEM III/B-V 32,5 R	1	30
CEM III/B-V 32,5 R	1,2	10
CEM III/B-V 32,5 R	1,2	20

Krajnji rezultati prikazani su u tablici 6-2, a prikazuju poboljšanje toplinske provodljivosti uz dodatak aditiva. Tablica također sadrži i pregled toplinske provodljivosti nekih uobičajnih materijala radi usporedbe, a u suštini pojašnjava pogodnosti primjene grafita kao aditiva za podizanje toplinske provodljivosti betona (Silwa i dr., 2017).

**Tablica 6-2.** Rezultati ispitivanja na testnim uzorcima

Cement CEM III/B-V 32.5 R	Toplinska provodljivost (W/mK)		
	Uzorak A	Uzorak B	Uzorak C
Bez aditiva, v/c 0,7	0,370	0,415	0,497
Bez aditiva, v/c 0,8	0,381	0,638	0,485
5 % grafita, v/c 0,8	0,395	-	0,571
10 % grafita, v/c 0,8	0,852	1,032	0,496
20 % grafita, v/c 0,8	0,605	0,928	0,452
10 % grafita, v/c 1,0	0,451	1,360	0,627
20 % grafita, v/c 1,0	0,539	2,750	0,521
30 % grafita, v/c 1,0	0,728	2,133	1,175
10 % grafita, v/c 1,2	1,175	2,850	0,927
20 % grafita, v/c 1,2	0,840	1,322	0,898
Sitnozrnati pješčenjak	2,550	-	-
Polietilen	0,400	-	-
Staklo	0,910	-	-

Iz tablice se može zaključiti da grafit povećava termalnu provodljivost stvrdnutog betona, te da je najbolji omjer onaj s 10 % grafita s omjerom vode i cementa od 1,2 ako nema podzemnih voda. Ukoliko je betonska konstrukcija u vodi, tada je najbolje rezultate pokazala mješavina s 20 % grafita, te s omjerom voda/cement od 1,0 (Silwa i dr., 2017).

## 6.2. Čelična žica kao aditiv betonu

Glede nekih nepovoljnih svojstava pri korištenju većeg udjela vlage poput mehaničkog oslabljenja nastalog betona ili pak smanjene raspoloživosti (a ujedno i veće cijene) mineralnog agregata s boljim svojstvima provođenja topline, fokus istraživanja premjestio se na neke druge obećavajuće tehnologije. Velika koncentracija čelika u obliku žica ili mreže potrebna je da bi



uspješno podigla vrijednost toplinske provodljivosti, a pri korištenju takvih solucija toplina se kondukcijski prenosi primarno između čestica čelika, no ne i samog betona. Također, čeličnu mrežu teško je dodati kao aditiv betonu i zahtjeva više rada, što otvara vrata za istraživanje na novim, jednostavnijim i jeftinijim solucijama (Xu i Chung, 2000).

Ispitivanja na betonu s dodatkom čeličnih niti temeljila su se na promatranju njihovog učinka niti na toplinski koeficijent, provodljivost, toplinsko širenje i gubitak mase pri zagrijavanju betona na povišene temperature. Korištenje čeličnih niti poboljšava vlačnu čvrstoću, smanjuje stvaranje pukotina i poboljšava otpornost betona na starenje i zamor materijala, skupljanje pri sušenju i naprezanja uslijed toplinskih utjecaja. Zbog pozitivnog djelovanja ovog dodatka na fizikalna svojstva, ovakav beton koristi se u cestama, pločnicima, kao obloga u nuklearnim reaktorima, silosima i betonskim branama (za tzv. *gravity dams – obične brane*) (Lie i Kodur, 1995).

Testovi provedeni na betonu ojačanom čeličnim nitima temeljili su se na ispitivanju 3 vrste uzoraka: NRC1 NRC2 i NRC3. NRC1 upotrebljava silikatne agregate, a NRC2 i NRC3 sačinjeni su od karbonatog agregata. NRC1 i NRC3 su ojačani čeličnim nitima, dok NRC2 nije. Receptura za sve ispitivane betone odgovarala je onoj koja je dizajnirana da nakon 28 dana otvrdnjavanja postigne čvrstoću od 35 MPa, pri čemu je korišten običan portland cement i superplastifikator. Fini agregat odnosno pijesak bio je silikatnog sastava u sva tri ispitivana slučaja (Lie i Kodur, 1995).

RIBTEC čelične niti XOREX 'type I', napravljene su u tvrtki Ribbon Technology Corporation i koristila su se kao odabrana vrsta čeličnih niti. Maseni udio čeličnih niti iznosio je 1,77 (Lie i Kodur, 1995).

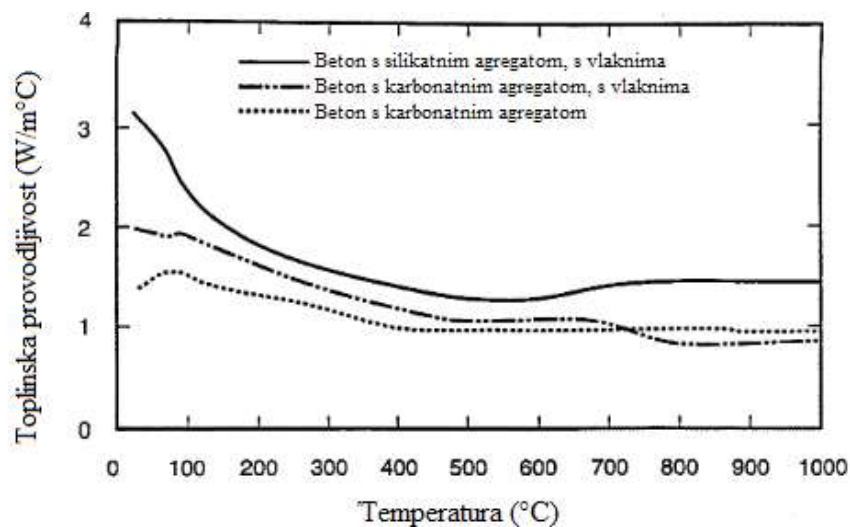
Koristeći metodu *non-steady state conduction method* izmjereno je svojstvo toplinske provodljivosti. U ovoj metodi se mjeri zagrijavanje mjerne žice koja se nalazi kao sendvič između dvaju testna uzorka (Lie i Kodur, 1995).

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (6-1)$$

U originalnom radu mjerene vrijednosti toplinske provodljivosti su se ovom metodom mjerile u temperaturnim intervalima od sobne temperature, do 50 °C, 75 °C, 100 °C, pa nadalje u koraku od 100 °C do krajnjih 1000 °C. Pošto beton kod primjene za cementaciju bušotine geotermalne dizalice topline rijetko doseže temperature iznad 50-75 °C, rezultati u

temperaturnom intervalu od sobne temperature do 50-75 °C biti će uzeti u obzir (slika 6-1 i tablica 6-3) (Lie i Kodur, 1995).

Toplinska provodljivost čelika veća je za oko 50 puta od one koju ima beton. Prijašnja su istraživanja potvrdila da je mineralni agregat u betonu odgovoran za najveću promjenu u toplinskoj provodljivosti betona. Kod korištenja silikatnog agregata toplinska provodljivost bila je veća uslijed bolje kristaliziranosti takve vrste agregata u usporedbi na kalcitne agregate. Čim veći stupanj kristaliniteta, to veća toplinska provodljivost i brzina padanja tog svojstva pri zagrijavanju (Lie i Kodur, 1995).



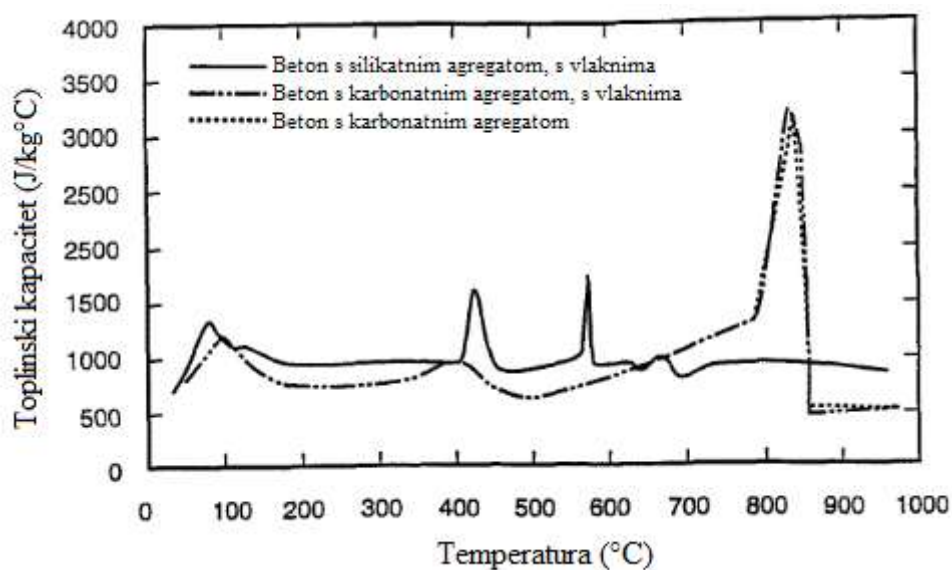
**Slika 6-1.** Toplinska provodljivost triju različitih mješavina betona

**Tablica 6-3.** Promjena termalne provodljivosti u betonima s različitim aditivima

Beton sa silikatnim ag., s vlaknima		Beton s karbonatnim ag., s vlaknima		Beton s karbonatnim agregatom	
Temp.	Toplinska provodljivost	Temp.	Toplinska provodljivost	Temp.	Toplinska provodljivost
(°C)	(W/m°C)	(°C)	(W/m°C)	(°C)	(W/m°C)
25	3,2	24	2	32	1,4
75	2,7	75	1,9	75	1,5
110	2,3	105	1,9	110	1,5
195	1,9	193	1,6	192	1,4
291	1,6	283	1,4	288	1,2
392	1,4	383	1,2	387	1

495	1,3	480	1,1	487	1
599	1,3	587	1,1	591	1
704	1,4	692	1,1	696	1
809	1,5	900	0,9	793	1
1000	1,5	1000	0,9	860	1
-	-			889	1
-	-			1000	1

Promjene u specifičnom toplinskom kapacitetu pojedinih receptata betona prikazane su na slici 6-2, dok se tablični prikaz istog nalazi na tablici 6-4.



Slika 6-2. Specifični toplinski kapacitet triju ispitivanih receptura betona

Tablica 6-4. Specifični toplinski kapacitet triju ispitivanih receptura betona prikazan tablično

Beton sa silikatnim ag., s vlaknima		Beton s karbonatnim ag., s vlaknima		Beton s karbonatnim agregatom	
Temp.	Toplinska provodljivost	Temp.	Toplinska provodljivost	Temp.	Toplinska provodljivost
(°C)	(W/m°C)	(°C)	(W/m°C)	(°C)	(W/m°C)
50	883	50	799	50	805
100	1181	100	1188	100	1200
150	1021	150	865	150	872
200	936	200	755	200	759
250	941	250	767	250	770
300	945	300	782	300	786

350	953	350	812	350	815
400	949	400	954	400	960
450	899	450	704	450	705
500	891	500	630	500	631
550	982	550	68	550	686
600	917	600	776	600	777
650	926	783	1300	784	1310
737	921	831	2929	824	2970
845	902	833	3027	826	3070
952	829	835	3125	828	3170
-	-	837	2821	844	2860
-	-	839	2585	846	2620
-	-	851	472	852	470
-	-	853	511	858	510
-	-	965	511	-	-

Toplinsko širenje betona i gubitak mase nije osobito velik problem u cementaciji bušotine za bušotinske izmjenjivače topline, pa neće biti obrađen.

### 6.3. Čelične mreže kao aditiv betonu

Ferrocement je vrsta ojačanog betona od Portland cementa ili bilo kojeg hidrauličnog veziva s armaturom od slojeva relativno sitnih žičanih mreža. Ovakva vrsta cementa pronalazi svoje praktične primjene u sve više industrija u posljednjih 20 godina (Shah i Balaguru, 1984).

Istraživanje je pokazalo da, ako sitnije frakcije mineralnog agregata dominiraju u mješavini, toplinska se provodljivost povećava dok se toplinski kapacitet smanjuje. Slično tome, ispitana armatura od mrežastog željeza pokazala je bolje rezultate toplinske provodljivosti kada je bila postavljena tako da ostvaruje kontakt stijenske i unutarnji dio ispune u okomitom smjeru, dok je paralelni smjer postavljanja armature dao niže vrijednosti u provođenju (Hawlander i dr., 1990).

Toplinska provodljivost izračunata je preko Fourierovog zakona o kondukcijskom prijenosu topline.

Koeficijent  $k$  to jest vrijednost konduktiviteta materijala betona bez dodanih željeznih pojačanja iznosila je 1 W/mK, što se slaže s ostalim istraživanjima. Rezultati istraživanja prikazali su dramatičan skok u provodljivosti u svakom uzorku kod kojeg je čelična mreža

postavljena pod kutom od 0°. Kao takva, mreža postavljena na ovaj način ponaša se kao krilca koja brže dispergiraju ili prikupljaju toplinu, što rezultira povećanjem kondukcije topline. Ako postavimo mrežu paralelno sa stijenkama betona, taj beton će se ponašati kao izolator između svakog sloja što ga odjeljuju kolone armature (Hawlander i dr., 1990).

Možemo promotriti iz tablice 6-5 da je kondukcija za otprilike 1,5 puta veća u odnosu na cement u kojemu je mreža postavljena paralelno. Efekt poboljšanog raspršivanja topline samom geometrijom armature mogao bi se koristiti kao eventualni stoper kod cementiranja bušotine, što bi valjalo istražiti u nekom drugom radu isto kao i testovi koji ispituju vezu između specifične površine kontakta mreže i cementa, te udio vlage u matrici cementa (Hawlander i dr., 1990).

**Tablica 6-5.** Rezultati ispitivanja orijentacije čelične mreže na provodljivost betona

Grupa	Uzorak	Broj slojeva mreže	Orijentacija mreže, $\alpha$ (°)	Toplinska provodljivost, k (W/mK)	Vrijeme do toplinske stabilnosti (sati)
A	A-0	0	0	1	14,2
	A-5	5	0	1,5	11
			90	1,1	13,3
	A-15	15	0	6,9	11,1
			90	4,2	13,3
	B	B-5	5	0	3,2
90				2,4	14
B-15		15	0	7,5	12,5
			90	3,2	14

#### 6.4. Silan i precipitirana silika kao aditiv betonu

Jedno posebno svojstvo silana jest povećanje moćivosti drugih aditiva ili mineralnog agregata, čime se postiže toplinska difuzivnost povećana do čak 27 % ako se koristi u mješavini s do 35 % precipitirane silike. Druga svojstva betona, poput tlačne čvrstoće i modula čvrstoće povećala su se dok je gustoća ostala praktički nepromijenjena ( Xu i Chung, 2000).

U ispitivanju, mineralni se agregat nije koristio, nego se voda miješala s Portland cementom u omjeru od 0,35 dok je 15 % težinskog udjela cementa zapravo precipitirana silika. Odabrani silan koristio se zbog njegove stabilnosti u vodenim mješavinama, a ispitivanja su se provodila na mješavinama koje su sadržavale 0, 0,2, 0,5, 0,75, 1, 1,5, i 2 % ( Xu i Chung, 2000).

Cementna smjesa miješala se u miješalici na srednjoj brzini, a nakon dodavanja silana i dodatka vode, miješala se 10 minuta na brzoj brzini te se naposljetku lijevala u blokove. Blokovi su se tada ostavili da se u potpunosti stvrdnu na zraku čija je vlažnost bila 100 %, što bi se moglo poistovjetiti s uranjanjem cementne mješavine direktno u vodu. Stvrdnjavanje je trajalo 28 dana kao već određeni vremenski period nakon kojeg Portland cement postiže svoju zadovoljavajuću čvrstoću ( Xu i Chung, 2000).

Dodavanjem precipitirane silike spustila se toplinska difuzivnost i konduktivnost, a povećala se specifična toplina betona. Dodavanjem silana termalna se difuzivnost povećala za 27 %, a specifični toplinski kapacitet za 35 %. Gustoća stvrdnutog betona također je porasla, no najveći efekt aditiva očitovao se kroz povećanje toplinske prenosivosti čija je promjena iznosila čak 78 %. Sveukupni efekt dodavanja precipitirane silike i silana bio je povećanje toplinske difuzivnosti za 18 %, povećanje specifičnog toplinskog kapaciteta za do 50 % i povećanje provodljivosti betona za do 38 %. Tlačna čvrstoća nastalog betona bila je za 12 % viša, a modul se povećao za čak 370 %, dok se vlačna čvrstoća smanjila. Dodatkom silana u težinskom omjeru od 0,2 % postignuto je vršno tlačno naprezanje koje je 19 % veće nego uobičajeno, a svakim se daljnjim povećanjem masenog udjela ta čvrstoća se povećavala. Povećanje čvrstoće bilo je u manjoj mjeri pa možemo zaključiti da je mali udio silana u betonu zadovoljavajući ( Xu i Chung, 2000).

Djelovanje silana ostvarilo se kroz međusobno formiranje kovalentne veze između čestica precipitirane silike. Mreža veza pojačala se, ukrutila i poboljšala provodljivost topline preko fotona. Ovi efekti aditiva silana javljaju se pri dodavanju 0,2 % mase naspram ukupne mase betona, a povećanjem udjela ta se vrijednost nije osobito puno mijenjala. Ovaj pronalazak potvrđuje i opravdava dodatne troškove koji se javljaju korištenjem silana, jer je on u praksi puno skuplji od samog cementa. Silan u obliku premaza puno je skuplji od ovog koji se koristi kao dodatak cementu pri miješanju, što je jedna od pozitivnih strana silana kao aditiva ( Xu i Chung, 2000).



## **7.2. Programski paket FeFlow 8.0**

FeFlow je programski paket koji služi za simulaciju i modeliranje podzemnog strujanja, prijenosa topline i tvari unutar raznih poroznih geoloških struktura. U paketu FeFlow 8.0 nalazi se nekoliko specijaliziranih aplikacija kojima FeFlow obuhvaća slijed događaja u projektu, od postavljanja početnih uvjeta preko simulacije do krajnjih rezultata.

U ovom radu primjenjuje se mogućnost modeliranja interakcije geotermalnih izmjenjivača topline i spremnika topline, odnosno poroznog medija koji se sastoji od šljunka i pijeska te podzemne vode koja protječe nekom brzinom kroz medij. Nacrti, projektiranje i optimiziranje sustava geotermalnih izmjenjivača topline mogu se modelirati tako da su to jednostruke ili dvostruke U petlje, ili kao koaksijalne cijevi. Još nudi modeliranje dizalica topline s otvorenom petljom, modeliranje dubokih bušotina i visokotemperaturnog rezervoara topline te kompleksnih geoloških i tektonskih struktura.

U programski paket unose se početni uvjeti koji definiraju toplinsku pumpu, tj. geometrija izmjenjivača, njihovog prostornog razmještaja u promatranom režnju tla, režima strujanja radnog fluida i energetske potrebe koje dizalica topline mora osigurati. U programskom paketu proračunava se i međusobna interakcija između pojedinih izmjenjivača topline.

FeFlow nudi mnoštvo opcija pri postavljanju bušotinskog izmjenjivača topline ne bi li se prije same izvedbe ispitao neki scenarij. Optimizacija parametara pri modeliranju bušotinskog izmjenjivača i dizalice topline može dati bolju iskoristivost sustava nakon izgradnje.

## **7.3. Proračun pomoću modela RES2GEO i programskog paketa FeFlow 8.0**

Programski paket FeFlow 8.0 omogućava višegodišnju simulaciju rada geotermalne dizalice topline u direktnoj vezi s parametrima tla. Proizvoljno se odabire duljina bušotinskog izmjenjivača, geometrijski oblik i narinuti protok koji kola u unutrašnjosti cijevnog sustava. Odabire se izvedba bušotinskog izmjenjivača pa se prema tome mogu ispitivati energetske tokovi koaksijalnih cijevnih izmjenjivača koji se koriste u ovom radu.

Ulazni parametri sastoje se od početnih uvjeta koji su zapravo linearno povećanje temperature uslijed geotermalnog gradijenta i dubina smještaja izmjenjivača. Dubina je u ovom slučaju konstantna te se prema njoj računa toplinski tok koji bušotinski izmjenjivač predaje ili prima:



$$T_z = 5 + \frac{10}{120} \cdot (-z) \quad 7-1$$

Gdje je:  $T_z$  – temperatura tla na dubini  $z$  (°C)

$z$  – dubina za koju računamo temperaturu (m)

Rubni uvjeti su parametri geotermalne dizalice topline i model protoka fluida kroz sve izmjenjivače. Kao režim protoka odabrano je da se radni fluid pri ulazu u bušotinske izmjenjivače dijeli na 13 izmjenjivača i nadalje se zagrijava ili hladi prolaskom kroz cijevi. Protok, izražen u metrima po satu, sada se dijeli na jednake dijelove i zagrijava se svaki put s temperature u ulaznom vodu prema temperaturi na izlazu iz izmjenjivača. Takav spoj naziva se paralelni spoj, a čitav energetske tok koji se ostvari prilikom toga je zapravo bilanca toplinske energije koja ulazi u naš grijani prostor.

Strujanje podzemne vode biti će modelirano preko hidrauličkog tlaka odnosno visine (eng. *Hydraulic head*). Razlika između tlakova na pojedinim stranama ostvariti će protok podzemne vode u smjeru pada gradijenta tlaka, a ostvariti će brzinu koja je uvjetovana efektivnom poroznošću medija, viskoznošću vode i udaljenosti, tj. debljini promatranog reznja tla. Ukoliko se želi prikazati primjer bez strujanja, odabrani hidraulički tlak mora biti isti u svim smjerovima.

U ovom radu obraditi će se primjer s 13 bušotinskih izmjenjivača s koaksijalnim cijevima. Razlika hidrauličkih tlakova postoji na zapadnoj i istočnoj strani, dok je sjeverna i južna strana modelirana kao nepropusna, što pak znači da će se podzemna voda linearno i istom brzinom kretati sa zapada prema istoku. Bušotinski izmjenjivači topline predstavljaju ponore topline u režimu grijanja i linijske izvore topline pri režimu hlađenja neke hale i tako ostvaruju toplinski tok.

Procesni parametri koji ulaze u FeFlow su protoci koji nailaze na svaki bušotinski izmjenjivač posebno te zajednički protok nastao spajanjem svih 13 protoka u jedan. Temperatura kao opisna veličina toplinskog toka za svaki je bušotinski izmjenjivač različita uslijed interferencije i konvektivnog prijenosa topline podzemnom vodom. Dobiveni rezultati mogu se grafički prikazati kao porast temperature pri ulazu u toplinsku pumpu naspram izlaza iz nje, čija je približna srednja vrijednost ona vrijednost koja je svojstvena betonskoj oblozi.

FeFlow računa po principu konačnih elemenata, pri čemu se svaki prostor dijeli u trokute (triangulacija). Trokuti koji zauzimaju određeni mali prostor međusobno su u kontaktu sa stranicama trokuta u kojima vladaju drugi uvjeti, te se kreće s proračunom ustaljenja energetskih tokova između njih. Pri postavljanju potrebno je obratiti pozornost na oblik trokuta,

jer oblici koji najviše odgovaraju jednakostraničnom trokutu najbrže će se modelirati. Nepovoljno optimizirana simulacija iznjedriti će jednakokračne i šiljastokutne trokute, koji će zahtijevati duge vremenske intervale za proračun, dok će oni sami koristiti veoma mali vremenski korak za promjenu parametara trokuta.

Pri svakom vremenskom koraku FeFlow pristupa s utvrđivanjem prethodnih ili početnih parametara. Nakon proračuna međusobnog utjecaja različitih toplinskih tokova dobivena je vrijednost različita od početne. Izračunata vrijednost se pohranjuje te postaje ulazom u sljedeću iteraciju računanja. Program započinje kalkulacije s vrlo malim vremenskim koracima ne bi li utvrdio intenzitet promjene. Ako je sustav optimalno postavljen, ti će vremenski intervali s vremenom rasti i sumom svojih trajanja postići konačno trajanje simulacije. Ovo su principi iterativnog proračuna u modelu s konačnim elementima, koji se koristi pri proračunu utjecaja svojstava jednog djelića tla na drugi.

## 8. ANALIZA SLUČAJA: PRORAČUN GRIJANJA I HLAĐENJA INDUSTRIJSKE HALE

### 8.1. Opis lokacije

Referentna površina hale odabrana je na temelju dostupnih oglasa za iznajmljivanje i temeljem izmjerenih vrijednosti tri postojeće hale na području Donjeg Kraljevca u Međimurskoj županiji. Proračunom srednje aritmetičke vrijednosti proizašlo je da srednja vrijednost površine hala iznosi 2656,2 m<sup>2</sup>. Referentna i proizvoljno odabrana hala će stoga imati površinu od 2500 m<sup>2</sup>. Visina hale također je proizvoljno odabrana te će iznositi 5 m. Pretpostavimo li da je strop ove proizvoljne hale ravan, volumen zraka u njoj možemo izračunati množenjem visine s površinom, pri čemu dobivamo ukupni volumen zraka unutar hale od 12 500 m<sup>3</sup>. Uz ove ulazne podatke, zajedno sa specifičnostima materijala koji gradi njene zidove i izolacijsku envelopu, možemo odrediti koliko iznose toplinske potrebe hale.

### 8.2. Proračun pomoću modela RES2GEO

Kod projektiranja referentne hale, možemo pristupiti odabiru ulaznih podataka za proračun energetske bilance pri čemu će biti ispitano 4 različita scenarija, vidljiva u tablici ispod.

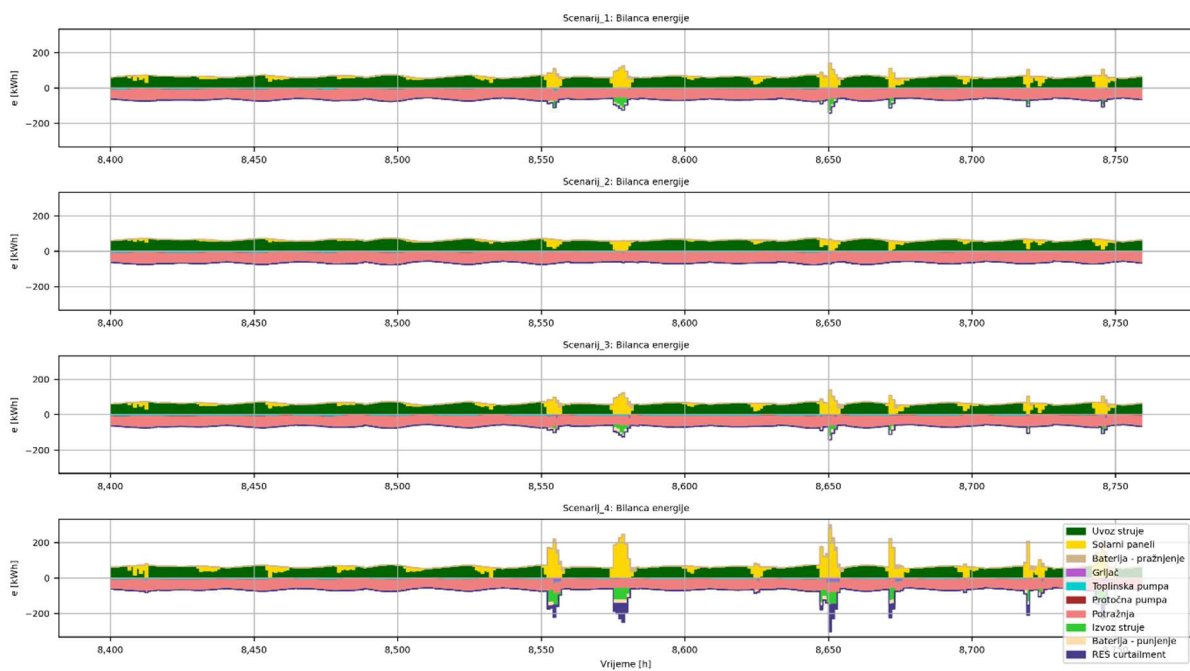
**Tablica 8-1.** Tablični prikaz ispitanih scenarija

<i>Parametar</i>	<i>Mjerna jedinica</i>	<i>scenarij _1</i>	<i>scenarij _2</i>	<i>scenarij _3</i>	<i>scenarij _4</i>
P_PV	kW	200	100	200	400
P_vjetar	kW	0	0	0	0
P_H	kW	50	50	100	100
N_BHE	-	10	10	10	10
P_bat	kW	10	10	20	20
E_bat	kWh	20	20	40	40
P_HP	kW	999	999	999	999
T_R	°C	50	50	50	50

Pokretanjem simulacije računalni program RES2GEO proračunava specifičnosti slučaja poput bilance energije odnosno energetskih tokova, potražnje i potrošnje energije, stanja

napunjenosti baterije i temperature ležišta na godišnjoj razini. Referentni slučaj, kao i svaki sljedeći, računat je s varijablama koje su ispisane u tablici 8-1.

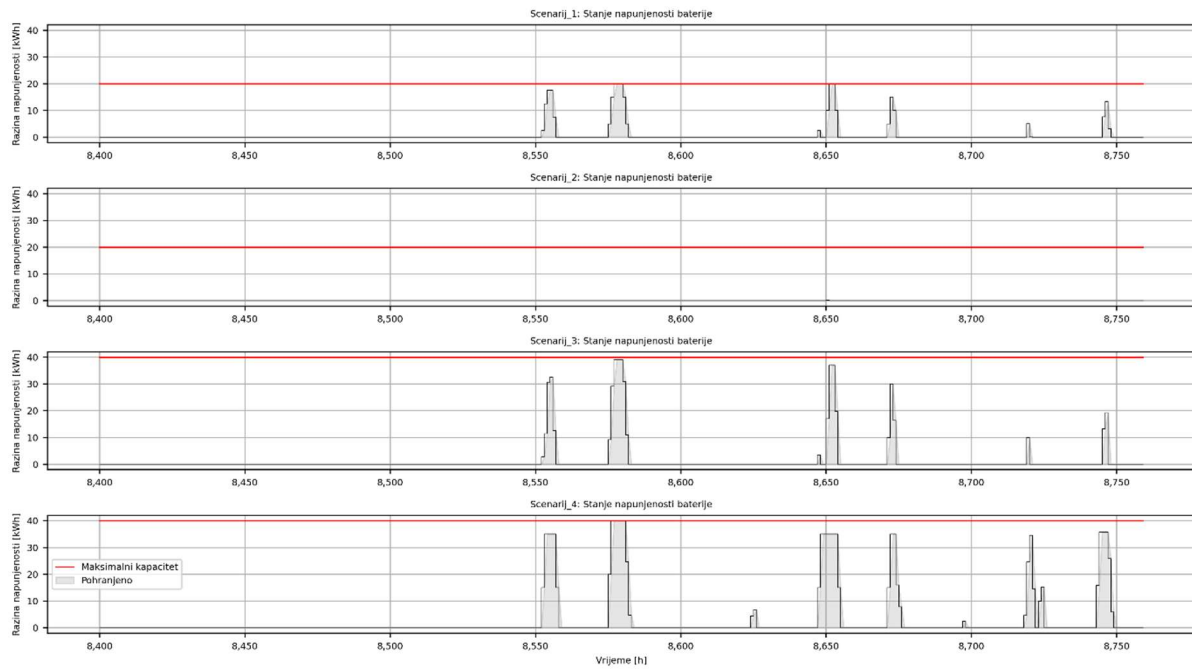
Scenarij 1 referentni je scenarij s instaliranom snagom fotonaponskih panela u iznosu od 200 kW i odnosi se na halu koja se nalazi u Međimurju. Bitno je napomenuti da će, usljed geografskog položaja Međimurske županije u odnosu na neko drugo područje u Republici Hrvatskoj, upadni kut zraka Sunca biti različit za te dvije lokacije. Različit upadni kut za fotonaponske panele znači porast ili pad njihove učinkovitosti pretvorbe fotona u električnu energiju. Pomicanjem od ekvatora u smjeru polova, taj će pad učinkovitosti rasti. U svim scenarijima računato je sa sunčevom energijom koja pada na ravnu plohu koja se nalazi u Međimurju. Ukupna bilanca energije odnosno bilanca energetske tokova za navedenu halu prikazana je na slici 8-1 i odnosi se na vremenski period od 17. do 31. ožujka u režimu grijanja (odnosno 8400. i 8760. sat ako brojanje počinje 31. ožujka u godini)



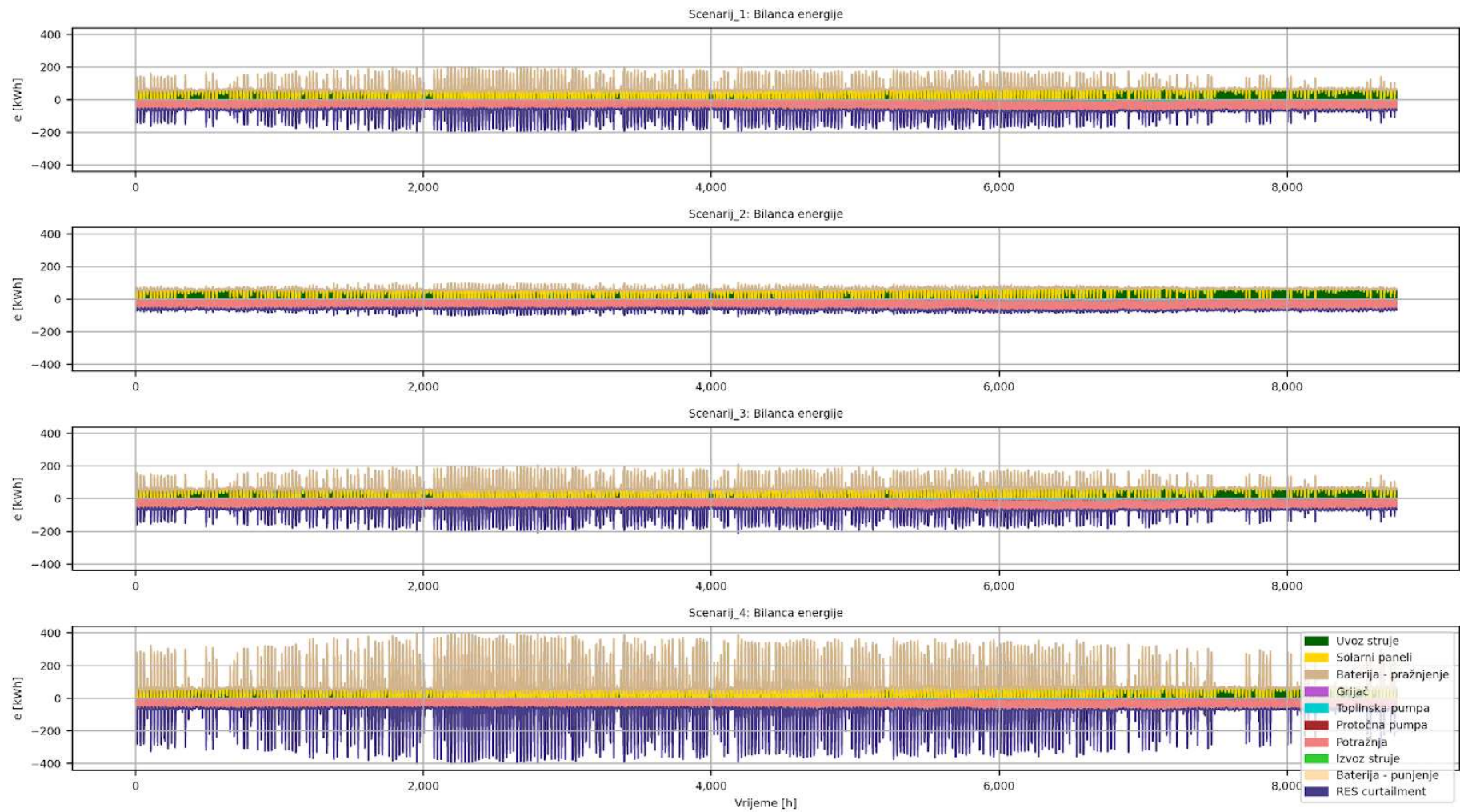
**Slika 8-1.** Prikaz simulirane bilance energije u periodu od 17. do 31. ožujka

U svim scenarijima uvoz energije je podjednak. Ako promotrimo proizvodnju fotonaponskih panela i uvezenu električnu energiju, vidimo da se najviše energije uveze kada se proizvodnja iz fotonaponskih panela smanji. Ovakvu smo situaciju možda mogli izbjeći instalacijom vjetroelektrane. U scenariju 4 vidimo slučaj predimenzioniranja fotonaponskih panela, pri čemu oni proizvode više energije nego što je grijač može konzumirati. Baterija, koja radi u slozi s obnovljivim oblicima energije koji ju pune i grijačem koji ju prazni, odabranog je kapaciteta

od 20 kWh, vrijednosti koja će se uvidom u sljedeći graf s pravom smatrati prevelika (slika 8-2). Za dodatni uvid u energetske tokove prikazana je i energetska bilanca na godišnjoj razini (slika 8-3).



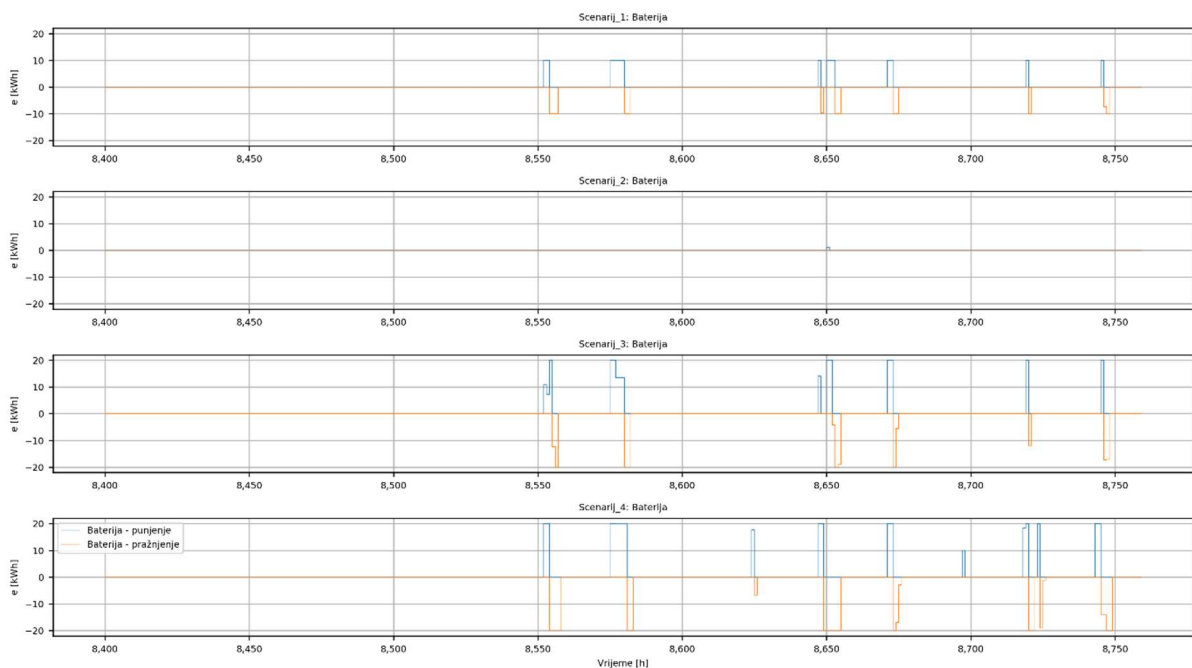
**Slika 8-2.** Prikaz simulirane napunjenosti baterije u periodu od 17. do 31. ožujka



**Slika 8-3.** Bilanca energije za sva četiri slučaja u cijeloj godini

Iz slike 8-2 vidljivo je da se u scenariju 2 baterija puni manje vremena nego u scenariju 1, a kroz godinu ona se vrlo rijetko napuni do polovice svojeg kapaciteta što dokazuje manjkavost instaliranih kapaciteta fotonaponskih panela. scenarij 3 se u odnosu na scenarij 1 bitno manje razlikuje zbog razlike u skali, a najbitnije opažanje jest da se kod scenarija 1 baterija isprazni u gotovo istom režimu kao i kod scenarija 3 što znači da uskladištena energija dobro napaja dvostruko jači grijač. U scenariju 4, sa snagom instaliranih fotonaponskih panela u iznosu od 400 kW, vidljivo je da je kapacitet baterije ujednačenije popunjen za razliku od prethodno promatranih scenarija. Baterija se kod ovog slučaja vrlo rijetko isprazni do svog minimuma.

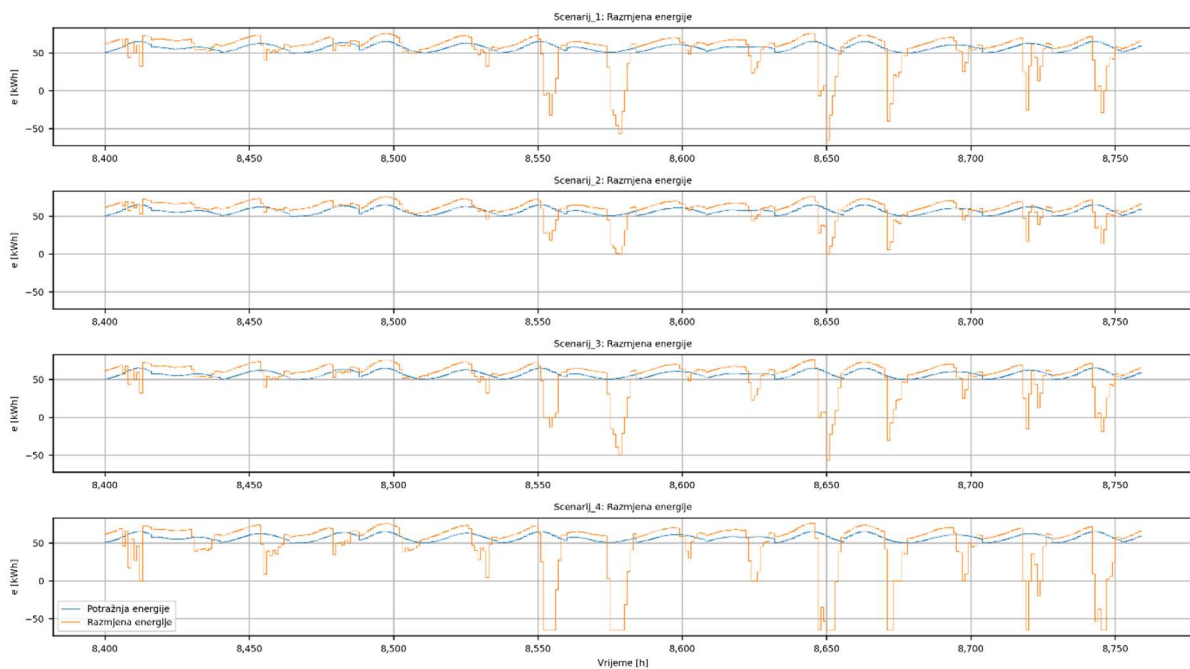
Ciklusi pražnjenja i punjenja baterije usko su vezani s prethodnim grafičkim prikazom, a idealni slučaj bio bi da se baterija naizmjenično puni i prazni, bez pojave stanja u kojem je potpuno prazna (što bi značilo da se cjelokupna količina energije troši iz mreže), ili potpuno puna (što bi pak značilo da električnu energiju porijeklom iz OIE predajemo natrag u mrežu). Grafički prikaz ciklusa punjenja i pražnjenja prikazan je na slici 8-4.



**Slika 8-4.** Prikaz simuliranih rezultata punjenja i pražnjenja baterije

Promotrimo li prethodni graf, zamjećujemo da se minimumi predaje električne energije iz baterije poistovjećuju s njenom potpunom ispražnjenošću. Ukoliko je linija na grafu na svojem maksimumu ili minimumu dulji period vremena i tvori ravni pravac, to znači da baterija predaje svoj maksimum snage kontinuirano prema potrošačima ili se kontinuirano puni. Ukoliko je ravna linija na razini nulte linije na grafičkom prikazu, sva se energija iz nje prethodno potrošila, a potrebe potrošača zadovoljava distribucijska mreža. Baterija bolje ostvaruje svoju funkciju

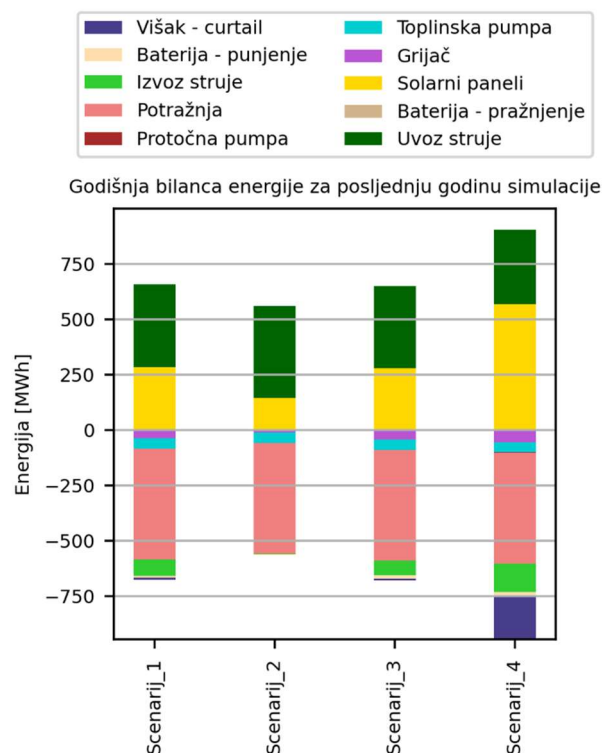
ako radi u zajednici s jačim fotonaponskim panelima nego li slabijim, što izravno ukazuju amplitude skokova i padova na grafu. U scenariju 3, u odnosu na scenarij 1, gotovo da niti nema promjene jer se baterija prazni ili puni na sličan način u oba slučaja, usljed vrlo male razlike u stvarnom kapacitetu baterije koji je iskorišten. Isto se ne može reći i za scenarij 4, koji prikazuje punjenje baterije koje doseže i drži svoj maksimum na duže vremenske intervale u odnosu na bilo koji od prethodnih slučajeva. Kada se baterija napuni do svojeg maksimalnog kapaciteta, sva naknadno proizvedena električna energija predaje se distribucijskoj mreži, čiju krivulju prikazuje sljedeći graf (slika 8-5).



**Slika 8-5.** Prikaz simulirane razmjena energije između baterije i distribucijske mreže

U ovom grafu vidimo da scenarij 1 i scenarij 3 prikazuju veoma slične vrijednosti, što opet potvrđuje tvrdnju da se dvostruko jača baterija dobro slaže s isto toliko jačim grijačem. U scenariju 2 razmjena energije je stabilnija zbog manjeg pohranjivanja energije iz fotonaponskih panela. Potražnja za energijom konstantna je u sva 4 slučaja, a scenarij 4 pokazuje najmanju razmjenu.





**Slika 8-6.** Godišnja bilanca energije za posljednju godinu simulacije

Pogledom na dobivene rezultate godišnje bilance energije za posljednju godinu simulacije, uvelike se ističe velika potražnja za električnom energijom u scenariju 2. Instalacija duplo jačeg grijača u scenariju 3 i scenariju 4 troši istu količinu energije, no kod scenarija 4 ta je energija u potpunosti nadomještena fotonaponskim panelima, dok je u scenariju 3 potrebno kupovati električnu energiju iz mreže. U scenariju 4 dominira proizvodnja električne energije obnovljivim izvorima energije, uslijed instalirane snage koja je za 100 % veća nego kod svih ostalih scenarija. Kod istog slučaja grijač troši neznatno više električne energije.

### 8.3. FeFlow - postavke analize slučaja

Bušotinski izmjenjivač se u FeFlow-u definira pomoću *Well Manager-a* u kojem se postavljaju početni uvjeti, a same bušotine postavljaju se klikom miša uz odabir njihove namjene poput bušotinskog izmjenjivača topline ili zdenca za crpljenje ili utiskivanje vode.

Pri simulaciji u programskom paketu FeFlow bušotinski su izmjenjivači međusobno razmaknuti 5 metara. Svaki bušotinski izmjenjivač započinje na površini ( $z = 0$  m), a završava

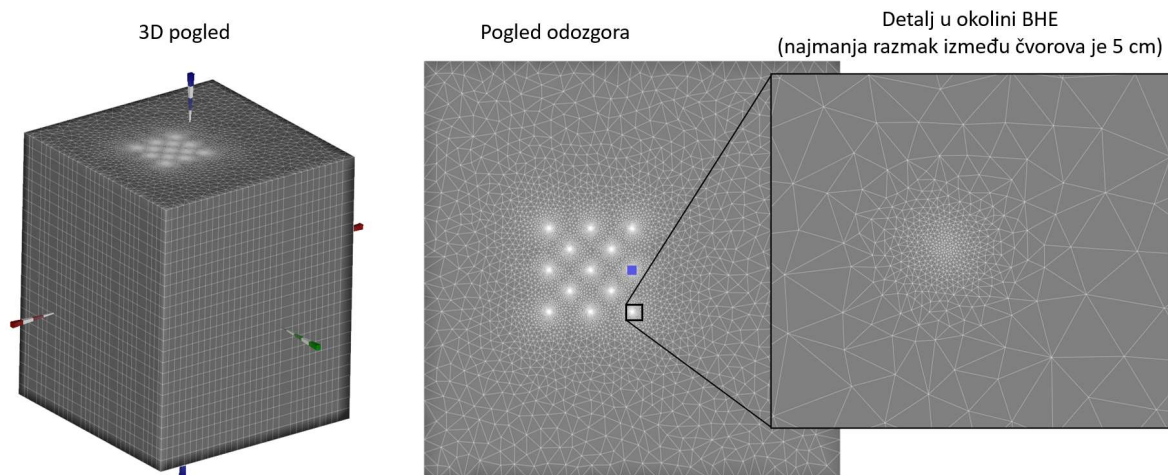
na dubini od 100 metara. Dodatnih 20 metara uzeto je u kao sloj ispod dna bušotinskog izmjenjivača radi kontrole (slika 8-7).

id	Name	X	Y	Z [Top]	Z [Bottom]	Well Type	Rate (Flow)	Radius	Heat BC Value	BHE Dataset
1		30 [m]	40 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
2		40 [m]	40 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
3		50 [m]	40 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
4		30 [m]	50 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
5		40 [m]	50 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
6		50 [m]	50 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
7		30 [m]	60 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
8		40 [m]	60 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
9		50 [m]	60 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
10		35 [m]	45 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
11		45 [m]	45 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
12		35 [m]	55 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1
13		45 [m]	55 [m]	0 [m]	-100 [m]	BHE - Inlet Tem...	0 [m <sup>3</sup> /d]		0 [°C]	BHE Dataset #1

**Slika 8-7.** Postavke pri modeliranju parametara bušotine

Pri modeliranju će se uzeti u obzir i strujanje podzemne vode koje ostvaruje konvektivni prijenos topline u smjeru toka. FeFlow dijeli zadani režanj tla u kontrolne volumene, čija gustoća raste u blizini izmjenjivača radi povećane točnosti. Proračun metodom konačnih elemenata sadrži ispitivanje i simulaciju parametara s ukupno 240 360 kontrolnih volumena (*elements*) koji su u međudjelovanju preko svojih dodirnih površina (slika 8-8).

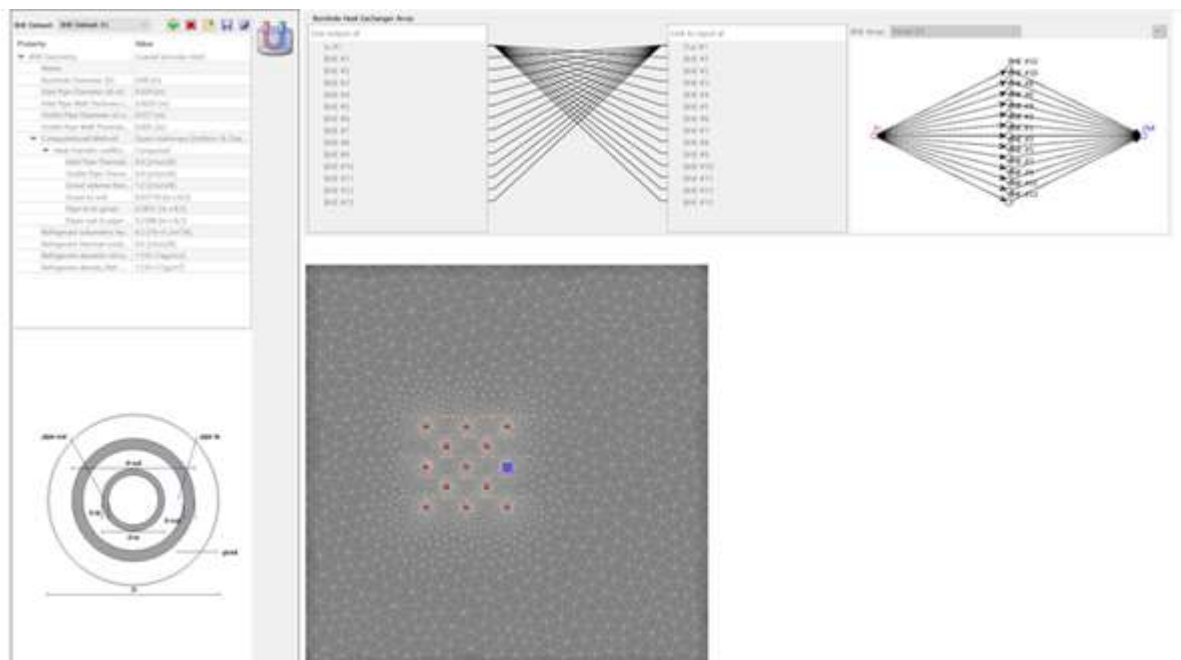
FeFlow omogućava i pogled na trodimenzionalni grafički prikaz režnja tla zadane geometrije. Širina i dužina postavljene su tako da iznose 100 metara, dok dubina do koje se simulira iznosi 120 metara radi povećane točnosti.



**Slika 8-8.** Isječak iz grafičkog prikaza početne geometrije i poligona iz programskog alata FeFlow

U programskom paketu FeFlow bušotinski su izmjenjivači postavljeni u mrežu te ih ima 13. Međusobni razmak između svakog izmjenjivača postavljen je na 5 metara. Odabrani izmjenjivači biti će koaksijalne cijevi gdje je promjer unutarnje cijevi zadan kao 0,029 metara, a promjer vanjske cijevi je 0,057 metara, odnosno 29 i 57 milimetara. Unutarnja cijev biti će namijenjena ulazu radnog fluida, dok je vanjska zadana kao izlazna cijev iz bušotinskog izmjenjivača. Debljina obje cijevi iznosi 0,0029 metara, odnosno 2,9 milimetara, te su izrađene od poliuretana. Promjer same bušotine iznosi 0,08 metara ili 80 milimetara. Koeficijenti provođenja topline zadani su u samom programskom programu FeFlow i oni će se kao takvi koristiti (slika 8-9).

Bušotinski izmjenjivači biti će povezani paralelno, tj. tako da se protok iz centralnog voda dijeli na podjednake količine u svaki od 13 izmjenjivača. Sukladno tome, radni fluid koji je razmijenio toplinu s geotermalnim rezervoarom topline se iz svakog pojedinog izmjenjivača spaja u jedan vod i ulazi u dizalicu topline. Na ovaj način osigurava se podjednako toplinsko opterećenje na svakom od izmjenjivača, te se neproduktivne razmjene topline svode na minimum. Pri serijskom bi spoju radni fluid primio ili predao određenu količinu topline već kroz prvih nekoliko izmjenjivača, te bi naknadni izmjenjivači bili suvišni, ako ne i štetni (slika 8-9).

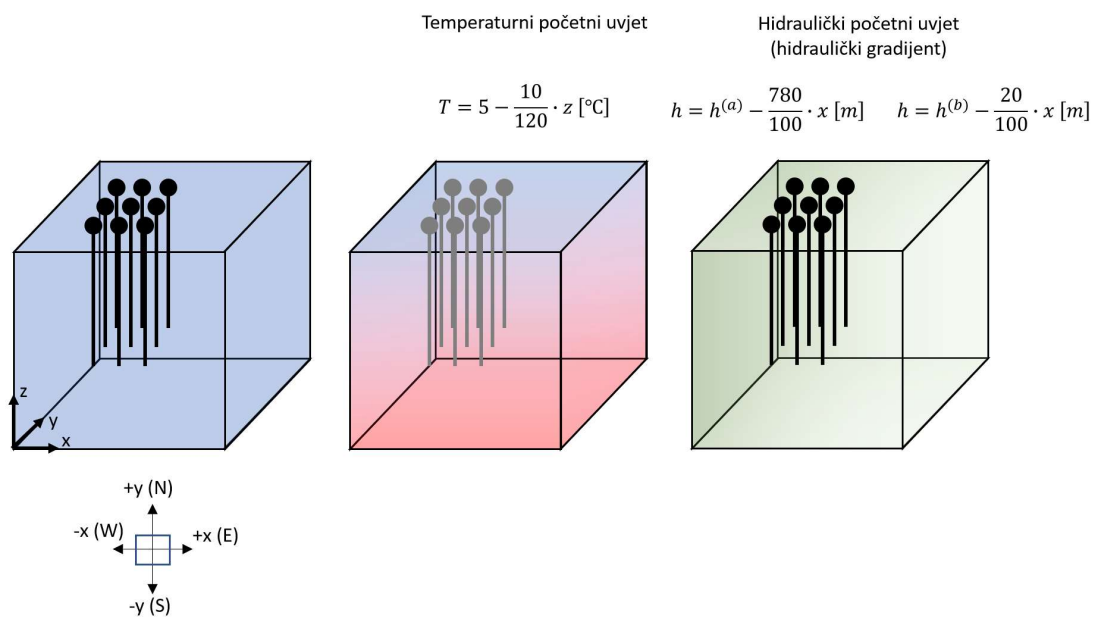


**Slika 8-9.** Postavke geometrije bušotinskog izmjenjivača te njihovo spajanje

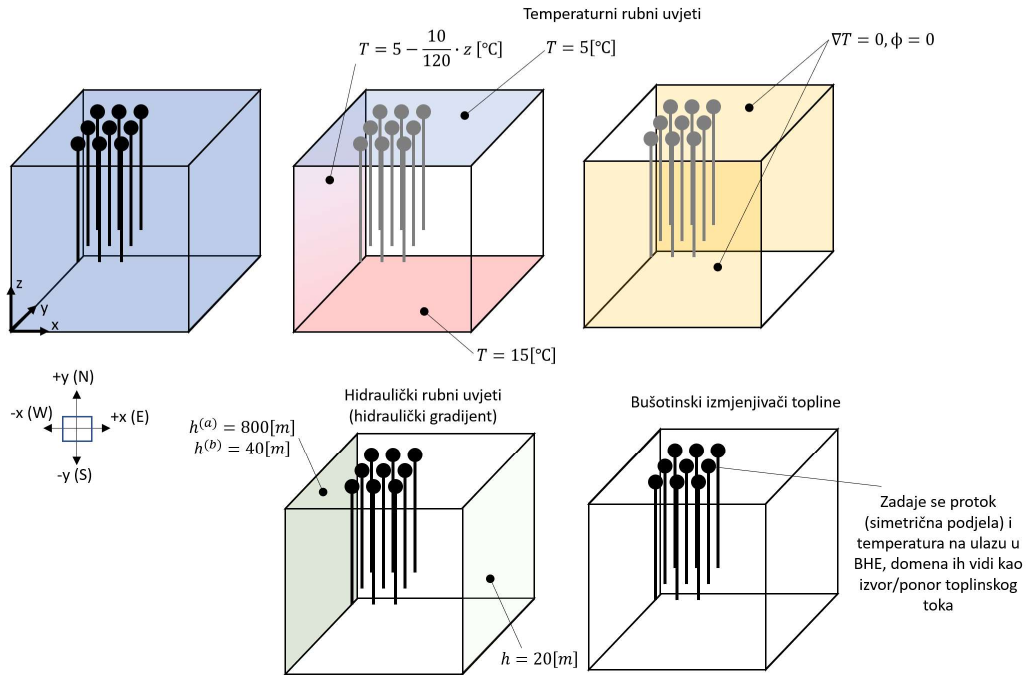
Rubni uvjetni koji se zadaju su:

- Temperatura na ulazu
- Temperatura na izlazu
- Protok radnog fluida
- Temperatura na površini tla
- Temperatura na krajnjoj dubini tla
- Hidraulički gradijent na plohama kroz koje protječe podzemna voda

Grafički prikaz rubnih i početnih uvjeta dan je na slici 8-10 i 8-11.



**Slika 8-10.** Grafički prikaz stanja i početni uvjeti pri modeliranju izmjenjivača



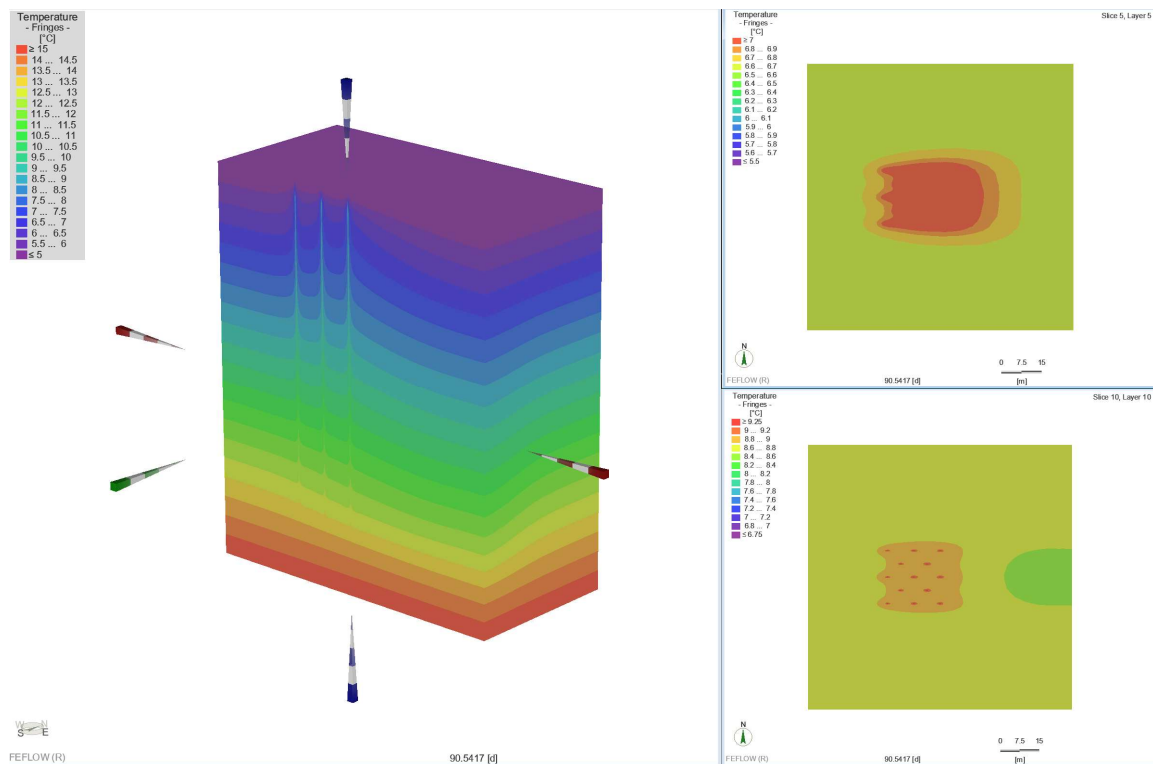
**Slika 8-11.** Grafički prikaz stanja i rubni uvjeti pri modeliranju izmjenjivača

Sama simulacija je pokrenuta u Python-u, pri čemu je površinski dio uravnoteženja energetskih tokova preuzet od modela RES2GEO, dok se ležišni dio simulira u FeFlow-u. U svakom vremenskom trenutku RES2GEO preuzima podatak o izlaznoj temperaturi iz snopa BHE, te postavlja rubni uvjet na ulazu u snop BHE-a u vidu temperature i masenog protoka.

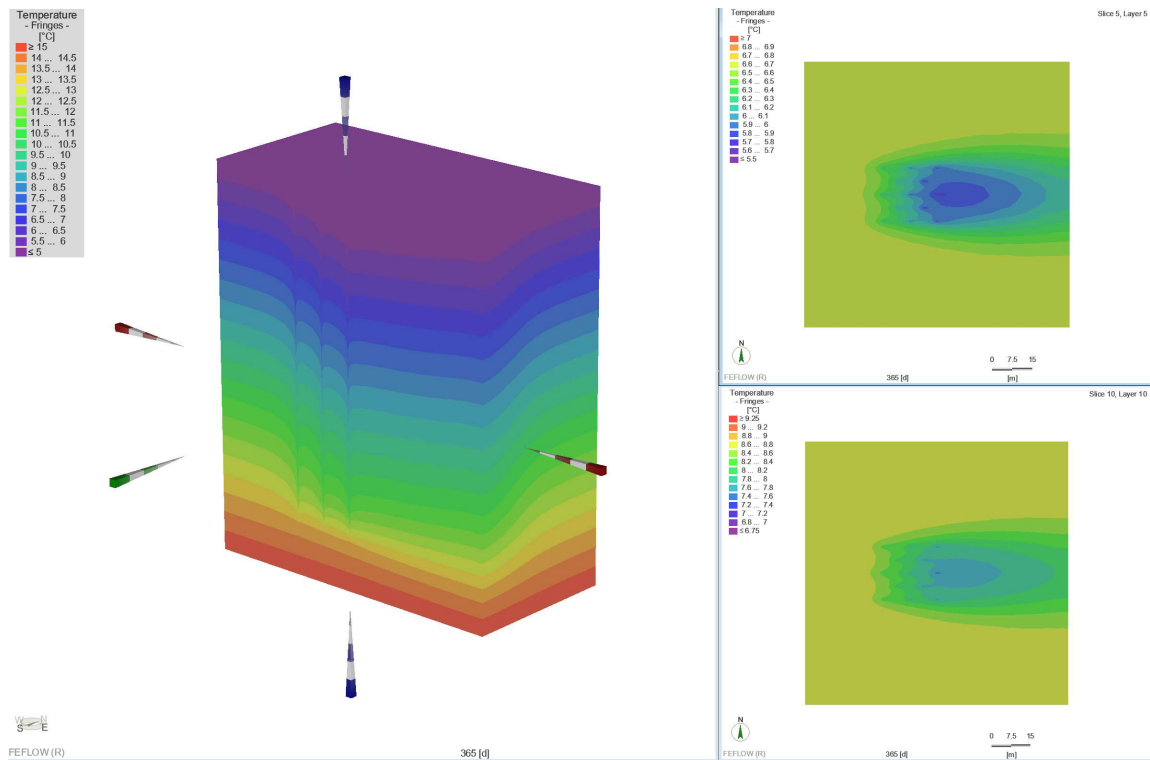
#### 8.4. Rezultati FeFlow simulacije

Kao postavke instaliranih snaga proizvođača i trošila električne energije koristile su se iste one koje vrijede za prvi scenarij u RES2GEO modelu. U programskom paketu FeFlow, model s hidrauličkim potencijalom od 20 metara biti će nazvan „scenarij 1“, dok će onaj s potencijalom od 780 metara biti „scenarij 2“. Prilikom prikazivanja rezultata neće se osvrnuti na čitavu godinu zbog preglednosti rada već će se odabrati specifični periodi u kojima je najintenzivnije grijanje, odnosno hlađenje. U programskom alatu rezultati ispitivanja prikazuju se u obliku izoterme koje označavaju dijelove ležišta koji su iste temperature. Toplinske izohipse koje prikazuju širenje ili ponor toplije fronte dati će dobar uvid u interferenciju između bušotinskih izmjenjivača topline u oba slučaja. Također, možemo prikazati toplinu ležišta i interferenciju bušotina po različitoj dubini.

Prema tome, na slici 8-12 prikazano je toplinsko stanje ležišta za scenarij 1 u trodimenzionalnom prikazu, zajedno s dva poprečna presjeka ležišta po dubini. Prikazani rezultati odnose se na devedeseti i tristo šezdeset peti dan simulacije, odnosno na dan 1. srpanj (slika 8-12) i 31. ožujak (slika 8-13).

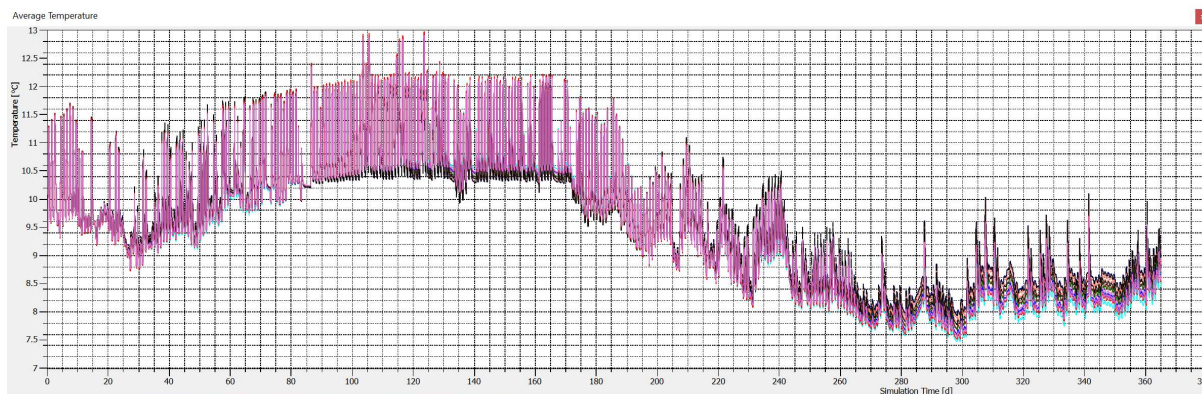


**Slika 8-12.** Stanje ležišta u scenariju 1 na dan 1. srpanj (ljetni period)



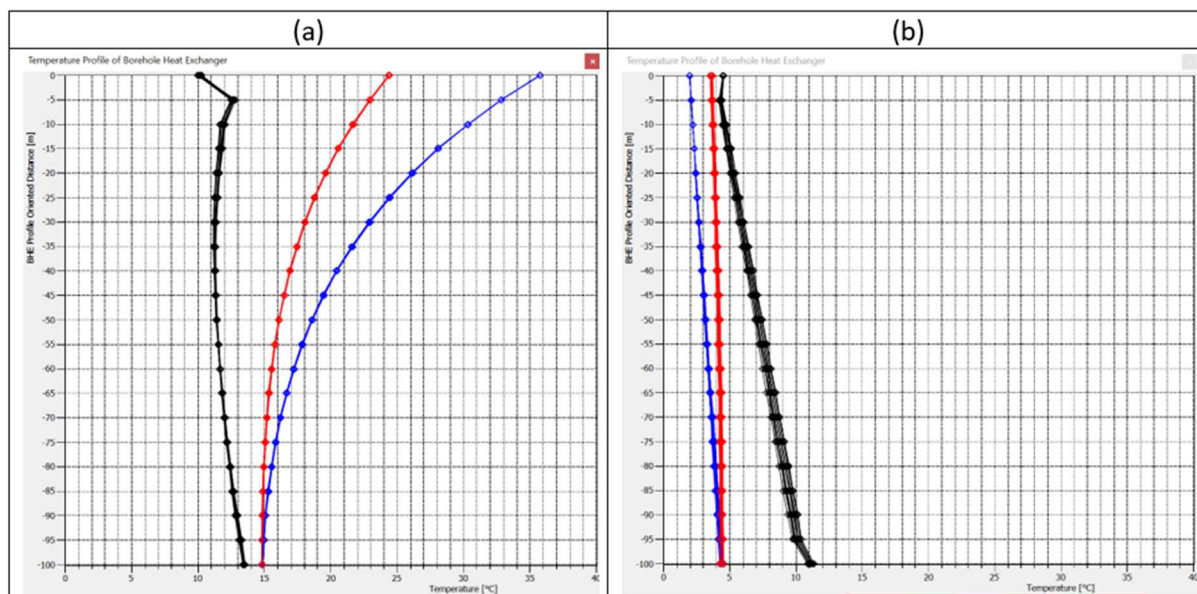
**Slika 8-13.** Stanje ležišta u scenariju 1 na dan 31. ožujak (zimski period)

Iz poprečnih presjeka ležišta vidljiva je značajna toplinska interferencija bušotinskih izmjenjivača topline. Zbog male razlike u hidrauličkim potencijalima podzemna voda se sporije kreće, što znači slabiji konvektivni prijenos topline s izmjenjivača u ležište. Možemo primijetiti i veće pothlađivanje ležišta u plićim slojevima tla. Pri toj dubini radni fluid tek ulazi u interakciju s ležištem, pa su temperaturne razlike veće. Postepenom izmjenom topline između radnog fluida i okoline ta razlika postaje manja, zbog čega se na većoj dubini mogu očekivati ujednačenije temperature ležišta i fluida. Temperatura ležišta se zbog rada dizalice topline mijenja, a zbog male brzine protjecanja podzemne vode ta će promjena biti intenzivnija. Sporiji tok vode znači duže zadržavanje topline blizu mreže bušotinskih izmjenjivača što pak utječe na samu učinkovitost dizalice. Temperatura ležišta za scenarij 1 prikazana je na slici 8-14.



**Slika 8-14.** Temperatura ležišta kroz godinu za scenarij 1

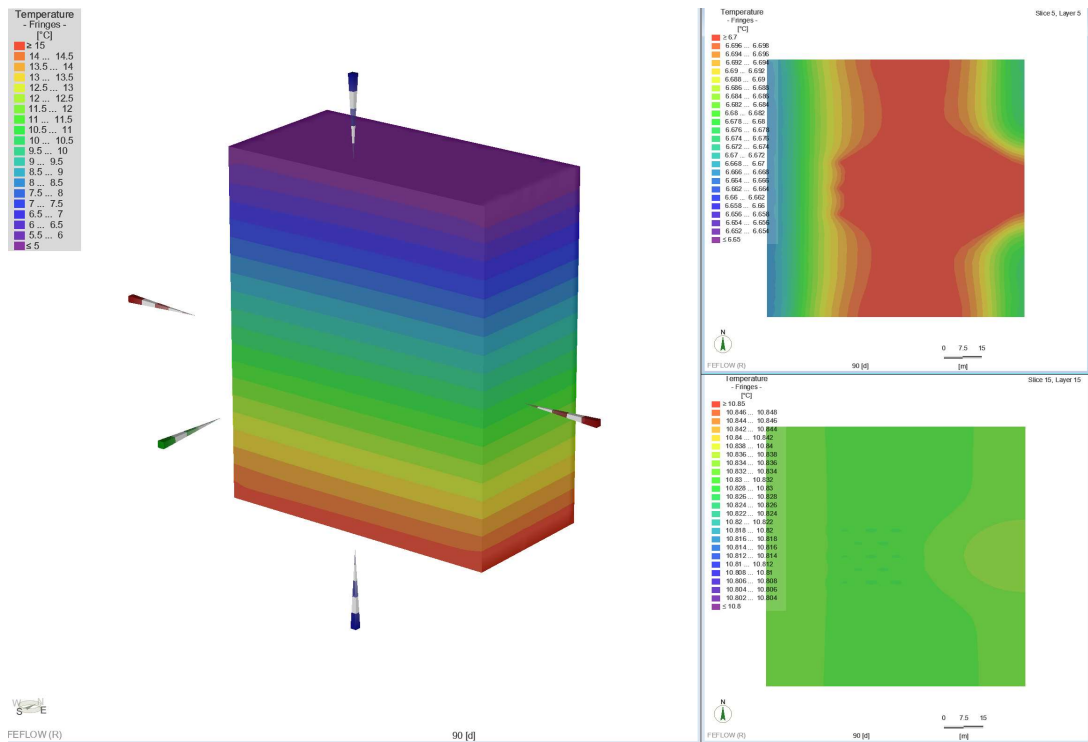
Bušotinski izmjenjivači topline, koji se sastoje od koaksijalnih cijevi, provode fluid kroz centralni ili prstenasti prostor, dok cementacija bušotine obavija oba prostora. Temperaturni profili takvog sustava prikazani su na slici 8-15, pri čemu slika (a) prikazuje stanje na dan 1. srpnja, dok slika (b) prikazuje stanje na dan 31. ožujka. Bitno je pojasniti da crvena linija označava fluid koji ulazi u izmjenjivač, a plava linija prikazuje radni fluid nakon toplinske interakcije s ležištem.



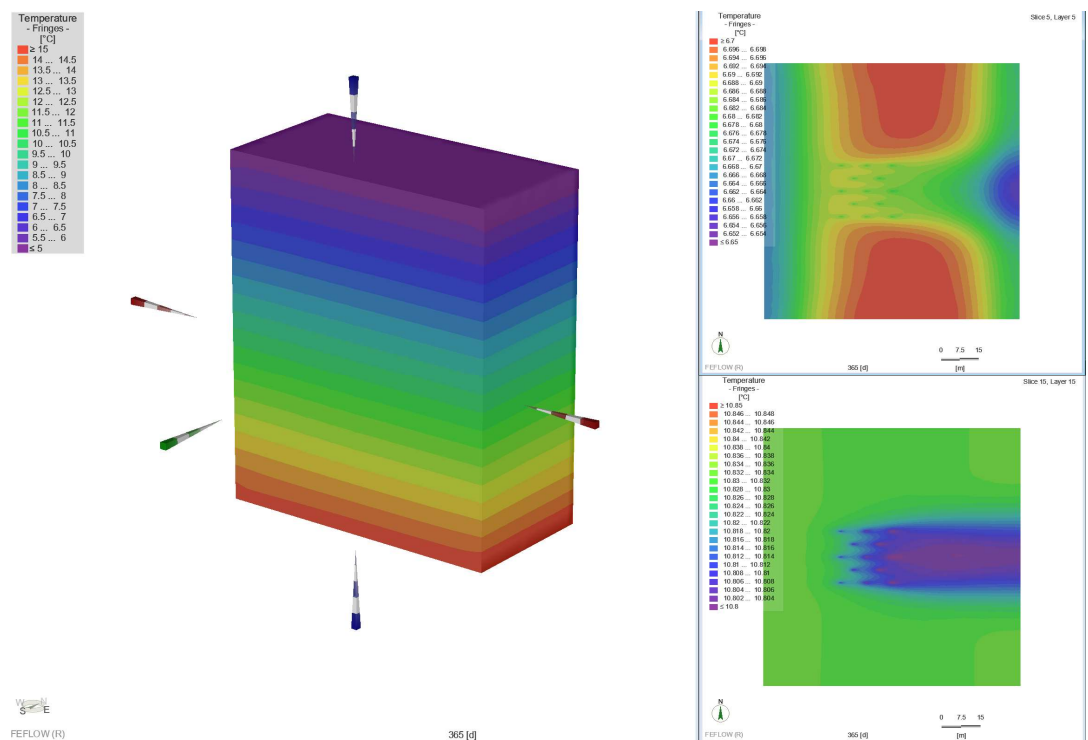
**Slika 8-15.** Temperaturni profili pri strujanju fluida kroz prstenasti i centralni prostor te cementaciju bušotine po dubini ležišta za (a) 90. dan i (b) 365. dan simulacije scenarija 1

Sljedeći ispitani slučaj u odnosu na prethodni ima povećani hidraulički tlak koji se manifestira kroz veću brzinu protjecanja podzemne vode. Sljedeći isti princip kao u prethodnom slučaju, prikazati će se stanje na dan 1. srpanj, odnosno u režimu hlađenja objekta na slici 8-16, a stanje u režimu grijanja objekta na slici 8-17.





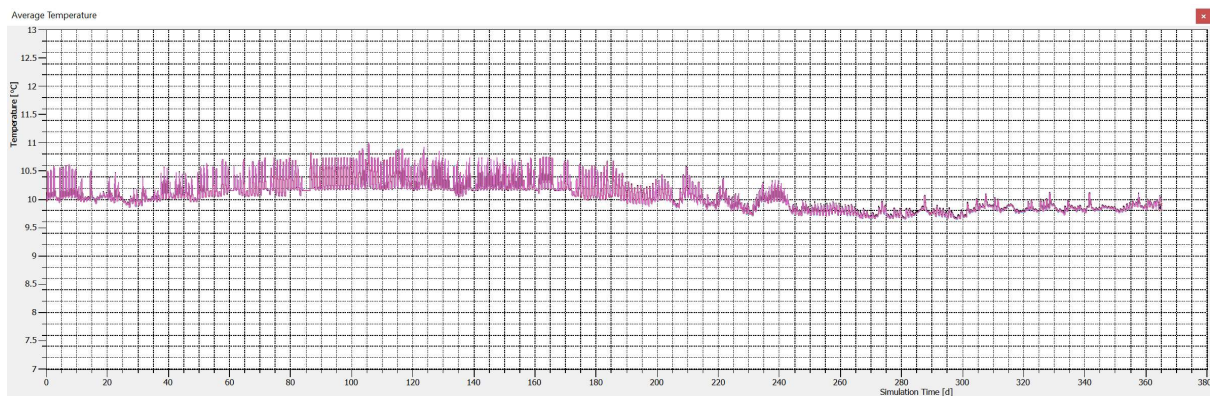
Slika 8-16. Stanje ležišta u scenariju 2 na dan 1. srpanj (ljetni period)



Slika 8-17. Stanje ležišta u scenariju 2 na dan 31. ožujak (zimski period)

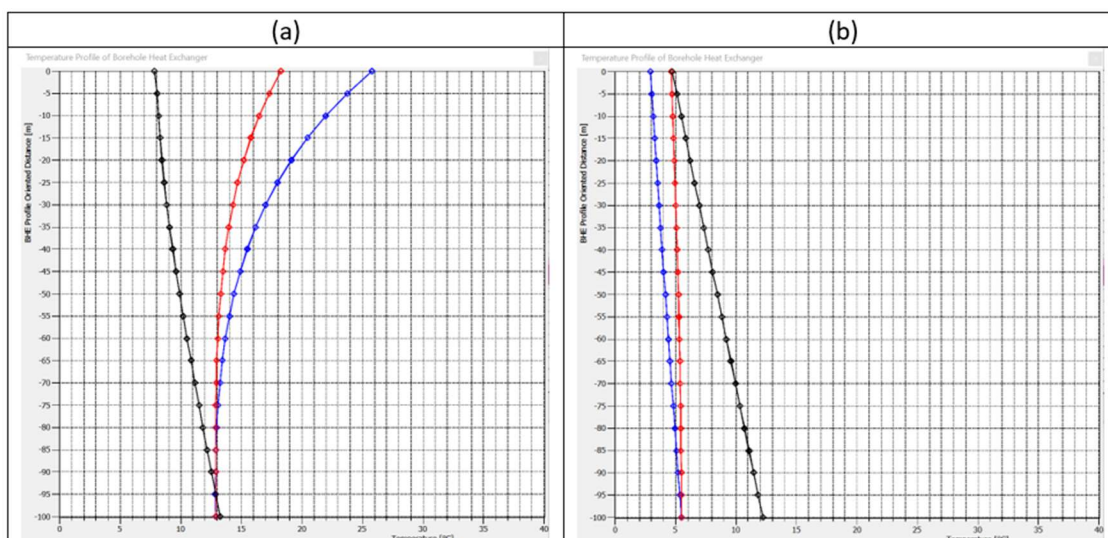
Iako se na grafičkom prikazu ovog slučaja pojavljuju intenzivnije boje nego u prethodnom, sama temperaturna podjela je ovdje sitnija, što znači da u odnosu na prethodni slučaj svaka boja označava manju temperaturnu razliku. Ovaj slučaj zapravo prikazuje manju toplinsku interferenciju između pojedinih izmjenjivača zbog veće konvekcije. Iz donjeg poprečnog presjeka vidljivo je manja promjena koja označava temperaturnu razliku fluida i ležišta.

Temperatura ležišta se u ovom slučaju mijenja manje nego u prethodnom. Slučaj s većim hidrauličkim potencijalom, a samim tim i većom brzinom protjecanja fluida, pokazuje veću toplinsku inerciju ležišta, što je pogodno. Velike promjene u temperaturi ležišta nisu dobre za rad dizalice topline jer će ona s vremenom pothladiti, odnosno pregrijati ležište. Grafički prikaz temperature ležišta prikazan je na slici 8-18.



**Slika 8-18.** Temperatura ležišta kroz godinu za scenarij 2

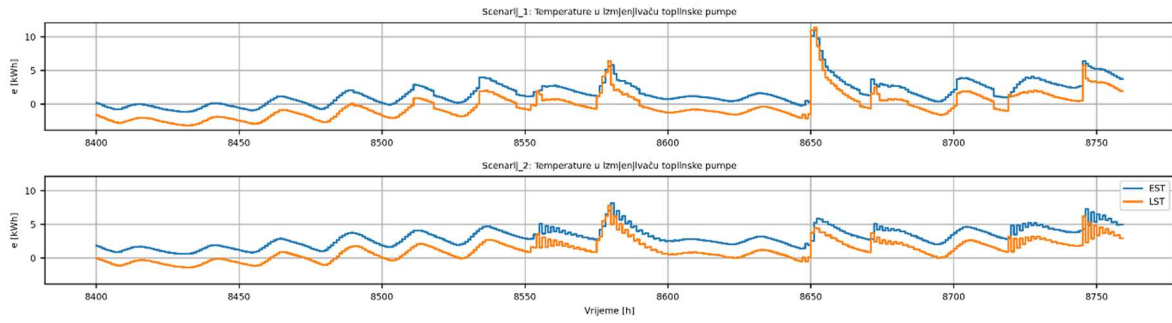
Temperature radnog fluida pri ulazu i izlazu iz bušotinskog izmjenjivača biti će manje u odnosu na prethodni slučaj. Radni fluid se intenzivnije hladi tokom ljetnih mjeseci, a postiže nižu temperaturu nego u slučaju s manjim protjecanjem podzemne vode. Toplina se s izmjenjivača bolje odnosi ili donosi, zbog čega su razlike u temperaturi ulaza i izlaza manje (slika 8-19).



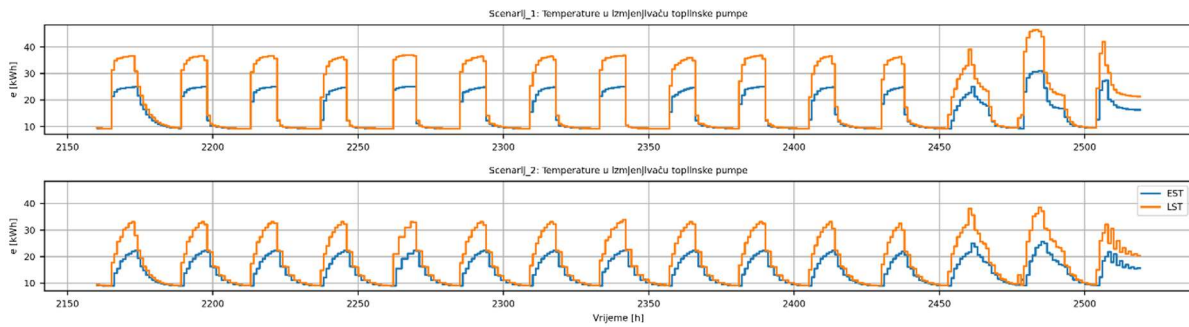
**Slika 8-19.** Temperaturni profili pri strujanju fluida kroz prstenasti i centralni prostor te cementaciju bušotine po dubini ležišta za (a) 90. dan i (b) 365. dan simulacije scenarija 2

### 8.5. Zajednički rezultati modela RES2GEO I FeFlow

Na temelju rezultata dobivenih programskim paketom FeFlow može se ispitati učinkovitost cjelokupnog sustava kojeg smo zadali u modelu RES2GEO. FeFlow prikazuje promjenu temperature radnog fluida po dubini (slika 8-15 i 8-19), no on sam po sebi ne prikazuje temperaturu u izmjenjivaču kroz neki promatrani period. Sukladno tome, u modelu RES2GEO zadajemo početni i krajnji vremenski interval u kojem nas zanimaju temperature radnog fluida (slika 8-20 i 8-21). Vremenski interval ispitivanja će biti 15 dana, a u primjeru ljetnog režima rada dizalice zadajemo da dan početka prikaza bude 1. srpanj a dan kraja 15. srpanj (2160. i 2520. sat u godini). U zimskom načinu rada ispitujemo vremenski period od 17. do 31. ožujka odnosno 8400. i 8760. sat u godini.

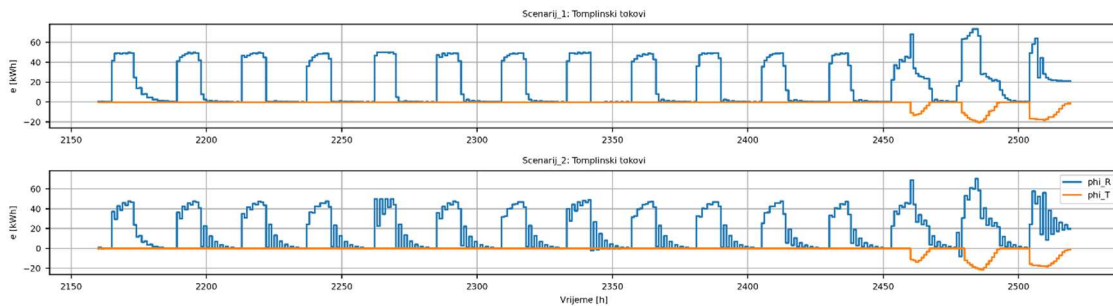


**Slika 8-20.** Temperatura u izmjenjivaču u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

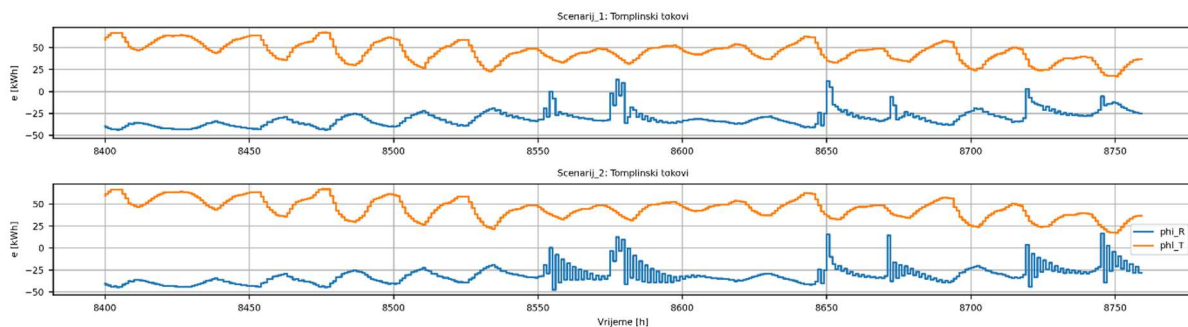


**Slika 8-21.** Temperatura u izmjenjivaču u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

U sljedećem grafičkom prikazu promotriti ćemo toplinske tokove između bušotinskih izmjenjivača topline i ležišta. Iz slike 8-22, koja se odnosi na ljetni period, vidljivo je da se pri većem hidrauličkom potencijalu toplina predaje postepeno (slika 8-22 dolje), dok se pri manjem potencijalu izmjenjivač naglo zagrije, a toplina se veoma sporo disipira u ležište, što uzrokuje toplinski oblak koji se zadržava oko izmjenjivača. U režimu grijanja objekta (slika 8-23) također se vidi isti efekt.

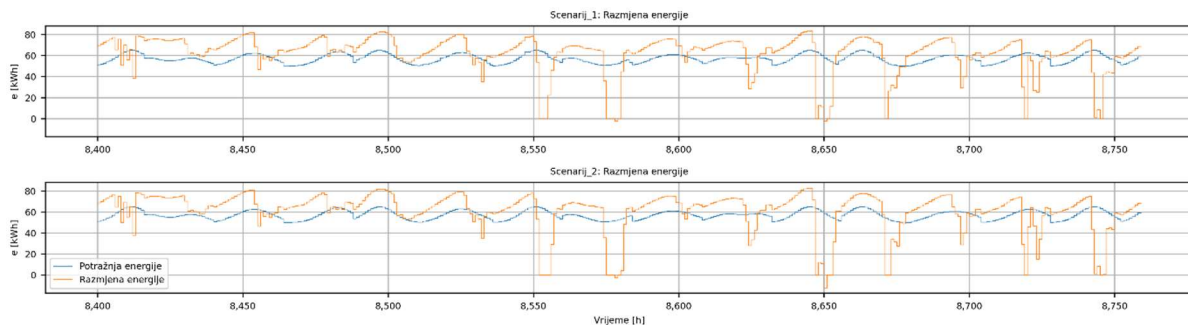


**Slika 8-22.** Toplinski tokovi u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

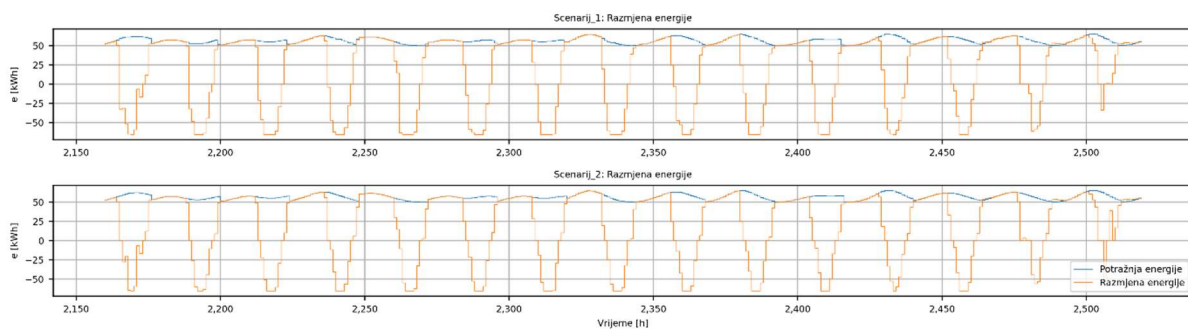


**Slika 8-23.** Toplinski tokovi u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

Dizalica topline i njezin rad opskrbljuje se električnom energijom iz fotonaponskih panela, a višak proizvedene energije se pohranjuje u bateriju. Ukoliko se baterija u potpunosti isprazni, što je velika mogućnost za vrijeme zimskih mjeseci, energija se uzima iz mreže. Grafički prikaz takve razmjene nalazi se na slici 8-24 i 8-25.

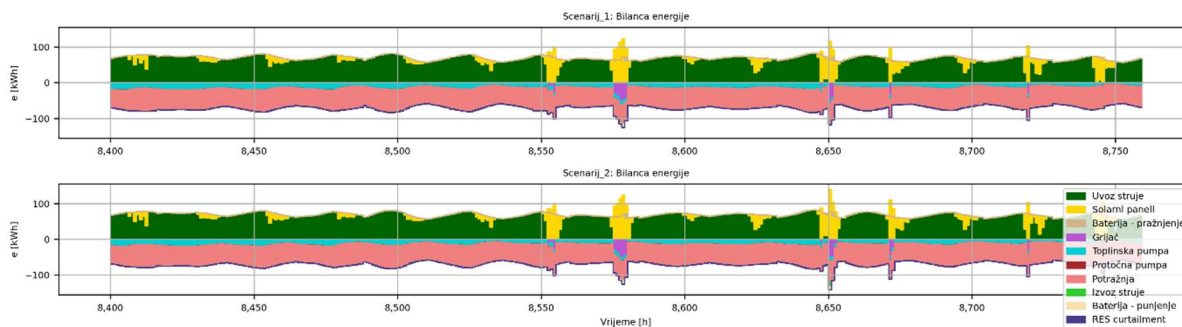


**Slika 8-24.** Razmjena energije u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

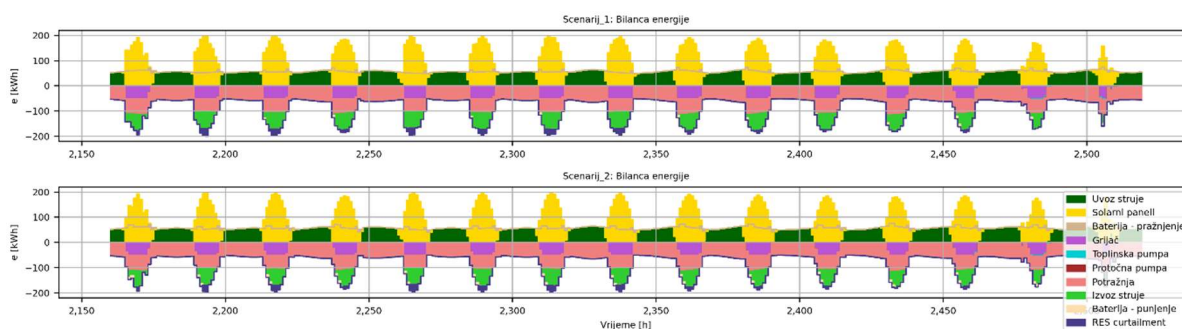


**Slika 8-25.** Razmjena energije u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

Naposljetku možemo promotriti bilancu energije za oba scenarija i u oba promatrana vremenska intervala. Slika 8-26 se odnosi na bilancu za vrijeme grijanja objekta te se vidi značajno veći uvoz električne energije iz distribucijske mreže. Na slici 8-27 taj je uvoz daleko manji, a nadomještava ga proizvodnja fotonaponskih panela, što je izravna posljedica dužih ljetnih dana, više sunčanih sati, a i boljim upadnim kutom svjetlosti.

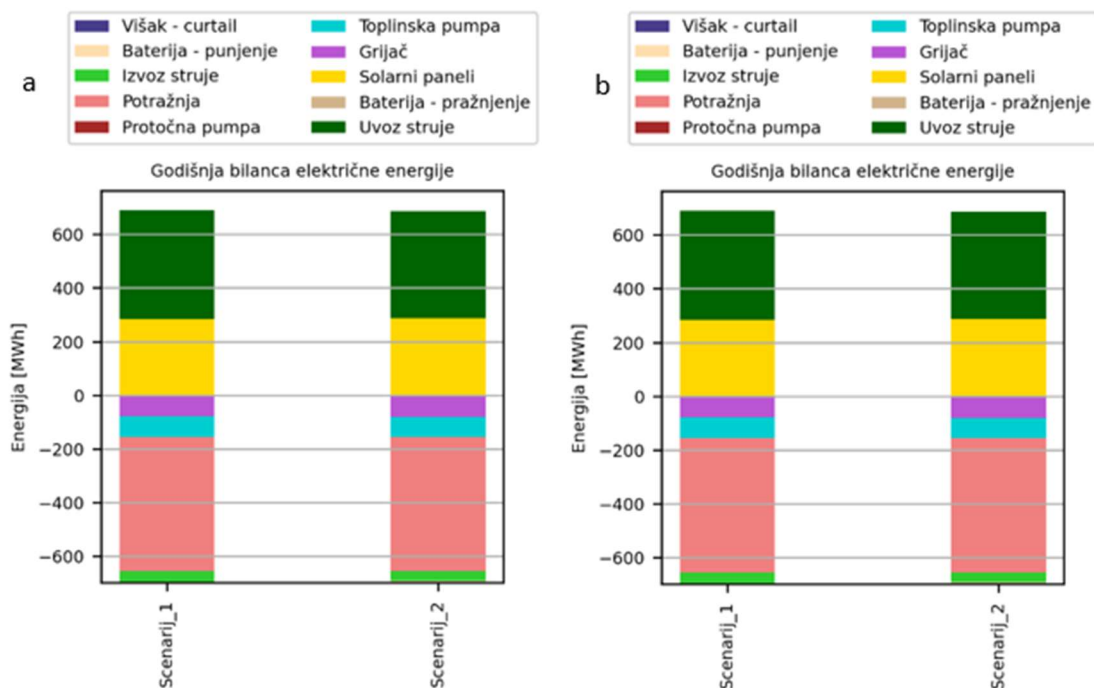


Slika 8-26. Bilanca energije u režimu hlađenja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)



Slika 8-27. Bilanca energije u režimu grijanja, za scenarij 1 (gore) i 2 (dolje)

Za svaki scenarij još možemo promotriti bilancu električne energije na godišnjoj razini (slika 8-28).



Slika 8-28. Godišnja bilanca električne energije za (a) režim hlađenja i (b) režim grijanja

## 9. ZAKLJUČAK

Grijanje i hlađenje industrijske hale na području Hrvatskog djela Panonskog bazena posjeduje nedovoljno iskorišten, no veliki potencijal. Analizom trenutnog stanja energetskog sektora i potrošnje energenata pokazana je mogućnost kojom bi se troškovi režija, ali i emisije ugljičnog dioksida iz poduzetničkog sektora mogle smanjiti. Uvjeti koji vladaju na spomenutom prostoru pogodniji su nego li u ostatku Hrvatske, što se dokazalo simulacijom rada dizalice topline. Sukus cjelokupnog rada jest da se ambicije Republike Hrvatske ka klimatskoj neutralnosti uvelike mogu oplemeniti primjenom dizalica topline s plitkim geotermalnim izvorima topline.

Ovim diplomskim radom također je ispitivana i mogućnost primjene modela RES2GEO u simbiozi s programskim paketom FeFlow. Modelom RES2GEO dobili smo uvid u rad same dizalice topline i uređaja koji s njom rade u slozi, dok je FeFlow dao rezultate za podzemlje i ponašanje plitkog geotermalnog ležišta. Kombiniranjem dvaju programskih alata dobiveni su rezultati koji prikazuju godišnju bilancu energije, toplinske tokove i parametre geotermalnog ležišta koji su točniji od sume njihovih zasebnih mogućnosti. Ovim radom dokazano je slaganje programskog paketa FeFlow i modela RES2GEO.

Još jedan zaključak koji proizlazi iz rada je izuzetna bitnost konvektivnog prijenosa topline u slučaju protjecanja podzemne vode, što je posebice vidljivo iz primjene programskog paketa FeFlow. Konvekcija u podzemnom vodonosnom sloju drastično utječe na parametre izmjene topline, pogotovo u smislu pregrijavanja i pothlađivanja ležišta.

## 10. POPIS LITERATURE

1. Banjad Pečur, I.; Skazlić, M., 2022., Mikroarmirani beton MS, prezentacija s predavanja kolegija Posebni betoni i tehnologije, Građevinski fakultet, Zagreb, Hrvatska
2. Budin, R.; Mihelić-Bogdanić, A., 2012., Osnove tehničke Termodinamike, treće izdanje, Zagreb
3. Energetski Institut Hrvoje Požar, 2020., Energija u Hrvatskoj – Godišnji energetski pregled, pregled, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zagreb
4. Hawlander, M.N.A, Mansur, M.A., Rahman, M., 1990., Thermal behaviour of ferrocement, istraživački rad, Journal of Ferrocement, Vol. 20 (3), str. 231-239.
5. Hrvatski geološki institut, 2009., Ocjena stanja i rizika podzemnih voda u Panonskom dijelu Republike Hrvatske, projekt naručitelja Hrvatske vode, Zagreb, Hrvatska
6. Kurevija, T., 2010., Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske, doktorski rad, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb, Hrvatska
7. Lie, T. T.; Kodur, V.K. R., 1995., Thermal properties of fibre-reinforced concrete at elevated temperatures, istraživački rad, National Research Council Canada, Institute for Research in Contruction, Kanada
8. Michalski, A., Klitzsch, N., 2018., Temperature sensor module for groundwater flow detection around borehole heat exchangers, istraživački rad, Geotherm energy 6, 15, Springer, Njemačka
9. Paić, M., 1994., Toplina, termodinamika, energija, udžbenik, Školska knjiga, Zagreb, Hrvatska
10. Perković, L., Leko, D., Lekić Brettschneider, A., Mikulčić, H., Varbanov, P.S., 2011., Integration of Photovoltaic Electricity with Shallow Geothermal Systems for Residential



Microgrids; Proof of Concept and Echno-Economic Analysis with RES2GEO Model, Energies, 14

11. Shah, S., Balaguru, P.N., 1984., Ferrocement, New reinf concr, Vol. 2, str. 1-51.
12. Silwa, T., Kowalski, T., Stryczek, S., 2017., The impact of graphite on the thermal conductivity of solidified grout, članak u AGH Drilling Oil Gas, Krakow, Poljska
13. Tinti, F., Mastrocicco, M., Glambastiani, B.M.S., 2014., Types of geo-exchanger systems for underground heat extraction, istraživački rad, University of Bologna, Italija
14. Xu, Y.; Chung, D.D.L., 2000., Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures, istraživački rad, Cement and concrete research 30, str 1175-1178, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Buffalo, NY

Web izvori:

15. Energetski Institut Hrvoje Požar, 2013., Potencijal obnovljivih izvora energije u Međimurskoj županiji, URL: <https://door.hr/> (15.12.2022.)
16. Ministarstvo Prostornog Uređenja, Graditeljstva I Državne Imovine, 2010., *Zgrade gotovo nulte energije nZEB*, URL: <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/> (10.12.2022.)
17. European Commission, 2022., *Photovoltaic Geographical Information System*, URL: <https://re.jrc.ec.europa.eu/> (15.11.2022.)
18. MIKE Powered by DHI, 2022., *FeFlow 8.1*, URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/> (5.1.2023.)
19. MIKE Powered by DHI, 2022., *FeFlow 8.0 Documentation*, URL: <http://www.feflow.info/> (5.1.2023.)