

Tehno-ekonomska analiza mikromreže s plitkim geotermalnim izvorima topline pomoću modela RES2GEO

Leko, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:485535>

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 naftnog rudarstva

**TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MIKROMREŽE S
PLITKIM GEOTERMALNIM IZVORIMA TOPLINE
POMOĆU MODELA RES2GEO**

Diplomski rad

Domagoj Leko

N304

Zagreb, 2020.

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MIKROMREŽE S PLITKIM GEOTERMALNIM
IZVORIMA TOPLINE POMOĆU MODELA RES2GEO

DOMAGOJ LEKO

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

Sažetak

U cilju smanjenja mjesečnih računa za energiju te ispuštanja stakleničkih plinova u atmosferu izgaranjem prirodnog plina za potrebe grijanja, napravljena je tehno-ekonomska analiza centralnog uličnog toplinskog sustava s geotermalnom dizalicom topline, s fotonaponskim panelima za proizvodnju električne energije i baterijom za njeno skladištenje. Godišnja potrošnja električne energije i prirodnog plina ulice dobivena je pomoću ankete. Energetski tokovi različitih sustava izračunati su pomoću RES2GEO Python modela, dok su neto sadašnje vrijednosti i povrati investicije izračunati u Microsoft Excelu. Od 40 sustava, izabran je onaj najisplativiji, te su prikazani njegov novčani tok, energetski tokovi te je napravljena analiza osjetljivosti na iznose kapitalne investicije, promjenu cijene energenata i udio poticaja u projektu.

Ključne riječi: dizalica topline, energija, investicija, neto sadašnja vrijednost, povrat investicije, fotonaponski paneli

Diplomski rad sadrži: 48 stranica, 9 tablica, 34 slike i 36 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF
2. Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF
3. Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redoviti profesor RGNF

Datum i mjesto obrane: 27.11.2020, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF A MICROGRID WITH SHALLOW
GEOTHERMAL HEAT SOURCES USING THE RES2GEO MODEL

DOMAGOJ LEKO

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

Abstract

In order to reduce the monthly energy bills and greenhouse gas emissions produced by burning natural gas for heating purposes, a techno-economic analysis of the central street heating system with a geothermal heat pump was made, combined with photovoltaic panels for electricity production and a battery system for its storage. The annual electricity and natural gas consumption of the street was obtained using a survey. The energy flows of different systems were calculated using the RES2GEO Python model, while the net present values and returns on investment were calculated using Microsoft Excel. Out of 40 systems, the most cost-effective one was chosen, and its cash flow and energy flows were presented. Also, sensitivity analysis relating to the expenses of capital investment, change in energy prices and the share of incentives in the project was made.

Keywords: heat pump, energy, investment, net present value, return on investment, photovoltaic panels

Thesis contains: 48 pages, 9 tables, 34 figures and 36 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Luka Perković, PhD
2. Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD
3. Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date and place of defense: 27.11.2020, Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| I. POPIS SLIKA | I |
| II. POPIS TABLICA | III |
| III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ANALIZA POTROŠNJE | 3 |
| 3. METODA IZRAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U VIŠEGODIŠNJOJ SIMULACIJI ENERGETSKOG SUSTAVA | 7 |
| 3.1. FOTONAPONSKI PANELI | 9 |
| 3.2. GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE | 11 |
| 3.3. LEŽIŠTE | 15 |
| 3.3.1. Izvori termogeoloških podataka | 16 |
| 3.3.2. Simulacija protoka topline u podzemnom sustavu | 19 |
| 3.4. BATERIJA | 21 |
| 3.4.1. Li-ion baterije | 21 |
| 3.4.2. Na-ion baterije | 22 |
| 3.5. OSTALE KOMPONENTE SUSTAVA | 23 |
| 3.5.1. Centrifugalne pumpe | 23 |
| 3.5.2. Električni protočni grijač | 23 |
| 3.6. TABLIČNI PRIKAZI ULAZNIH SNAGA I KAPACITETA U SIMULACIJE.... | 24 |
| 4. FINACIJSKA ANALIZA | 27 |
| 4.1. NETO SADAŠNJA VRIJEDNOST | 27 |
| 4.1.1. Mane neto sadašnje vrijednosti i njene alternative | 27 |
| 4.2. INTERNA STOPA POVRATA | 28 |
| 4.3. KAPITALNI TROŠKOVI I OPERATIVNI TROŠKOVI | 29 |
| 5. REZULTATI MODELIRANJA ENERGETSKIH TOKOVA | 31 |
| 6. REZULTATI FINACIJSKE ANALIZE I ANALIZE OSJETLJIVOSTI | 37 |
| 6.1. FINACIJSKE ANALIZE OSJETLJIVOSTI | 40 |
| 7. ZAKLJUČAK | 44 |
| 8. POPIS LITERATURE | 45 |

I. POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1-1. Skica mikromreže | 2 |
| Slika 2-1. Prikaz ulice iz zraka | 3 |
| Slika 2-2. Anketa | 4 |
| Slika 2-3. Mjesečne potrošnje plina i električne energije..... | 6 |
| Slika 3-1. Načelna shema sveukupnih energetske tokova električne i toplinske energije u modelu RES2GEO..... | 7 |
| Slika 3-2. Detaljan prikaz energetske tokova toplinske pumpe, grijača i ležišta za režime grijanja i hlađenja | 8 |
| Slika 3-3. Fotonaponska ćelija | 9 |
| Slika 3-4. Pojednostavljeni prikaz rada invertera..... | 10 |
| Slika 3-5. Prosječna mjesečna proizvodnja iz 1 kW | 11 |
| Slika 3-6. Mjerene srednje mjesečne temperature tla do 100 cm i izračunate vrijednosti prigušivanja temperature tla u zavisnosti o promjeni dubine za lokaciju Zagreb - Maksimir | 11 |
| Slika 3-7. Tipovi izmjenjivača topline | 12 |
| Slika 3-8. Princip rada dizalice topline u fazi grijanja | 12 |
| Slika 3-9. Ekspanzijski ventil | 13 |
| Slika 3-10. Shematski prikaz rada ekspanzijskog ventila..... | 13 |
| Slika 3-11. Reverzibilni ventil..... | 14 |
| Slika 3-12. Konstrukcija bušotine | 15 |
| Slika 3-13 Shematski prikaz sustava za izvođenje testa toplinskog odaziva | 18 |
| Slika 3-14. Poprečni presjek bušotine i prikaz kretanja toplinskih tokova kroz različite dijelove podzemnog sustava..... | 20 |
| Slika 3-16. Pražnjenje (lijevo) i punjenje (desno) baterije | 21 |
| Slika 3-17. Punjenje (lijevo) i pražnjenje (desno) Na-ion baterije | 22 |
| Slika 3-18. Centrifugalna pumpa..... | 23 |
| Slika 5-1. Ovisnost uvoza i izvoza električne energije o kapacitetu baterije uz 140 kW fotonaponskih panela i 2000 m ukupne duljine izmjenjivača | 31 |
| Slika 5-2. Napunjenost baterije od 100 kWh kroz godinu u odnosu na proizvodnju električne energije iz fotonaponskih panela snage 140 kW | 32 |
| Slika 5-3. Kulminirani energetske tokovi, uz bateriju od 100 kWh, snagu fotonaponskih panela od 140 kW i duljinu izmjenjivača od 2000 m..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Slika 5-4. Ovisnost godišnje potrošnje električne energije dizalice topline, cirkulacijske pumpe i električnog grijača o instaliranoj snazi fotonaponskih panela, uz 2000 m..... | 35 |
| Slika 5-5. Ovisnost godišnjeg uvoza i izvoza električne energije u duljini izmjenjivača, uz 145 kW snage fotonaponskih panela | 36 |
| Slika 5-6. Ovisnost godišnje potrošnje električne energije dizalice topline i cirkulacijske pumpe o duljini podzemnog izmjenjivača, uz 145 kW snage fotonaponskih panela..... | 36 |
| Slika 6-1. Energetski tokovi modela 27..... | 39 |
| Slika 6-2. Kulminirani energetski tokovi modela 27..... | 39 |
| Slika 6-3. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i 140 kW fotonaponskih panela..... | 40 |
| Slika 6-4. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i bez baterije | 40 |
| Slika 6-5. Ovisnost neto sadašnje vrijednosti od ukupnoj duljini izmjenjivača i instaliranoj snazi fotonaponskih panela..... | 41 |
| Slika 6-6. Analiza osjetljivosti na kapitalne troškove i cijenu energenata | 42 |
| Slika 6-7. Promjena NPV-a u odnosu na diskontnu stopu | 43 |

II. POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 2-1. Prikupljeni podaci | 5 |
| Tablica 2-2. Ukupne godišnje potrošnje ($1 \text{ m}^3 = 9,75 \text{ kWh}$)..... | 6 |
| Tablica 3-1. Karakteristične veličine toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti za različite vrste stijena | 17 |
| Tablica 3-2. Instalirane snage i kapaciteti sustava te duljine izmjenjivača | 25 |
| Tablica 4-1. Kapitalni troškovi, kredit i poticaji | 29 |
| Tablica 4-2. Troškovi energenata, ispuštanja CO ₂ i eskalacija cijene..... | 30 |
| Tablica 5-1. Godišnji energetske tokovi dobiveni u RES2GEO | 33 |
| Tablica 6-1. Rezultati neto sadašnje vrijednosti i interne stope povrata | 37 |
| Tablica 6-2. Novčani tok modela 27 u HRK..... | 38 |

III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

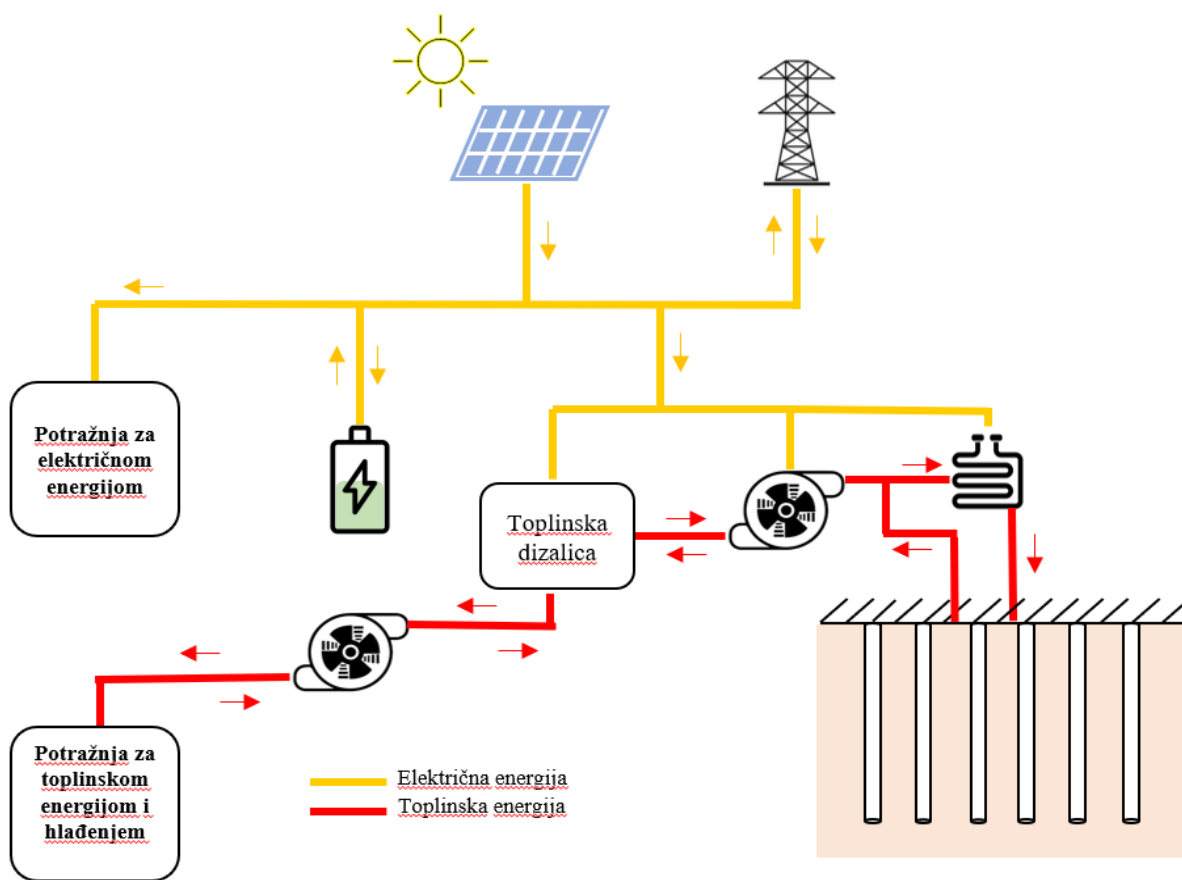
| OZNAKA | ZNAČENJE | SI |
|--------------------|---|-------------------|
| A | Površina protoka | m ² |
| COP | Koeficijent efikasnosti dizalice topline | / |
| J/kg °C | Specifična toplina | J/kg °C |
| C _t | Razlika između prihoda i rashoda tijekom jednog perioda | HRK |
| C ₀ | Kapitalna investicija | HRK |
| D _{el} | Potražnja za električnom energijom | kWh |
| D _{th} | Potražnja za toplinskom energijom | kWh |
| e _{D-el} | Energetski tok potražnje za električnom energijom | kWh |
| e _{D-th} | Energetski tok potražnje za toplinskom energijom | kWh |
| e _{DT-el} | Energetski tok dizalice topline – električna energija | kWh |
| e _{DT-th} | Energetski tok dizalice topline – toplinska energija | kWh |
| e _G | Energetski tok grijača | kWh |
| e _{PV} | Energetski tok fotonaponskih panela | kWh |
| e _B | Energetski tok baterije | kWh |
| e _{imp} | Energetski tok uvoza električne energije | kWh |
| i | Diskontna stopa | % |
| NPV | Neto sadašnja vrijednost | HRK |
| IRR | Interna stopa povrata | % |
| r ₁₁ | Unutarnji polumjer unutarnje cijevi | m |
| r ₁₂ | Vanjski polumjer unutarnje cijevi | m |
| r ₂₁ | Unutarnji polumjer vanjske cijevi | m |
| r ₂₂ | Vanjski polumjer vanjske cijevi | m |
| r _b | Polumjer bušotine | m |
| R _t | Razlika između prihoda i rashoda tijekom jednog perioda | HRK |
| t | Broj godina | / |
| T | Temperatura | °C |
| λ | toplinska vodljivost | W/m °C |
| ρ | Gustoća | kg/m ³ |
| δ | Površina poprečnog presjeka cijevi | m ² |

1. UVOD

Tranzicija prema klimatski neutralnom društvu izazovan je zadatak, ali i prilika za izgradnju kvalitetnije budućnosti za nadolazeće naraštaje. Tranzicija je usmjerena na ljude, načine na koje se proizvodi i troši, kreće, griju i hlade domovi te radi i živi u zajednici. Uz europske i nacionalne politike i propise, organizacije, zajednice i građani iz svih sektora našeg društva i gospodarstva imaju važnu ulogu u tranziciji. Kako bi društvo postalo klimatski neutralno, nužno je povećanje udjela obnovljivih izvora energije (u daljnjem tekstu: OIE) u potrošnji, kao i povećanje energetske učinkovitosti. Jedan od više faktora u postizanju tih ciljeva je izgradnja mikromreža. Mikromreža je elektroenergetski sustav s distribuiranim izvorima energije, sustavom pohrane energije te upravljanja potrošnjom. Kako se mikromreže grade blizu konačnih potrošača, učinkovitost se povećava kroz uštede na gubicima u distribucijskom i transportnom sustavu. Mikromreža može raditi u otočnom i paralelnom pogonu (Jovanovac, 2016). Otočni pogoni se najčešće koriste u udaljenijim, ruralnim mjestima. Takve mikromreže su relativno jeftin i brzi način za osiguranje energije ljudima koji nemaju pristup glavnoj mreži. Drugi tip, paralelni, spojen je na glavnu mrežu, no u bilo kojem trenutku, recimo tijekom nestanka električne energije u glavnoj mreži, može se odvojiti i funkcionirati u otočnom pogonu (Roberts i Chang, 2018).

Kao jedan od izvora električne energije u mikromreži, moguće je koristiti fotonaponske panele. Cijena komercijalnih instaliranih kapaciteta, na globalnoj razini, je od 2010. godine do 2019. pala za 82%, s 0,378 USD/kWh na 0,068 USD/kWh, dok pad cijene manjih kapaciteta, onih za kućanstva, iznosi između 47% i 80% od 2010. do 2019. godine ovisno o tržištu. Uz pad cijena, povisila se njihova efikasnost. Tako je faktor kapaciteta narastao s 14% u 2010. godini, na 18% u 2019. (IRENA, 2019). Uz OIE, sve više pažnje za proizvodnju toplinske energije pridobivaju toplinske dizalice. Postoje dvije vrste, geotermalne i zračne. Geotermalne dizalice toplinu preuzimaju toplinu iz zemlje, dok zračne preuzimaju toplinu iz zraka. Neke zemlje su već propisale da je od određene godine zabranjeno priključivanje plina na nove nekretnine, te da bi se iste morale grijati preko dizalica topline zbog svoje visoke učinkovitosti (Carrington, 2020)

U ovome diplomskome radu biti će modelirana jedna privatna mikromreža (Slika 1-1), točnije sustav jedne ulice na sjeveroistočnom dijelu Grada Zagreba, gdje će se električna energija proizvoditi iz OIE, odnosno fotonaponskih panela, dok će se toplinska energija proizvoditi pomoću geotermalne dizalice topline s bušotinskim izmjenjivačima. Također, biti će ispitana isplativost baterijskog sustava za pohranu viška električne energije. Snage i kapaciteti sustava biti će modelirani na temelju prethodno napravljene analize potrošnje. Za modeliranje sustava koristiti će se Python model RES2GEO, pomoću koje će biti izračunati svi potrebni energetski tokovi na različitim konfiguracijama sustava, na temelju kojih će biti izrađena studija isplativosti (engl. *feasibility study*) te će biti izabran onaj sustav s najboljom isplativosti.



Slika 1-1. Skica mikromreže

2. ANALIZA POTROŠNJE

Ulica na temelju koje se izvodi studija, nalazi se na uzbrdici u podsljemenskoj zoni (Slika 2-1.). Sve nekretnine u ulici su obiteljske kuće, koje električnu energiju povlače s mreže, dok za grijanje i toplu vodu koriste prirodni plin. Crvenom površinom označeno je zemljište na kojem bi se postavili bušotinski izmjenjivači.



Slika 2-1. Prikaz ulice iz zraka (Google Earth, 2020)

Podaci o nekretninama, točnije potrošnja prirodnog plina i električne energije, stambene površine, broj ukućana i drugo, prikupljeni su pomoću ankete (Slika 2-2.) provedene u srpnju 2020. godine. Zabilježila se potrošnja za razdoblje od početka 2017. do kraja 2019. godine. S obzirom na neredovito prijavljivanje potrošnje opskrbljivačima plina, rezultati anketa su

prikazali da neka domaćinstva najviše prirodnog plina potroše u ljetnim mjesecima. Stoga, pod pretpostavkom da je istim domaćinstvima ukupna godišnja potrošnja točna, ista je množena s mjesečnim postotkom od ukupne godišnje potrošnje za nekretninu koja je redovito očitavala svoje mjerilo i prijavljivala potrošnju. Na taj način, dobivena je sezonska potrošnja prirodnog plina.

NEMOJ ME ODMAH BACITI, NIJE NIKAKVA PREVARA!!!!!

- Adresa: _____
- Broj ukućana: _____
- Orijentacija krova (npr. Sjever – Jug): _____
- Nagib krova u stupnjevima od horizontale (cca.): _____
- Površina krova (cca.) [m²]: _____
- Površina stambenog prostora [m²]: _____
- Visina stropova (cca. ne morate mjeriti točno) [m]: _____
- Tip fasade:
 - Stiropor fasada
 - Toplinska termo fasada
 - Vapneno cementna fasada
 - Nema
- Površina vanjskog zida/fasade [m²]: _____
- Tip stolarije:
 - Drvo
 - PVC
 - Meta
 - Kombinacija
- Godina montaže stolarije: _____
- Površina stolarije (cca., ne morate mjeriti; u slučaju kombinacije u točki 10., dopišite pod točkom 10. koji materijali su korišteni te za svaki posebno površinu) [m²]: _____
- Tip grijanja:
 - Peć na drva
 - Centralno na pelete
 - Centralno na prirodni plin
 - Centralno na lož ulje
 - Klima uređaji
 - Električne grijalice
 - Kombinacija
- Korištenje klima uređaja za hlađenje: Da Ne
- Tip bojlera: Električni Plinski Loživo ulje
- Koliko kilometara godišnje napravite s automobilom/automobilima? (cca) _____
- Potrošnja električne energije i plina (u slučaju da koristite drvo, napišite pored tablice otprilike koliko metara drva ste potrošili U GODINAMA, ako se grijate na struju, stupac Plin ostavite prazan).

| Električna energija [kWh] | | |
|---------------------------|-----------------|----------------|
| Razdoblje | Visoka tarifa 1 | Niska tarifa 2 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| Potrošnja plina (m ³) | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|
| Mjesec | 2017 | 2018 | 2019 |
| Siječanj | | | |
| Veljača | | | |
| Ožujak | | | |
| Travanj | | | |
| Svibanj | | | |
| Lipanj | | | |
| Srpanj | | | |
| Kolovoz | | | |
| Rujan | | | |
| Listopad | | | |
| Studeni | | | |
| Prosinac | | | |

UPUTE ZA POPUNITI TABLICE SU NA DRUGOJ STRANICI!

Podrži dragi susjed ili susjeda, za potrebe diplomskog rada zamolio bih Vas da izdvojite MAX 20 minuta za popunjavanje ovog obrasca.

Gli diplomskog rada je izračunati vrijeme povrata investicije u energetske obnovu kuća, solarne ploče i dizalice topline.

Naiveća tlaka, će Vam biti registracija na HEP i GPZ, ali sve što Vam treba za to je po jedan račun za struju i plin, te 10 minuta MAX.

Na kraju ćete svi dobiti okviran izračun povrata investicije za svoju nekretnost, tako sa želite), a ja ću radom se diplomirati!

Kada popunite obrazac, uslikajte ga i pošaljite na jedan od kontakata ili sa meni osobno date kad me vidite na ulici!

U SLUČAJU BILO KAKVIH PITANJA ILI NEJASNOĆA, SLOBODNO ME KONTAKTIRAJTE!

HVALA VAM PUNO!!

Domagoj Leko

Whatsapp: _____

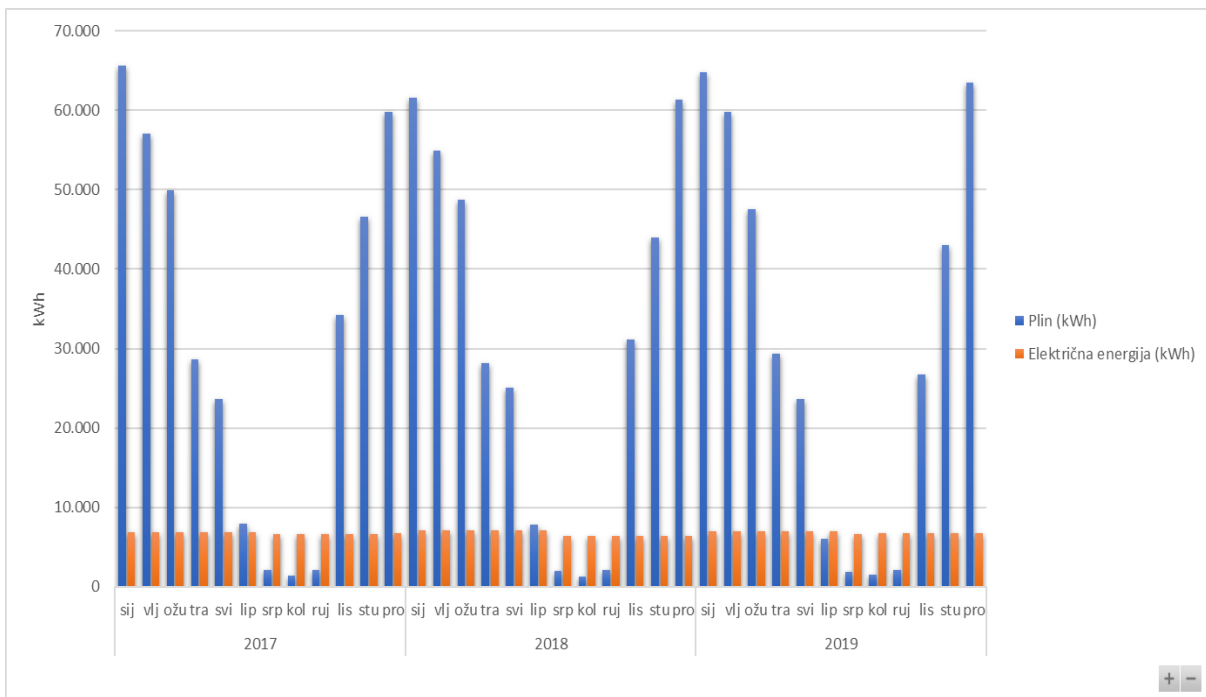
Email: _____

Slika 2-2. Anketa

Rezultati ankete, bez potrošnje energije prikazani su u tablici 2-1. Kućni brojevi označeni crvenom bojom ne postoje, dok oni označeni žutom nisu sudjelovali u anketi te su karakteristike tih kućanstava i njihova potrošnja procijenjeni. Zbrojena, mjesečna potrošnja cijele ulice kroz godine prikazana je grafički na slici 2-3.

Tablica 2-1. Prikupljeni podaci

| Kućni broj | Površina (m ²) | Stolarija (m ²) | Tip stolarije | Godina montaže stolarije | Tip Grijanja | Klima uređaj | Broj ukućana | Nagib krova, ° | Krov, (m ²) | Prosječna kilometraža | Tip fasade | Fasada (m ²) |
|------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------------------|-----------------------|------------|--------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 400 | 60 | Drvo | 1985 | Plinsko | Da | 8 | 25 | 180 | 13000 | Termo | 450 |
| 3 | 200 | 23 | Drvo | 1993 | Plinsko | Ne | 3 | 35 | 100 | 0 | Termo | 440 |
| 4 | 350 | 30 | Drvo | 1988 | Plinsko | Ne | 4 | 30 | 140 | 12000 | Termo | 400 |
| 5 | 345 | 48 | Drvo | 1998 | Plinsko | Da | 4 | 30 | 190 | 20000 | Stiropor | 340 |
| 6 | 300 | 42 | Drvo | 1992 | Plinsko | Da | 7 | 35 | 200 | 17000 | Termo | 400 |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 200 | 24 | Oboje | 1990 | Plinsko | Ne | 3 | 45 | 120 | 16000 | Vap-cem | 420 |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 180 | 25 | PVC | 2017 | Plinsko | Da | 2 | 35 | 110 | 11000 | Stiropor | 380 |
| 11 | 300 | 35 | PVC | 2020 | Plinsko | Da | 7 | 35 | 150 | 12000 | Termo | 400 |
| 12 | 200 | 24 | Drvo | 1994 | Plinsko | Da | 6 | 40 | 180 | 10000 | Stiropor | 320 |
| 13 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 530 | 65 | Drvo | 1998 | Plinsko | Da | 4 | 28 | 300 | 20000 | Stiropor | 400 |
| 15 | 200 | 24 | Drvo | 1992 | Plinsko | Ne | 3 | 35 | 200 | 11000 | Stiropor | 350 |
| 15A | 200 | 20 | Drvo | 1991 | Plinsko | Da | 4 | 25 | 200 | 15000 | Stiropor | 300 |
| 16 | 150 | 70 | PVC | 2015 | Plinsko | Ne | 4 | 35 | 250 | 13000 | Stiropor | 400 |
| 16A/B | 280 | 20 | Drvo | 2004 | Plinsko | Da | 8 | 30 | 350 | 20000 | Stiropor | 300 |
| 17 | 250 | 35 | Drvo | 1989 | Plinsko | Ne | 5 | 35 | 200 | 11000 | Stiropor | 350 |
| 18 | 200 | 22 | Drvo | 1994 | Plinsko | Da | 5 | 30 | 170 | 8000 | Stiropor | 350 |
| 19 | 180 | 20 | Drvo | 1996 | Plinsko | Ne | 3 | 35 | 150 | 10000 | Stiropor | 350 |
| 20 | 180 | 28 | Drvo | 1993 | Plinsko | Ne | 4 | 25 | 150 | 0 | Nema | 350 |
| 21 | 100 | 10 | PVC | 2016 | Plinsko | Da | ? | 30 | 130 | 13000 | Stiropor | 250 |
| 22 | 270 | 30 | PVC | 2004 | Plinsko | Da | 4 | 30 | 250 | 12000 | Stiropor | 300 |



Slika 2-3. Mjesečne potrošnje plina i električne energije

Nakon sumiranih mjesečnih potrošnji (Tablica 2-2), vidi se da je 2017. godina ona tijekom koje je potrošeno najviše plina te je ista uzeta za kreiranje toplinskog i električnog profila u RES2GEO te daljnje proračune energetske tokova i financijske analize.

Tablica 2-2. Ukupne godišnje potrošnje ($1 \text{ m}^3 = 9,75 \text{ kWh}$)

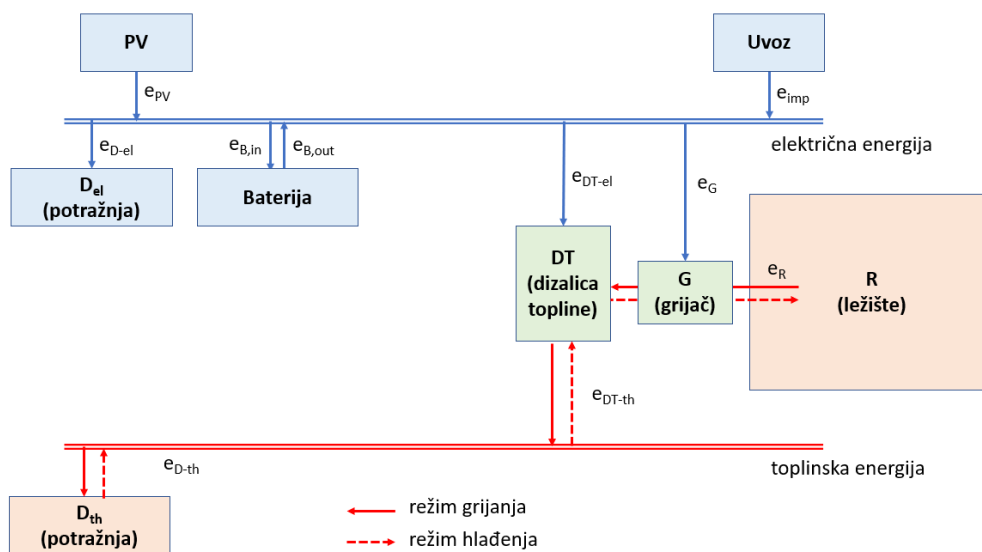
| Godina | Plin [kWh] | Električna energija [kWh] |
|-------------|----------------|---------------------------|
| 2017 | 378.957 | 81.242 |
| 2018 | 368.186 | 81.694 |
| 2019 | 369.996 | 81.985 |

Zaključno, prema dobivenim podacima ispada da je u 2017. prosječna godišnja potrošnja kućanstva u ulici iznosila 18.947,85 kWh plina, dok je prosječna potrošnja električne energije iznosila 4.062,10 kWh. Prosječna stambena površina nekretnina iznosi 250 m², te kada se prosječna potrošnja plina podijeli s prosječnom površinom, dobije se specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje u iznosu od 75,79 kWh/m², što bi cjelokupnu ulicu svrstalo u energetske razred C (Energetski certifikat, 2019).

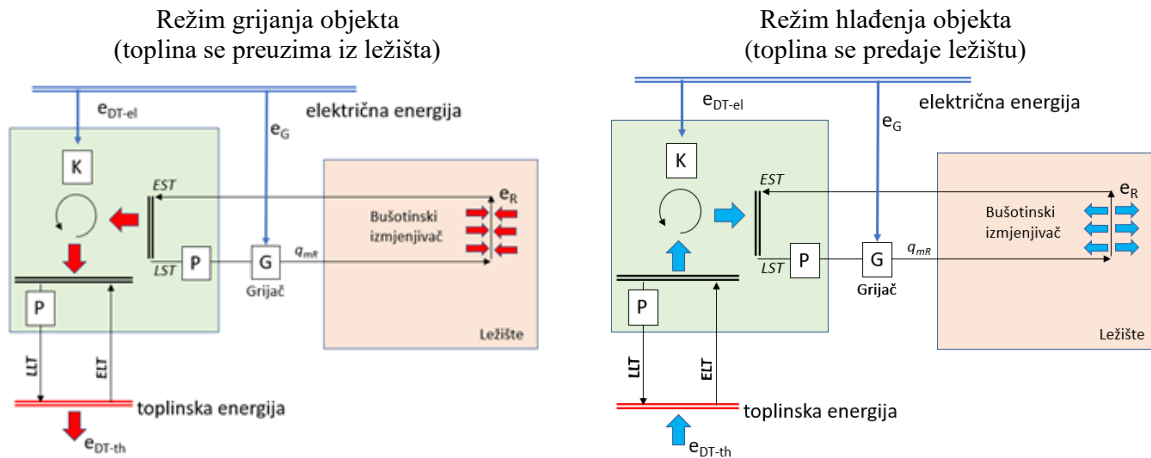
3. METODA IZRAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U VIŠEGODIŠNJOJ SIMULACIJI ENERGETSKOG SUSTAVA

Kao što je već navedeno, za proračun energetske tokova korištena je Python model RES2GEO. Sami naziv modela implicira da se električna energija proizvedena iz OIE koristi za pogon geotermalnih dizalica topline, ili za pohranu viška električne energije u ležište u obliku toplinske energije.

Energetski sustav u modelu napravljen je tako da prioritet u preuzimanju električne energije iz OIE ima komponenta "Potražnja za električnom energijom" (Slika 1-1). Ako je ista zadovoljena i postoji višak dobiven iz OIE, taj višak koristi se za pogon geotermalnih dizalica topline (toplinska dizalica i cirkulacijska pumpa) ako postoji potreba za grijanjem ili hlađenjem. Ako je potražnja za grijanjem i hlađenjem zadovoljena te i dalje postoji višak, isti se koristi za pogon cirkulacijske pumpe i grijača u svrhu rekuperacije ležišta topline. Taj proces se odvija dokle god postoji višak električne energije iz OIE i dok je temperatura cirkulacijskog fluida manja od 50 °C jer temperatura iznad može oštetiti PVC cijevi korištene za provod cirkulacijskog fluida. Ako temperatura fluida dosegne 50 °C te i dalje postoji višak iz OIE, on se pohranjuje u bateriju dok se ne napuni, nakon čega se vraća u mrežu. Ako u bilo kojem trenutku proizvodnja električne energije iz OIE bude nedostatna za pogon potrošača iz sheme, nedostatak se nadoknađuje iz električne mreže.



Slika 3-1. Načelna shema sveukupnih energetske tokova električne i toplinske energije u modelu RES2GEO



Slika 3-2. Detaljan prikaz energetskih tokova toplinske pumpe, grijača i ležišta za režime grijanja i hlađenja

Matematički model bilancira energetske tokove na strani električne i toplinske energije:

$$e_{D-el} + e_{DT-el} + e_G = e_{PV} + e_{imp} \pm e_B \quad (3-1)$$

$$e_{D-th} = e_{DT-th} \quad (3-2)$$

Također, potrebno je bilancirati i energetske tokove dizalice topline i ležišta, posebno za režim grijanja:

$$e_{DT-th} = e_{DT-el} + e_R(+e_G) \quad (3-3)$$

i režim hlađenja:

$$e_{DT-th} = -e_{DT-el} + e_R(+e_G) \quad (3-4)$$

Energetski tok grijača je prikazan u zagradi jer se on pojavljuje tek kada rekuperiramo temperaturu ležišta dok imamo višak el. energije iz PV-a i dok je istovremeno EST temperatura ispod 50 °C kako ne bi došlo do pregrijavanja. Također, energetska bilanca ležišta je poseban podmodel u modeliranju cjelokupnog sustava, ali zbog svoje kompleksnosti je u ovom diplomskom prikazana samo načelno na slici 3-14.

Parametar faktor učina (engl. *Coefficient of Performance* - COP) prikazuje omjer između korisnog oblika energije i uložene energije u kompresoru (Ecoforest, 2020).

$$COP = \frac{e_{DT-th}}{e_{DT-el}} \quad (3-5)$$

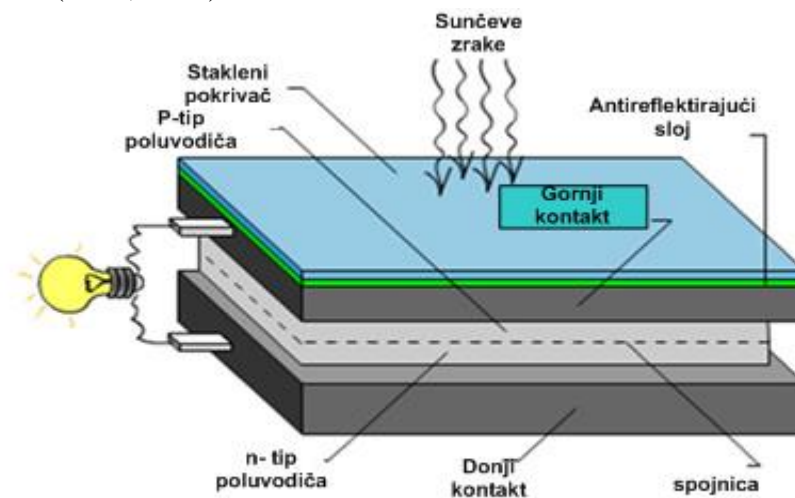
COP ovisi o temperaturi EST (engl. *Entering Source Temperature*), a načelna formula je:

$$COP = 0.0029 \cdot EST^2 + 0.0958 \cdot EST + 3.3662 \quad (3-6)$$

Na kraju, ukupnoj potrošnji energije je zbrojena potrošnja dviju cirkulacijskih pumpi - onoj koja cirkulira vodu kroz grijani/hlađeni objekt i onoj koja cirkulira vodu kroz bušotinski izmjenjivač topline. Pumpa mora savladati pad tlaka uslijed linijskih i lokalnih gubitaka, a korištena je formula za izračun pada tlaka s Hazen-Williams korelacijom.

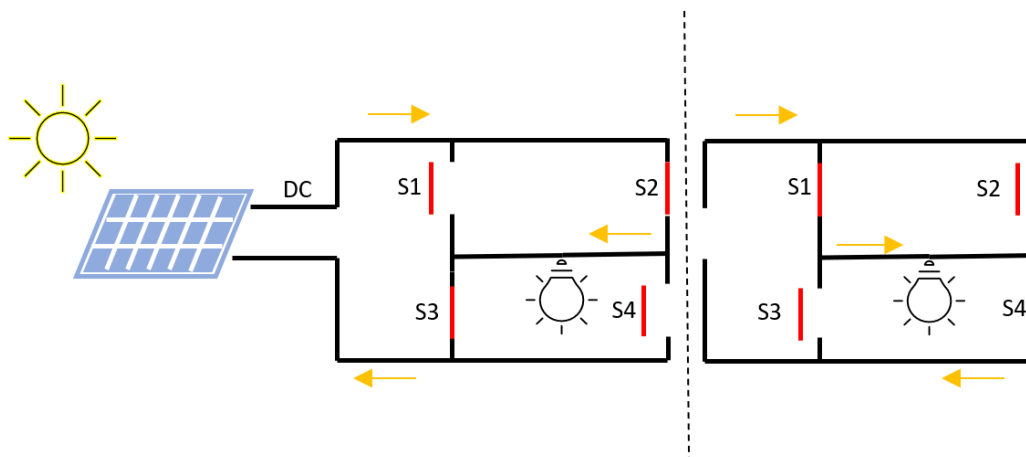
3.1. FOTONAPONSKI PANELI

Fotonaponski paneli su spojevi fotonaponskih članaka koji koriste fotone, čestice sunčeve svjetlosti, kao izvor energije za proizvodnju istosmjerne struje. Svaka fotonaponska ćelija spoj je dva sloja od poluvodičkog materijala, najčešće silicija, od kojih je jedan pozitivno nabijen, a drugi negativno (Slika 3-2). Nabijenost se postiže dodavanjem aditiva na slojeve, fosfora za negativnu stranu i bora za pozitivnu stranu. Time se postiže stvaranje električnog polja na graničnom sloju u članku. Stoga, kada fotoni udaraju na negativno nabijeni sloj, izbijaju elektrone koje električno polje provodi iz graničnog sloja prema pozitivno nabijenom sloju. Kako bi se struja iznijela izvan članka, stavljaju se metalni kontakti s gornje i donje strane koji prenose elektrone, odnosno struju prema žicama. Nakon te točke, elektroni mogu teći kao i iz bilo kojeg izvora (Dhar, 2017).



Slika 3-3. Fotonaponska ćelija (Sučić, 2013)

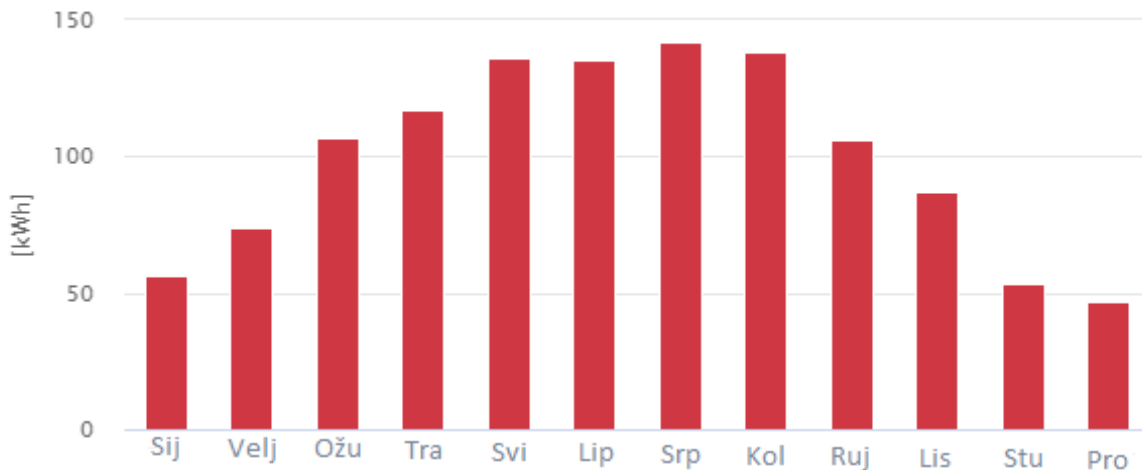
Uređaji koji su dizajnirani za rad na izmjeničnoj struji, poput perilica, hladnjaka itd., ne mogu raditi na istosmjernoj. Stoga je uz fotonaponske panele nužno instalirati i inverter. Solarni inverter služi za konvertiranje istosmjerne struje proizvedene iz fotonaponskih panela u izmjeničnu struju, no prije toga, podiže napon na 220V, odnosno napon gradske mreže. Pojednostavljeni prikaz pretvaranja DC u AC prikazan je na slici 3-3.



Slika 3-4. Pojednostavljeni prikaz rada invertera

Na lijevoj strani slike vidi se da struja teče kroz zatvorene sklopke S2 i S3, dok na desnoj teče kroz sklopke S1 i S4. Stalnom izmjenom sklopki postići će se izmjenična struja kroz žarulju u sredini. Ovakav pojednostavljeni prikaz rezultirao bi kvadratnim valom, koji je za razliku od sinusnog, nepogodan za većinu elektronike. Stoga, kako bi se postigao sinusni val uz adekvatnu frekvenciju, umjesto sklopki koriste se poluvodičke diode, unipolarni tranzistori, polarni tranzistori itd. uklopljeni u kontrolere (Evans, 2017).

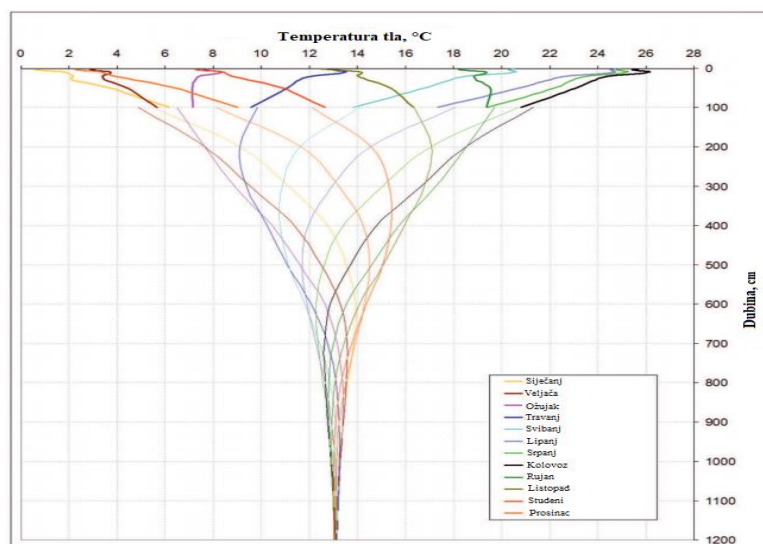
Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih panela ovisi o azimutu, nagibu u odnosu na horizontalu i količini insolacije (Ost, 2018). Za ulicu iz ovog projekta, procjena godišnje proizvodnje iz 1 kW instalirane snage fotonaponskih panela, pod kutom od 35° i azimutom od 180°, iznosi 1,200 kWh (Global Solar Atlas, 2020) te je ista korištena za proračun proizvodnje iz OIE u RES2GEO. Prosječna mjesečna proizvodnja prikazana je na slici 3-4. Pri simulacijama se pripazilo da godišnji izvoz električne energije bude manji od uvoza, kako bi ulica bila svrstana u kategoriju aktivnog kupca (engl. *prosumer*), a ne proizvođača. Analize su napravljene sa snagama od 0 do 160 kW, te je pad proizvodnje, odnosno pad efikasnosti panela zanemaren.



Slika 3-5. Prosječna mjesečna proizvodnja iz 1 kW (Global Solar Atlas, 2020)

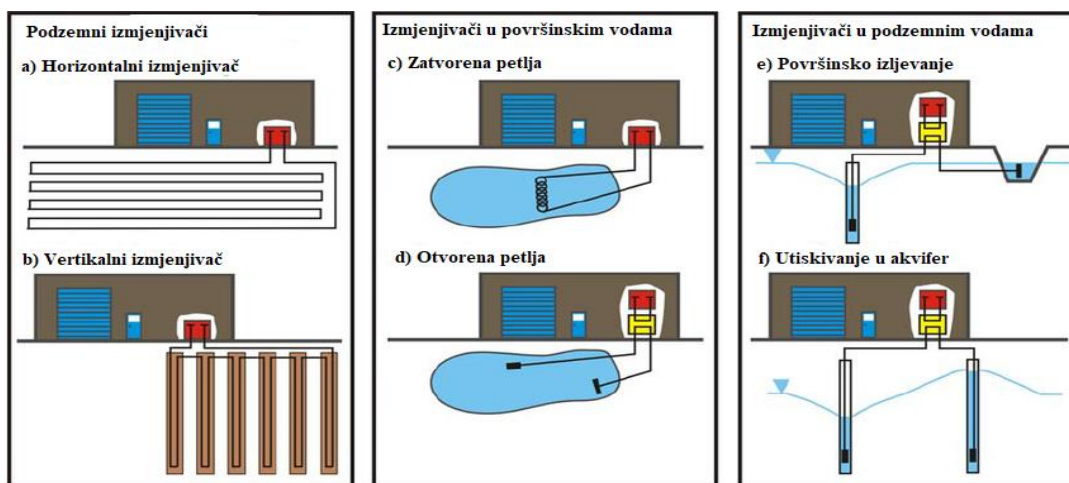
3.2. GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE

Tlo je, za razliku od okolnog zraka, konzistentan i pouzdan izvor topline, s obzirom na činjenicu da usprkos promjenama vanjske temperature, temperatura na određenoj dubini ostaje konstantna tijekom cijele godine (Slika 3-5.).



Slika 3-6. Mjerene srednje mjesečne temperature tla do 100 cm i izračunate vrijednosti prigušivanja temperature tla u zavisnosti o promjeni dubine za lokaciju Zagreb - Maksimir (Kurevija, 2010)

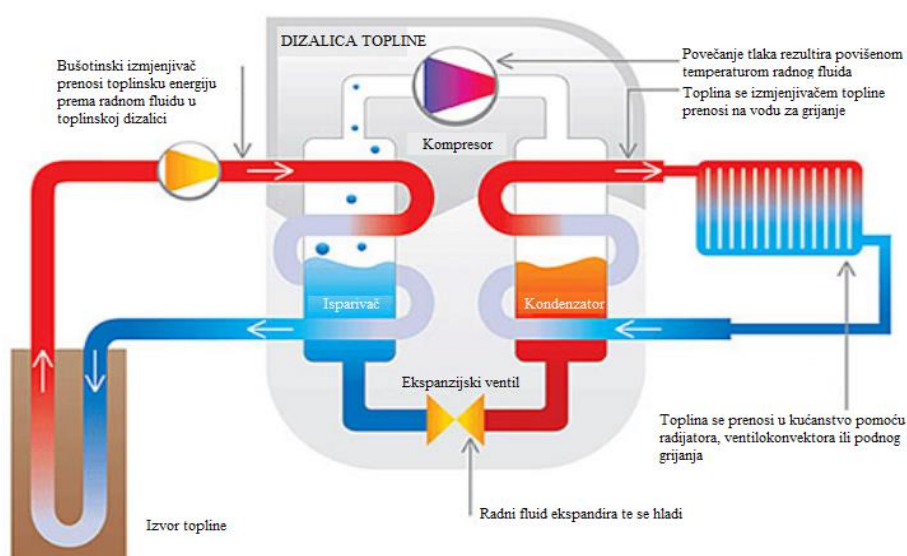
Geotermalne dizalice topline preuzimaju toplinu iz tla ili vode cirkulirajući vodu s aditivima kroz podzemni sustav cijevi. Toplinska dizalica zatim podiže temperaturu, te se toplina iskorištava za grijanje ili toplu vodu. Za rad im je potrebna električna energija, ali im je prednost u tome što potroše manje električne energije nego što proizvedu toplinske. Postoje različiti tipovi izmjenjivača i izvora topline koje geotermalne dizalice topline mogu koristiti, prikazani su na slici 3-5.



Slika 3-7. Tipovi izmjenjivača topline (Raymond i dr., 2007)

Vertikalni podzemni izmjenjivač može se sastojati od U – cijevi ili koaksijalnih cijevi.

Sama toplinska dizalica radi na principu cirkulacije rashladnog fluida (engl. *refrigerant*) u kompresijsko – ekspanzijskom ciklusu (Banks, 2012) Shema rada prikazana je na slici 3-7.

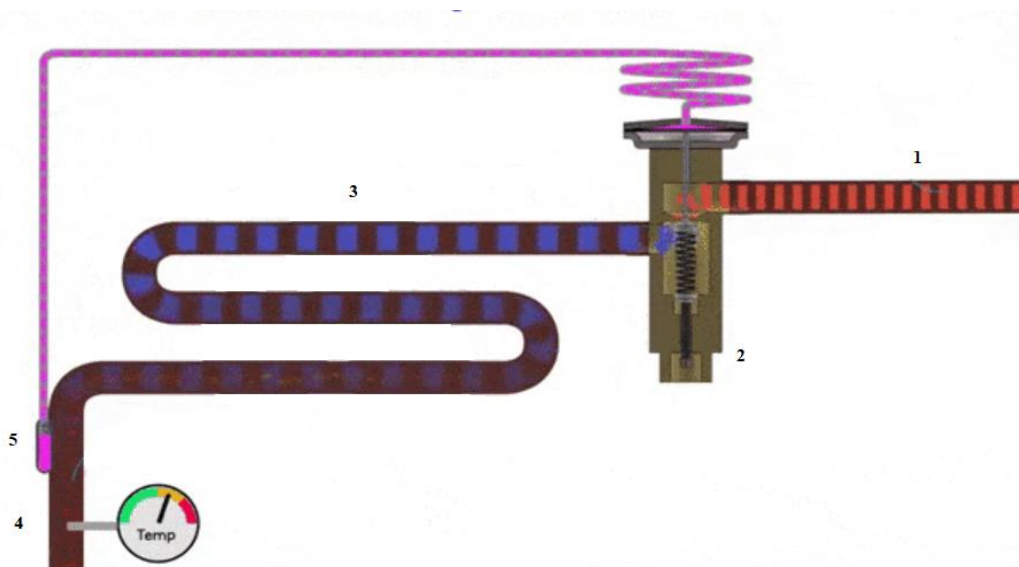


Slika 3-8. Princip rada dizalice topline u fazi grijanja (DPY Mercantile Inc., 2015)

Slika 3-6 prikazuje kako cirkulacijski fluid, koji je najčešće voda s antifrizom, prikuplja toplinu iz zemlje te ju predaje radnom fluidu u isparivaču gdje mu temperatura raste. Zatim radni fluid ulazi u kompresor, gdje mu raste tlak i temperatura. Radni fluid ulazi u kondenzator gdje predaje toplinu vodi za grijanje (ili zraku u klasičnim klima uređajima), te mu kao posljedica predaje topline temperatura opada i dolazi do ukapljivanja. Zatim radni fluid prolazi kroz ekspanzijski ventil (Slika 3-7) gdje mu tlak i temperatura dodatno opadaju na početno stanje. Princip rada ekspanzijskog ventila prikazan je na slici 3-8.



Slika 3-9. Ekspanzijski ventil (Servis Jelić d.o.o., 2020)



Slika 3-10. Shematski prikaz rada ekspanzijskog ventila (Evans, 2017)

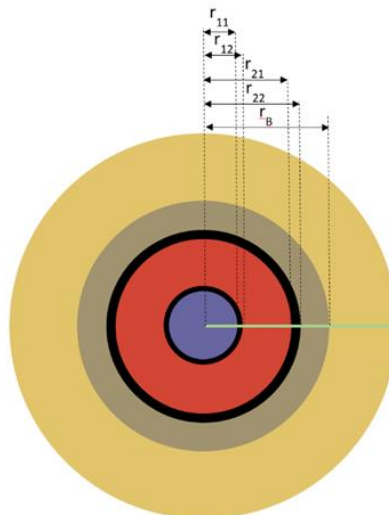
Radni fluid iz kondenzatora (1) ulazi u ventil (2) gdje se površina otvora kontrolira pomoću tlaka u kapilarnoj cjevčici (5) koji pritiskuje iglu te s time i oprugu pomoću koje se otvor širi ili smanjuje. Nakon ventila fluid prolazi kroz isparivač (3) gdje mu temperatura raste te pred ulaz u kompresor (4) mu se mjeri temperatura pomoću temperaturnog osjetila koje u sebi sadrži lako isparavajuću fluid. U slučaju previsoke temperature na osjetilu, fluid u njemu isparava te raste tlak u kapilarnoj cjevčici što uzrokuje otvaranje ventila kako bi tlak i temperatura radnog fluida dodatno pali (Evans, 2017)

Kako bi se dizalica topline koristila i za hlađenje, potreban joj je reverzibilni ventil (Slika 3-10) koji omogućuje promjenu smjera cirkulacije radnog fluida. U fazi hlađenja, nakon izlaska iz kompresora, radni fluid ide prema kondenzatoru (koji je u fazi grijanja djelovao kao isparivač), gdje predaje toplinu cirkulacijskom fluidu, koji ju sprema u ležište. Zatim radni fluid prolazi kroz ekspanzijski ventil gdje mu opada tlak i temperatura, nakon čega ulazi u isparivač (koji je u fazi grijanja djelovao kao kondenzator) gdje preuzima toplinu iz kućanstva, zbog čega mu raste temperatura te takav ulazi u kompresor nakon čega se ciklus ponavlja (Evans, 2018). Reverzibilni ventil je, kao što slika 3-9 prikazuje, cilindrična metalna komponenta s 3 manja ventila u obliku cijevi s jedne strane te jednog ventila s druge strane. Također, sadrži solenoidni ventil koji usmjerava radni fluid s odgovarajuće strane kliznog mehanizma unutar središnje komponente reverzibilnog ventila te na taj način preusmjerava fluid u odgovarajući ventil. (Tuckers, 2014)



Slika 3-11. Reverzibilni ventil (Kanpus HVAC, 2020)

U proračunima, uzimane su ukupne duljine izmjenjivača od 500 do 2000 metara, odnosno od 5 do 20 bušotina dubine 100 metara. Koriste se koaksijalne cijevi (Slika 3-10), gdje vanjski polumjer unutarnje cijevi (r_{12}) iznosi 16 mm, a unutarnji (r_{11}) 14,55 mm. Vanjski polumjer vanjske cijevi (r_{22}) iznosi 31,5 mm, a unutarnji polumjer (r_{21}) 28,64 mm. Polumjer bušotine (r_b) iznosi 40 mm. Fluid se utiskuje kroz unutarnju cijev (plava boja), te izlazi iz bušotine kroz prstenasti prostor (crvena boja). Potrebna snaga kompresora dobivena je pomoću RES2GEO.



Slika 3-12. Konstrukcija bušotine

3.3. LEŽIŠTE

Ležište, odnosno stijenska masa ispod površine zemlje, može se smatrati kao veliki spremnik topline. Spremnik se prirodno grije insolacijom, ali može se prisilno grijati utiskivanjem viška topline (tijekom ljetnih mjeseci). Tu utisnutu toplinu zatim možemo ponovno proizvesti tijekom zime. Primjeri viškova topline su (Banks, 2012):

- Sunčeva radijacija absorbirana putem površine
- Sunčeva energija prikupljena pomoću solarnih panela koja je utisnuta u zemlju
- Otpadna toplina klima uređaja
- Otpadna toplina iz industrijskih procesa
- Višak topline iz kogeneracijskih postrojenja

Karakteristike ležišta o kojima ovisi sposobnost skladištenja i protoka topline su:

- Specifični toplinski kapacitet - sposobnost medija (kruto tijelo, tekućina ili plin) da skladišti toplinu, odnosno količina topline uskladištena u medij za promjenu temperature od jedan stupanj. Mjerna jedinica je J/kgK (Banks, 2012)
- Toplinska vodljivost – količina energije koju određeni medij provede kroz jedinicu površine u jedinici vremena, pri padu temperature od jedan stupanj na jedinici puta u smjeru strujanja topline. Mjerna jedinica je J/mK (Kurevija, 2010)
- Volumni specifični toplinski kapacitet – umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta medija s njegovom gustoćom. Mjerna jedinica je J/m³K (Banks, 2012)
- Toplinski difuzivitet – "brzina izjednačenja temperature pri nestacionarnoj toplinskoj vodljivosti, a ovisi o fizikalnim karakteristikama tla" (Kurevija, 2010). Jednak je količniku toplinske vodljivosti i volumnog specifičnog toplinskog kapaciteta. Mjerna jedinica je m²/s

3.3.1. Izvori termogeoloških podataka

Postoji više načina kako doći do termogeoloških karakteristika određenih stijena. Prvi i najjednostavniji način je analoški, upotrebom već publiciranih tablica s podacima za pojedine tipove stijena (Tablica 3-1.) Drugi način je laboratorijskim testiranjem gdje se jezgra ili uzorak geološkog materijala vraća u laboratorij te se toplinska vodljivost mjeri mjereći promjenu temperature uzorka pri konstantnom protoku topline. Treći način su *in situ* testovi poput testa toplinskog odaziva tla (Banks, 2012). Podaci prikupljeni *in situ* testovima, odnosno ispitivanjem na bušotini, najprecizniji su s obzirom na različite karakteristike svake lokacije i mogućnost ispitivanja veće količine uzoraka pod realnim uvjetima za razliku od mogućnosti u laboratoriju.

Test toplinskog odaziva (eng. thermal response test - TRT) se sastoji od promatranja promjene temperature u jedinici vremena, kao funkcija narinute topline i karakteristika stijena i tla.

Postoje barem dvije metode prema kojima se TRT izvodi, ona od ASHRAE 2007. (American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers) i od IGSHPA 2007. (International Ground Source Heat Pump Association). Smjernice svih mogu se zajednički opisati na sljedeći način (Banks, 2012):

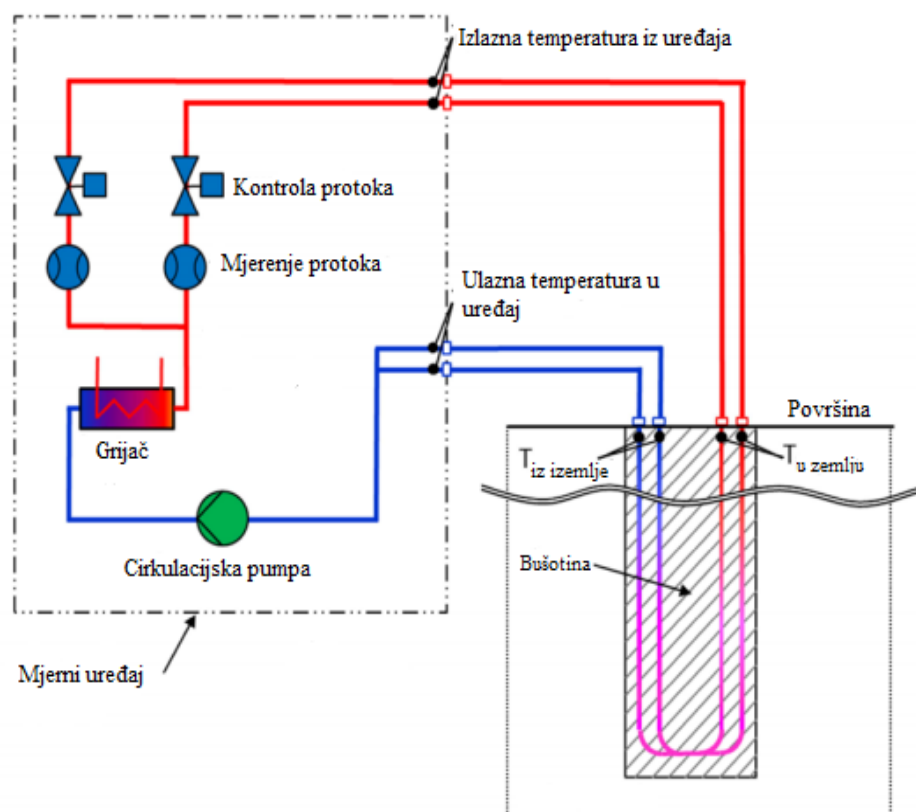
Tablica 3-1. Karakteristične veličine toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti za različite vrste stijena (Kappelmayer 1974, Kavanaugh, 1997)

| Tip stijene | Toplinska vodljivost, 100% uzoraka, W/m°C | Toplinska vodljivost, 80% uzoraka, W/m°C | Specifični toplinski kapacitet, kJ/kg°C | Gustoća, kg/m ³ | Toplinska difuzivnost, m ² /d |
|--------------------------------------|---|--|---|----------------------------|--|
| Sedimentne stijene | | | | | |
| Glinjak | 1,90 - 2,94 | | | | |
| Dolomit | 1,56 - 6,23 | 2,77 - 6,23 | 0,879 | 2725 - 2800 | 0,102 - 0,214 |
| Vapnenac | 1,38 - 6,23 | 2,42 - 3,81 | 0,921 | 2400 - 2800 | 0,093 - 0,130 |
| Kamena sol | 6,40 | | 0,837 | 2080 - 2165 | |
| Pješčenjak | 2,08 - 3,46 | | 1,005 | 2565 - 2725 | 0,065 - 0,111 |
| Siltit | 1,38 - 2,42 | | | | |
| Šejl vlažni (25% kvarca) | 1,04 - 3,98 | 1,73 - 3,12 | 0,879 | 2080 - 2645 | 0,084 - 0,111 |
| Šejl vlažni (bez kvarca) | | 1,04 - 1,56 | | | 0,046 - 0,056 |
| Šejl suhi (25% kvarca) | | 1,38 - 2,42 | | | 0,065 - 0,093 |
| Šejl suhi (bez kvarca) | | 0,86 - 1,38 | | | 0,042 - 0,051 |
| Eruptivne - magmatske stijene | | | | | |
| Granit (10% Kvarc) | 1,90 - 5,20 | 2,25 - 3,28 | 0,879 | 2645 | 0,084 - 0,121 |
| Granit (25% Kvarc) | | 2,60 - 3,63 | | | 0,093 - 0,130 |
| Amfibolit | 1,90 - 4,67 | 2,60 - 3,81 | 0,502 | 2800 - 3125 | |
| Andezit | 1,38 - 4,85 | 1,56 - 2,42 | 0,502 | 2565 | 0,102 - 0,158 |
| Bazalt | 2,08 - 2,42 | | 0,712 - 0,879 | 2880 | 0,065 - 0,084 |
| Gabro | 1,56 - 3,63 | | 0,754 | 2965 | 0,060 - 0,139 |
| Diorit | 2,08 - 3,28 | 2,08 - 2,94 | 0,921 | 2885 | 0,065 - 0,093 |
| Metamorfne stijene | | | | | |
| Gnajs | 1,73 - 5,71 | 2,25 - 3,46 | 0,921 | 2565 - 2800 | 0,084 - 0,111 |
| Mramor | 2,08 - 5,54 | 2,08 - 3,29 | 0,921 | 2725 | 0,074 - 0,111 |
| Kvarcit | 5,19 - 6,92 | | 0,837 | 2565 | 0,204 - 0,279 |
| Škriljavac | 2,08 - 4,50 | 2,42 - 3,81 | | 2725 - 3200 | |
| Slejt | 1,56 - 2,60 | | 0,921 | 2725 - 2800 | 0,056 - 0,084 |

- Nakon bušenja, instalacije podzemne opreme i punjenja sustava fluidom, bušotina mora mirovati 3 do 5 dana kako bi došla u stanje toplinske ravnoteže s ležištem
- Bušenje dodatnih bušotina trebalo bi se izbjegavati za vrijeme provođenja testa, kako se ne bi utjecalo na temperature zemlje
- Promjer bušotine morao bi biti manji od 152 mm
- Bilo koji površinski dio cijevi bi trebao biti što kraći i toplinski izoliran
- Iz sustava bi se trebao izvući zrak prije početka testiranja
- Prije testiranja, prosječna temperatura tla bi trebala biti izmjerena ili spuštanjem mjernog instrumenta, ili cirkulacijom fluida 10 do 20 minuta, mjereći temperature na izlazu iz bušotine
- Test bi trebao trajati između 36 i 48h, neki preporučuju najmanje 50h. U praksi, test treba trajati onoliko dugo dok se ne dobije ravna linija na grafu koji prikazuje promjenu temperature u odnosu na vrijeme u logaritamskoj skali

- Greška u mjerenju temperature mora biti manja od $0,3^{\circ}\text{C}$, u mjerenju snage grijača i pumpe manja od 2%, te u mjerenju protoka manja od 5%
- Odabrani protok mora rezultirati promjenom temperature od 3 do 7°C na izlazu i ulazu u bušotinu, te bi morao biti turbulentan
- Narinuta snaga toplinskog toka bi morala iznositi oko 50 do 80 W po metru bušotinskog izmjenjivača, gdje se niže vrijednosti koriste pri nižoj očekivanoj toplinskoj vodljivosti
- Tijekom testiranja, promjena snage grijača trebala bi biti manja od 1,5%
- Ako je potrebno ponovno testiranje, potrebno je 10 do 14 dana nakon prethodnog testa, kako bi se bušotina mogla vratiti u prvotno stanje
- Nakon završetka testa, moguće je odraditi test toplinskog oporavka, gdje se ugasi grijač, no cirkulacijska pumpa i dalje radi te se prati pad temperature fluida kroz vrijeme

Shema sustava za TRT prikazana je na slici 3-13.



Slika 3-13. Shematski prikaz sustava za izvođenje testa toplinskog odaziva (Interreg Central Europe, 2017.)

3.3.2. Simulacija protoka topline u podzemnom sustavu

Zbog nemogućnosti provođenja TRT testa za potrebe diplomskog rada, za termogeološke karakteristike ležišta i termalne karakteristike konstrukcije bušotina na lokaciji na kojoj se temelji ovaj rad pretpostavljene su sljedeće vrijednosti:

- Površinska temperatura: 15 °C
- Geotermalni gradijent: 0,04 °C/m
- Toplinska vodljivost stijene: 2,4 W/mK
- Promjena vodljivosti s dubinom: 0 (w/mK)/m
- Gustoća ležišta: 2500 kg/m³
- Specifični toplinski kapacitet ležišta: 3500 J/kgK
- Toplinska vodljivost cementacije: 1,2 W/mK
- Gustoća cementacije: 2500 kg/m³
- Specifični toplinski kapacitet cementacije: 880 J/kgK
- Gustoća tubinga PVC: 900 kg/m³
- Specifični toplinski kapacitet tubinga PVC: 1550 J/kgK
- Toplinska vodljivost tubinga PVC: 0,4 W/mK

Kao cirkulacijski fluid koristi se voda, specifičnog toplinskog kapaciteta od 4200 J/kgK, gustoće 1000 kg/m³ i toplinske vodljivosti 0,6 W/mK. Gubitak topline i tlaka u uličnom distributivnom sustavu je zanemaren u proračunima. Također, interferencija između bušotina je zanemarena.

Modeliranje prijenosa topline unutar ležišta je dinamičko, tj. vremenski promjenjivo i sastoji se od osno simetričnog modela ležišta u čijoj se sredini nalazi koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline. Simulira se samo jedan isječak čime se trodimenzionalni osnosimetrični problem pretvara u dvodimenzionalni. Isječak je podijeljen u tzv. ćelije. Za svaku ćeliju postavljamo jednadžbu održanja energije:

$$\frac{\Delta(mcT)}{\Delta t} = \Phi_{in} - \Phi_{out} \quad (3-7)$$

odn. riječima: vremenska promjena energije (mcT) u ćeliji jednaka je razlici toplinskih tokova koje ćelija izmjenjuje s okolnim ćelijama. Također, moramo razlikovati ćelije kroz koje protječe fluid (središnji i prstenasti prostor) i one kroz koje ne protječe fluid (sve ostale ćelije - tlo/stijena,

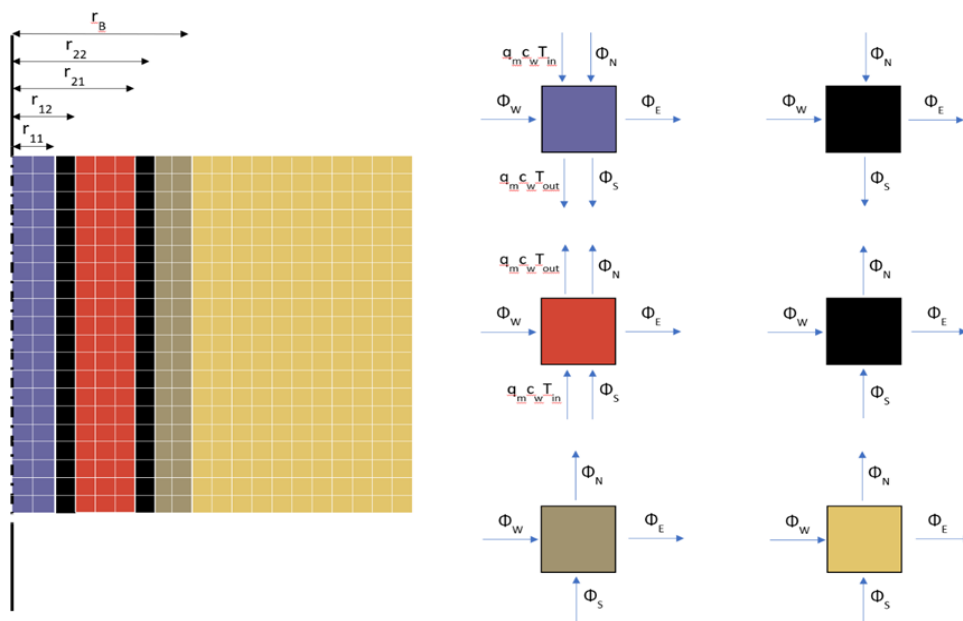
stijenke/PVC i cementacija). Također, s obzirom na to da je načelno je svaka ćelija osim rubnih okružena s četiri ćelije na četiri strane (gore N/north; dolje S/south; lijevo W/west; desno E/istok).

$$\frac{\Delta(m c T)}{\Delta t} = \underbrace{q_m c_w (T_{in} - T_{out})}_{\text{konvektivni dio}} + \underbrace{\sum_{i=N,S,W,E} \{ [k_i A (T_i - T)]_{in} - [k_i A (T_i - T)]_{out} \}}_{\text{konduktivni dio}} \quad (3-8)$$

Kako je koeficijent prolaza topline $k = \lambda/\text{udaljenost}$, a masa ćelije $m = \rho V$, gornju jednadžbu možemo napisati u obliku:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \sum_{i=N,S,W,E} \left\{ \left[\frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{A}{\delta} \right)_i (T_i - T) \right]_{in} - \left[\frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{A}{\delta} \right)_i (T_i - T) \right]_{out} \right\} \quad (3-9)$$

S tim da konvektivni dio postoji samo u ćelijama koje obuhvaćaju centralni i prstenasti dio bušotinskog izmjenjivača pa nije, radi jednostavnosti, prikazan u gornjoj jednadžbi. Vidljivo je da će u svakoj ćeliji toplinska ravnoteža ovisiti o geometrijskim parametrima (A/δ), kao i o fizikalnim svojstvima toplinske provodljivosti ($\lambda/\rho c$). Ostali parametri su temperature ćelije, kao i temperature okolnih ćelija. Ukoliko gornju jednadžbu postavimo za svaku ćeliju, tada dobivamo sustav linearnih jednadžbi, gdje je broj jednadžbi jednak broju ćelija. Sustav se rješava pomoću modula *numpy* unutar Python-a.



Slika 3-14. Poprečni presjek bušotine i prikaz kretanja toplinskih tokova kroz različite dijelove podzemnog sustava

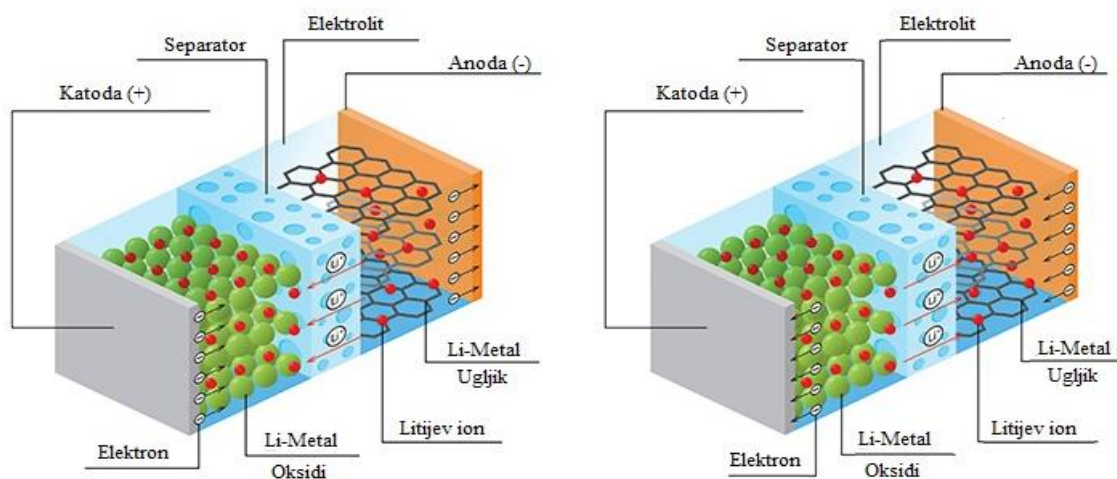
3.4. BATERIJA

Baterijski sustavi za pohranu viškova energije postaju jedno od glavnih rješenja za integraciju većih udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetske sustave diljem svijeta. Velike komercijalne baterije, omogućuju priključenje većeg udjela OIE na mrežu skladištenjem proizvedenih viškova te stabiliziranjem proizvodnje iz OIE. Trenutno, komercijalne baterije, poput Tesla Powerpack sustava u Australiji čine većinu instaliranih baterijskih kapaciteta, no predviđa se da će se udio baterija manjih kapaciteta do 2030. godine naglo povećati (IRENA, 2020).

3.4.1. Li-ion baterije

Li-ion baterije su daleko najpopularniji tip baterije koji se koristi danas, kontroliraju više od 90% globalnog tržišta baterija. Inovacije poput zamjene grafita sa silikonom na anodi, povećavaju kapacitet Li-ion baterija te ih čine konkurentnijim na tržištu skladištenja energije. U usporedbi s ostalim opcijama baterija, Li-ion imaju veću energetska gustoću, dugotrajnije su te su lakše. (Zablocki, 2019)

Princip rada Li-ion baterija prikazan je na slici 3-13.



Slika 3-15. Pražnjenje (lijevo) i punjenje (desno) baterije (Lemmens, 2019)

Anoda i katoda sposobne su skladištiti ione litija. Prilikom pražnjenja, na vodič koji spaja anodu i katodu spojen je potrošač. Pozitivni ioni litija kreću se kroz elektrolit od anode, kroz separator koji ne propušta elektrone, do katode, dok se elektroni odnosno struja kreću u suprotnom smjeru

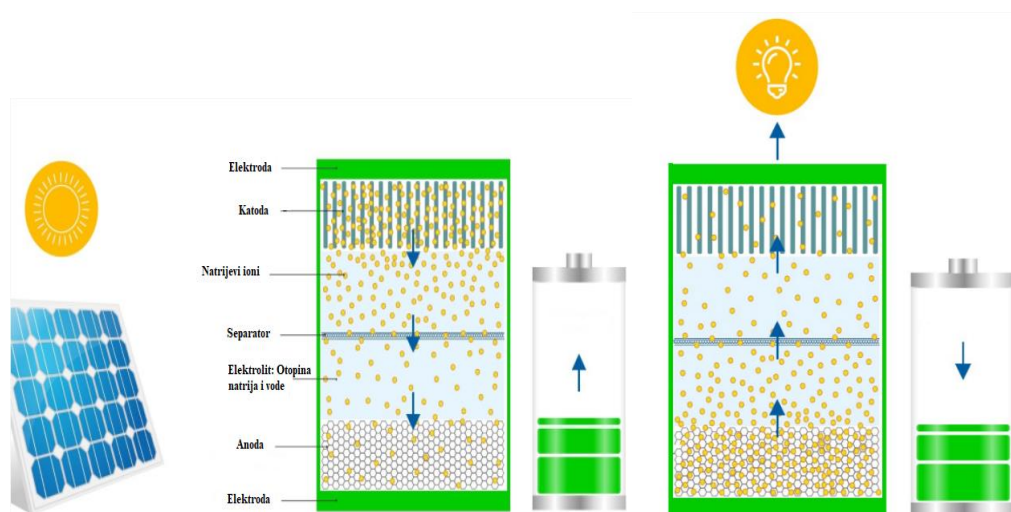
kroz vodič. Kada svi ioni litija pređu s anode na katodu, baterija je prazna. Prilikom punjenja, kretanje je obrnuto, ioni litija koji su pozitivno nabijeni kreću se s katode prema anodi.

3.4.2. Na-ion baterije

Na-ion baterije rade po istom principu kao i Li-ion, no umjesto litijevih iona kao nositelja naboja u čeliji, koriste natrijeve ione. Takve baterije imaju nekoliko prednosti nad ostalim (Marsh, 2020):

- Sigurnost – iako komercijalno dostupne Li-ion baterije jesu sigurne za upotrebu, kod Na-ion baterija ne postoji mogućnost zapaljenja zbog korištenja otopine soli u vodi kao elektrolit. Također, takve baterije ne koriste toksične metale poput Li-ion baterija i olovno-kiselinskih.
- Ekološki prihvatljive – kako Na-ion baterije ne sadrže toksične elemente te jednostavnije ih je reciklirati za razliku od ostalih baterija.
- Dugotrajnost – vijek trajanja Na-ion baterija dulji je nego kod većine drugih opcija na tržištu baterija, odnosno ne moraju se mijenjati često poput većine Li-ion baterija

Ono što sprječava proboj takvih baterija na tržištu je visoka cijena, koja je povezana s nižom energetske gustoćom nego Li-ion baterija što znači da je potrebno više materijala i više troška da bi se proizvele. Također, cijena litija je u zadnje dvije godine opala preko 70% (Trading Economics, 2020), te je jedan od razloga zašto su cijene Li-ion baterija u padu.



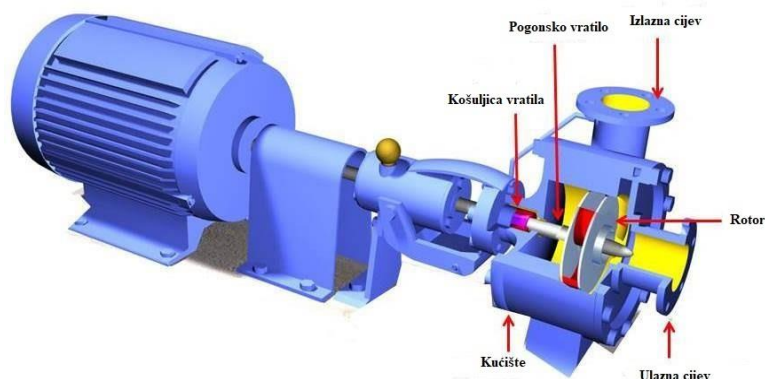
Slika 3-16. Punjenje (lijevo) i pražnjenje (desno) Na-ion baterije (BlueSky Energy, 2020)

U proračunima će se uzimati kapaciteti do 100 kWh, tehnologija Li-ion gdje je pad kapaciteta kroz godine zanemaren.

3.5. OSTALE KOMPONENTE SUSTAVA

3.5.1. Centrifugalne pumpe

Za cirkulaciju fluida kroz podzemne izmjenjivače koristi se tipična centrifugalna pumpa (Slika 3-14.) za vodu čija će se potrebna snaga izračunati pomoću RES2GEO.



Slika 3-17. Centrifugalna pumpa (Omar, 2018)

To su pumpe kroz koje tekućina protječe od smjera crpljenja prema tlačnoj strani djelovanjem centrifugalne sile, s radijalnim tokom strujanja, koja potiskuje tekućinu između lopatica jednog ili više rotora. Centrifugalne pumpe prikladne su za svaku namjenu osim za male količine i male brzine, te za tekućine koje imaju veliku viskoznost (Hidro-Metal, 2018).

3.5.2. Električni protočni grijač

Električni protočni grijači koriste visoki otpor materijala kroz koji prolazi struja što rezultira pretvaranjem električne energije u toplinsku. Takvi grijači su 100% učinkoviti jer sva toplina koja se stvara prelazi na fluid u koji je grijač utopljen. U proračunima je korišten električni grijač snage 70 kW.

3.6. TABLIČNI PRIKAZI ULAZNIH SNAGA I KAPACITETA U SIMULACIJE

U tablici 3-2 i 3-3 prikazani su ulazni podaci u simulacije i dobivene nominalne snage cirkulacijske pumpe i kompresora dizalice topline. Iz tablice vidimo da je s povećanjem ukupne duljine izmjenjivača smanjena nominalna snaga dizalice topline, odnosno kompresora zbog povećanja preuzete topline iz ležišta. Također, iz tablice se može vidjeti ovisnost snage cirkulacijske pumpe o ukupnoj duljini izmjenjivača (testovi 25 do 39) gdje uz manju duljinu, snaga raste zbog smanjene preuzete topline iz ležišta, odnosno pumpa mora ostvariti veći protok kako bi povukla dovoljno topline. Utjecaj snage fotonaponskih panela (TEST13 – TEST19) na snagu dizalice topline i cirkulacijske pumpe je zanemariv.

Tablica 3-2. Instalirane snage i kapaciteti sustava te duljine izmjenjivača

| Instalirane snage/kapaciteti | TEST1 | TEST2 | TEST3 | TEST4 | TEST5 | TEST6 | TEST7 | TEST8 | TEST9 | TEST10 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Snaga baterije, kW | 50 | 50 | 50 | 50 | 25 | 0 | 0 | 25 | 25 | 25 |
| Kapacitet baterije, kWh | 100 | 100 | 100 | 100 | 50 | 0 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| Snaga fotonaponskih panela, kW | 100 | 150 | 140 | 140 | 80 | 150 | 140 | 140 | 140 | 140 |
| Snaga grijača, kW | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Broj bušotina | 20 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Ukupna duljina izmjenjivača, m | 2000 | 2000 | 2000 | 1000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Nominalna snaga HP, kW | 16,85 | 16,71 | 16,74 | 20,51 | 16,91 | 16,71 | 16,74 | 16,73 | 16,73 | 16,73 |
| Nominalna snaga cirkulacijske pumpe, kW | 1,9 | 2,9 | 2,9 | 6,17 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |
| Instalirane snage/kapaciteti | TEST11 | TEST12 | TEST13 | TEST14 | TEST15 | TEST16 | TEST17 | TEST18 | TEST19 | TEST20 |
| Snaga baterije, kW | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kapacitet baterije, kWh | 80 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Snaga fotonaponskih panela, kW | 140 | 140 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| Snaga grijača, kW | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Broj bušotina | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Ukupna duljina izmjenjivača m | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Nominalna snaga HP kW | 16,73 | 16,73 | 17,08 | 17,13 | 16,97 | 16,91 | 16,85 | 16,79 | 16,74 | 16,69 |
| Nominalna snaga cirkulacijske pumpe kW | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |

Tablica 3-2. Instalirane snage i kapaciteti sustava te duljine izmjenjivača (nastavak)

| Instalirane snage/kapaciteti | TEST21 | TEST22 | TEST23 | TEST24 | TEST25 | TEST26 | TEST27 | TEST28 | TEST29 | TEST30 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Snaga baterije, kW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kapacitet baterije, kWh | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Snaga fotonaponskih panela, kW | 140 | 140 | 140 | 140 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 |
| Snaga grijača, kW | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Broj bušotina | 5 | 10 | 15 | 20 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Ukupna duljina izmjenjivača, m | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| Nominalna snaga HP, kW | 24,87 | 20,52 | 18,01 | 16,74 | 23,39 | 22,21 | 21,25 | 20,46 | 19,79 | 19,23 |
| Nominalna snaga cirkulacijske pumpe, kW | 2,45 | 6,17 | 3,86 | 2,9 | 12,71 | 9,7 | 7,63 | 6,16 | 5,27 | 4,83 |
| Instalirane snage/kapaciteti | TEST31 | TEST32 | TEST33 | TEST34 | TEST35 | TEST36 | TEST37 | TEST38 | TEST39 | TEST40 |
| Snaga baterije, kW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kapacitet baterije, kWh | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Snaga fotonaponskih panela, kW | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 145 | 150 |
| Snaga grijača, kW | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Broj bušotina | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 20 |
| Ukupna duljina izmjenjivača m | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | 2000 |
| Nominalna snaga HP kW | 18,74 | 18,33 | 17,96 | 17,65 | 17,37 | 17,12 | 16,91 | 16,71 | 16,53 | 16,7 |
| Nominalna snaga cirkulacijske pumpe kW | 4,46 | 4,14 | 3,86 | 3,62 | 3,41 | 3,22 | 3,05 | 2,9 | 2,76 | 2,9 |

4. FINANCIJSKA ANALIZA

Financijska izvedivost procjenjuje se financijskom analizom. Svrha financijske analize je koristiti predviđanje financijskog tijeka projekta za izračunavanje stope povrata ulaganja, odnosno utvrđivanje stupnja u kojem je projekt financijski izvediv za investitore. Financijska analiza projekta neizostavan je i najvažniji dio investicijskog istraživanja. Pouzdanost financijske analize ovisi o količini i točnosti informacija o projektu.

U financijskoj analizi ovog projekta, kao pokazatelji isplativosti koristiti će se neto sadašnja vrijednost (eng. *Net Present Value – NPV*) te interna stopa povrata (eng. *Internal Rate of Return*)

4.1. NETO SADAŠNJA VRIJEDNOST

Novac u sadašnjosti ima veću vrijednost nego ista količina novca u budućnosti zbog mogućnosti inflacije i mogućnosti ulaganja u druge projekte koji bi mogli biti profitabilniji. Diskontna stopa je faktor koji uzima u obzir tu razliku tijekom vremena. Neto sadašnja vrijednost razlika je između sadašnje vrijednosti prihoda i sadašnje vrijednosti rashoda tijekom određenog perioda. Računa se prema sljedećoj formuli:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (4-1)$$

Gdje su:

R_t – Razlika između prihoda i rashoda tijekom jednog perioda, HRK

i – Diskontna stopa, %

t – broj vremenskih razdoblja, -

Pozitivna neto sadašnja vrijednost indicira da će predviđeni prihodi, generirani projektom ili investicijom, u sadašnjoj vrijednosti novca, biti veći od predviđenih rashoda, također u sadašnjoj vrijednosti novca. Zato se pretpostavlja da će investicija s pozitivnom neto sadašnjom vrijednosti biti profitabilna, dok će ona s negativnom generirati gubitke. Stoga, samo projekti s pozitivnom vrijednošću bi se trebali uzeti u obzir (Kenton, 2020).

4.1.1. Mane neto sadašnje vrijednosti i njene alternative

Procjena profitabilnosti projekta koja se oslanja na NPV uvelike se temelji na pretpostavkama i procjenama, stoga postoji velika mogućnost za pogrešku. Procijenjeni faktori

uključuju troškove investicije, diskontnu stopu i povrate. Projekt bi mogao zahtijevati nepredviđene troškove kako bi se pokrenuo ili bi mogao zahtijevati dodatne troškove na kraju projekta.

Jednostavnija alternativa neto sadašnjoj vrijednosti je računanje vremena povrata investicije, odnosno vremena kada će investicija "biti na nuli". No, najveći problem s takvom metodom je što ne uračunava vremensku vrijednost novca poput neto sadašnje vrijednosti. Nadalje, metoda ignorira što se događa nakon povrata investicije, odnosno ignorira cjelokupnu profitabilnost projekta. (Kagan, 2020)

4.2. INTERNA STOPA POVRATA

Interna stopa povrata, kao i neto sadašnja vrijednost mjerilo je profitabilnosti potencijalnih investicija. Interna stopa povrata ustvari je diskontna stopa, pri kojoj neto sadašnja vrijednost ispada jednaka nuli (Hayes, 2020). Oslanja se na istu formulu kao i NPV:

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (4-2)$$

Gdje su:

C_t – Razlika između prihoda i rashoda tijekom jednog perioda, HRK

C_0 – Kapitalna investicija, HRK

IRR – Interna stopa povrata, %

t – broj vremenskih razdoblja, -

Kako bi se dobila interna stopa povrata, NPV mora biti jednak nuli te se iz gornje jednadžbe mora izračunati diskontna stopa, odnosno IRR. No, zbog kompleksnosti formule, IRR se ne može izračunati jednostavno analitički nego iterativno putem metode "pokušaj – pogreška" ili koristeći softver koji ga može izračunati. (Hayes, 2020)

4.3. KAPITALNI TROŠKOVI I OPERATIVNI TROŠKOVI

S obzirom da se radi o postojećim nekretninama s konvencionalnim sustavima grijanja i hlađenja (grijanje na prirodni plin i hlađenje pomoću klima uređaja), kapitalni troškovi su značajnije viši nego kada se energetska sustav izvodi paralelno s gradnjom nekretnine. Trenutačni sustavi grijanja u ulici su visokotemperaturni, te kao takvi nisu primjereni za grijanje pomoću dizalica topline, jer kompresor u dizalici topline bi značajno više rada morao uložiti kako bi nadoknadio razliku temperature između polaznog voda i temperature pridobivene iz bušotina. Stoga je nužno instalirati novi sustav grijanja u kućanstvima. Odabran je sustav s ventilokonvektorima, jer bi podno grijanje značajnije utjecalo na kapitalne troškove.

Kapitalni troškovi prikazani su u tablici 4-1. Za cijenu baterije uzeta je najniža cijena kompletne instalacije sustava, uključujući inverter i svu potrebnu opremu (EnergySage, 2020) u iznosu od 800 američkih dolara uz tečaj 1 USD = 6,36 HRK (kolovoz, 2020). Jedinična cijena fotonaponskih panela temeljena je na ponudi (Solar Shop, 2020) za fotonaponsku elektranu Huawei 100 kW sa svom potrebnom opremom, instalacijom i puštanjem u rad. Za cijenu provođenja novog sustava grijanja i hlađenja pomoću ventilokonvektora, u postojećim nekretninama, uzet je iznos od 200 kn/m² (Grozdek, 2015). Cijena zemljišta, trošak projekta, jedinična cijena bušotina, dizalice topline, grijača i centrifugalnih pumpi su pretpostavljeni.

Tablica 4-1. Kapitalni troškovi, kredit i poticaji

| Stavka | Iznos |
|---|--------------|
| <i>Trošak projekta: [HRK]</i> | 30.000,00 |
| <i>Jedinična cijena baterije: [HRK/kWh]</i> | 5.088,00 |
| <i>Jedinična cijena bušotine: [HRK/m]</i> | 355,00 |
| <i>Jedinična cijena fotonaponskih čelija: [HRK/kW]</i> | 5.950,00 |
| <i>Jedinična cijena dizalice topline: [HRK/kW]</i> | 5.000,00 |
| <i>Cijena instalacija grijanja/hlađenja po kućama: [HRK/Ulica]</i> | 1.000.000,00 |
| <i>Cijena grijača: [HRK/kW]</i> | 1.000,00 |
| <i>Jedinična cijena centrifugalnih pumpi: [HRK/kW]</i> | 4.000,00 |
| <i>Cijena raskopavanja, polaganja cijevi i asfaltiranja kanala ulice, [HRK]</i> | 100.000,00 |
| <i>Cijena zemljišta: [HRK]</i> | 376.500,00 |
| <i>Državni poticaji, %</i> | 30 |
| <i>Udio kredita u investiciji, %</i> | 80 |
| <i>Kamatna stopa, %</i> | 3 |
| <i>Period otplate kredita, broj godina</i> | 10 |
| <i>Diskontna stopa, %</i> | 6 |

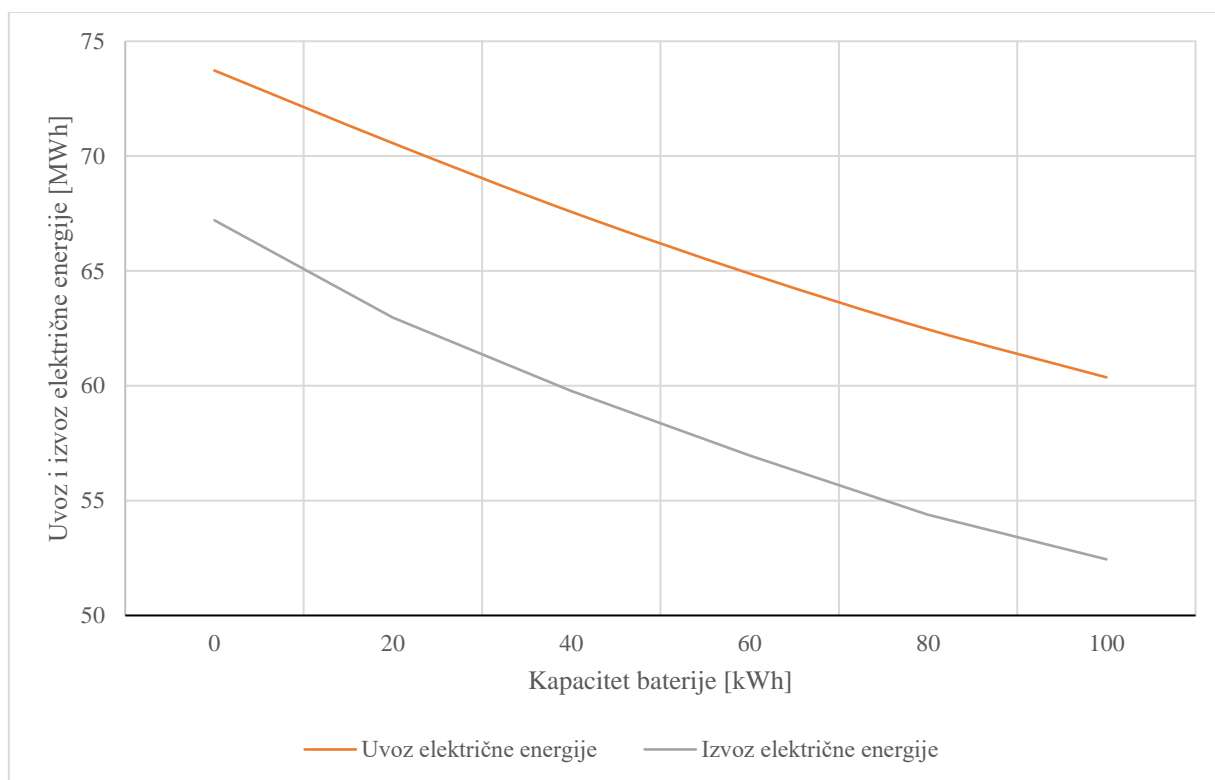
Godišnji prihodi temeljeni su na uštedama od zamjene plina kao energenta za grijanje, smanjene potrošnje električne energije iz mreže kao rezultat instalirane snage fotonaponskih panela te pretpostavljene izbjegnute tarife za proizvedeni CO₂ prilikom grijanja na plin koja bi krenula na naplatu od 2030. godine. Jedinične cijene električne energije i prirodnog plina, uz pretpostavljenu tarifu za CO₂ prikazane su u tablici 4-2. Jedan utrošeni kWh prirodnog plina rezultira s 0,22 kg CO₂ ispuštenih u atmosferu. Cijene plina preuzete su s računa za prvi kvartal 2020. godine, dok je za cijenu električne energije uzeta tarifa HEP Plavi. Za održavanje sustava predviđeni su jednaki troškovi kao i kod konvencionalnog sustava, te kao takvi nisu ulazili u prihode i rashode.

Tablica 4-2. Troškovi energenata, ispuštanja CO₂ i eskalacija cijene

| Stavka | Iznos |
|--|-------|
| <i>Električna energija, HRK/kWh</i> | 0,91 |
| <i>Prirodni plin, HRK/kWh</i> | 0,31 |
| <i>CO₂, HRK/kg</i> | 0,23 |
| <i>Godišnja eskalacija cijene prirodnog plina, %</i> | 1 |
| <i>Godišnja eskalacija cijene električne energije, %</i> | 0,5 |

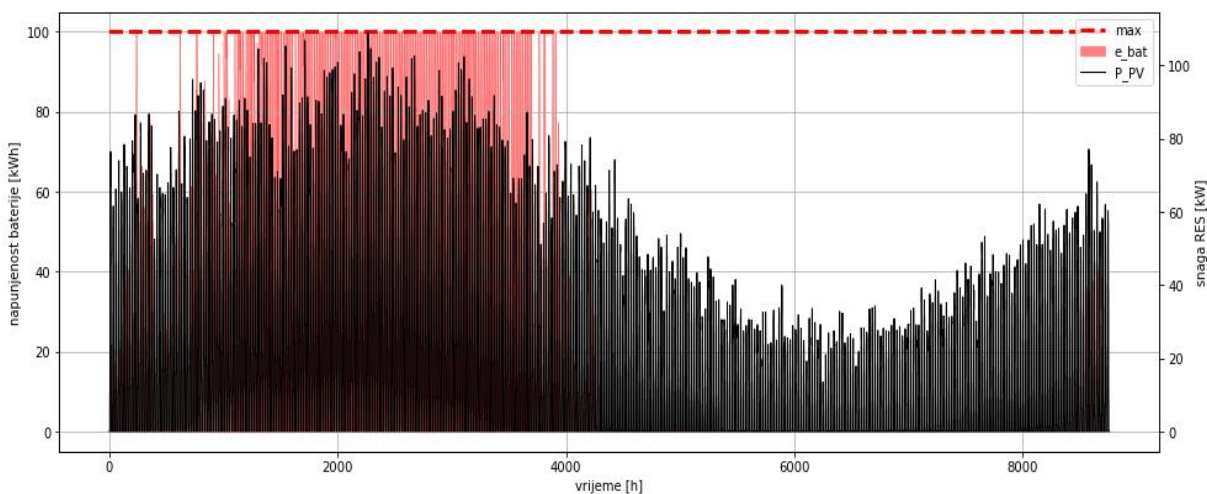
5. REZULTATI MODELIRANJA ENERGETSKIH TOKOVA

Ulazni podaci u proračune energetske tokova prikazani su u tablici 3-2. u poglavlju 3.6. Rezultati su prikazani u tablicama 5-1 i 5-2, gdje se redom vidi godišnja preuzeta energija iz baterije, ukupan godišnji uvoz električne energije, ukupna proizvedena energija iz fotonaponskih panela, potrošnja električnog grijača za rekuperaciju ležišta, potrošnja kompresora dizalice topline, potrošnja cirkulacijske pumpe, ukupna energija pohranjena u bateriju, ukupna potražnja za električnom energijom dobivena analizom potrošnje, izvoz električne energije u mrežu, te godišnja razlika između uvoza i izvoza. Crvenom bojom obojani su testovi u kojima je godišnji izvoz električne energije viši nego uvoz (TEST 6, 20 i 40), te tzv. *outlier* test (TEST 21) koji je proizveo nemoguće energetske tokove. U testovima 7 do 12 gdje je napravljena analiza osjetljivosti na kapacitet baterije u iznosu od 0 do 100 kWh, vidi se da je promjena godišnje razlike uvoza i izvoza minimalna, odnosno da su linije uvoza i izvoza gotovo paralelne (Slika 5-1).



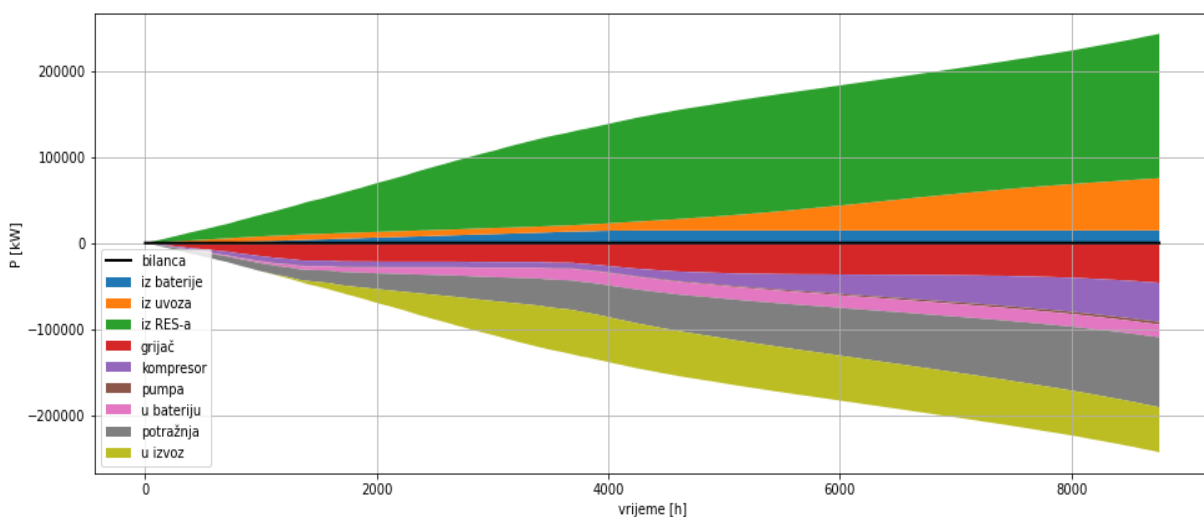
Slika 5-1. Ovisnost uvoza i izvoza električne energije o kapacitetu baterije uz 140 kW fotonaponskih panela i 2000 m ukupne duljine izmjenjivača

Također, na slici 5-2, koja prikazuje satnu napunjenost baterije kapaciteta 100 kWh kroz jednu godinu, s obzirom na satnu proizvodnju iz fotonaponskih panela snage 140 kW, vidi se da potencijal baterije nije iskorišten, odnosno da se baterija puni i prazni samo tijekom ljetnih mjeseci (simulacija počinje s četvrtim mjesecom u godini). Ta činjenica, kao i ona prikazana slikom 5-1, ukazuju na neisplativost baterijskog sustava, što će biti dokazano u financijskoj analizi.



Slika 5-2. Napunjenost baterije od 100 kWh kroz godinu u odnosu na proizvodnju električne energije iz fotonaponskih panela snage 140 kW

Na slici 5-3, prikazani su kulminirani energetske tokovi kroz godinu za isti slučaj kao i na slici 5-2, gdje se također vidi da kulminirani energetske tokovi u i iz baterije, rastu samo tijekom ljetnih mjeseci, te ostatak godine ostaju konstantni.



Slika 5-3. Kulminirani energetske tokovi, uz bateriju od 100 kWh, snagu fotonaponskih panela od 140 kW i duljinu izmjenjivača od 2000 m

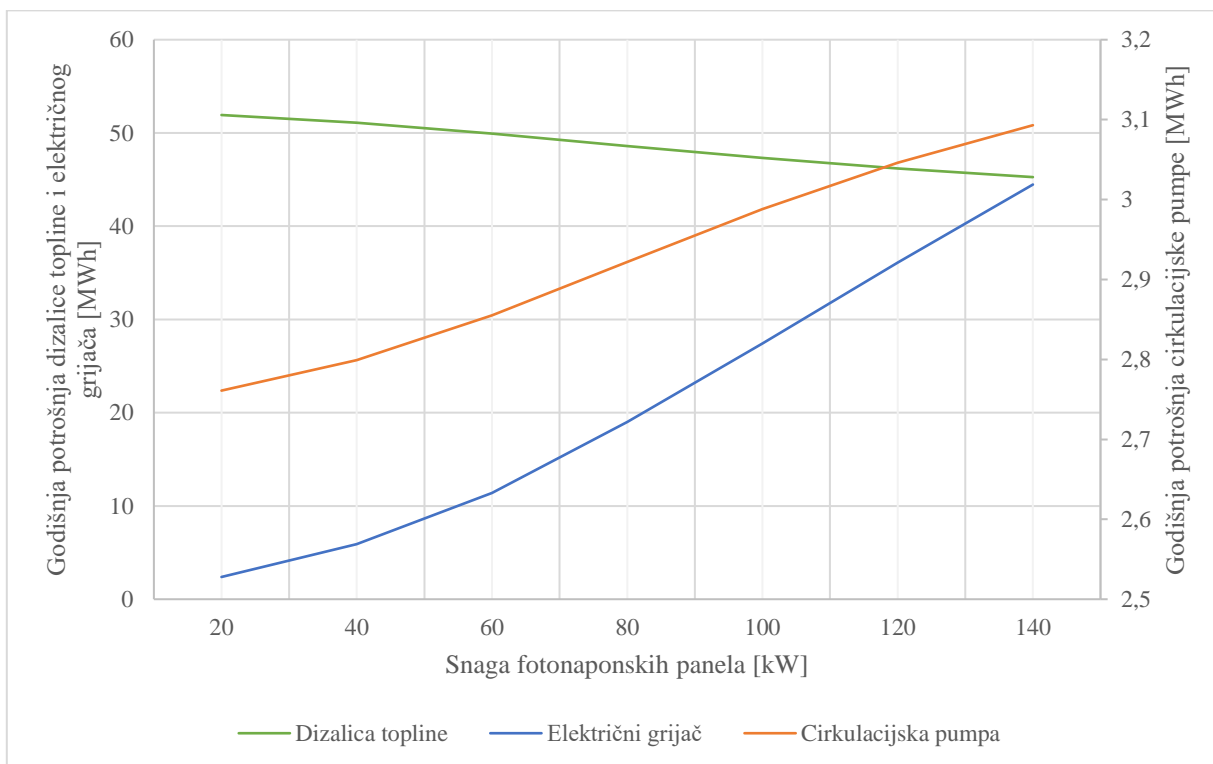
Tablica 5-1. Godišnji energetske tokovi dobiveni u RES2GEO

| STAVKA | TEST 1 | TEST 2 | TEST 3 | TEST 4 | TEST 5 | TEST 6 | TEST 7 | TEST 8 | TEST 9 | TEST 10 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh] | 11,489 | 15,488 | 14,675 | 17,881 | 5,514 | 0 | 0 | 4,065 | 7,277 | 10,004 |
| Uvoz električne energije iz mreže, [MWh] | 69,514 | 58,856 | 60,617 | 66,272 | 80,394 | 72,571 | 73,727 | 70,565 | 67,575 | 64,886 |
| Proizvedena energija iz fotonaponskih panela, [MWh] | 119,639 | 179,459 | 167,495 | 167,495 | 95,711 | 179,459 | 167,495 | 167,495 | 167,495 | 167,495 |
| Potrošnja električnog grijača, [MWh] | 27,864 | 50,734 | 46,281 | 37,577 | 19,464 | 48,573 | 44,466 | 45,403 | 45,594 | 45,547 |
| Potrošnja kompresora, [MWh] | 47,489 | 44,712 | 45,206 | 47,442 | 48,59 | 44,831 | 45,266 | 45,169 | 45,164 | 45,162 |
| Potrošnja cirkulacijske pumpe, [MWh] | 2,978 | 3,122 | 3,096 | 12,05 | 2,923 | 3,116 | 3,093 | 3,098 | 3,099 | 3,099 |
| Energija pohranjena u bateriju, [MWh] | 11,473 | 15,725 | 14,819 | 18,179 | 5,409 | 0 | 0 | 4,292 | 7,52 | 10,422 |
| Potražnja za električnom energijom bez dizalica topline, [MWh] | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 |
| Izvoz električne energije u mrežu, [MWh] | 29,662 | 58,315 | 52,189 | 55,205 | 24,046 | 74,32 | 67,207 | 62,974 | 59,781 | 56,966 |
| Razlika uvoza i izvoza, [MWh] | 39,852 | 0,541 | 8,428 | 11,067 | 56,348 | -1,749 | 6,52 | 7,591 | 7,794 | 7,92 |
| STAVKA | TEST 11 | TEST 12 | TEST 13 | TEST 14 | TEST 15 | TEST 16 | TEST 17 | TEST 18 | TEST 19 | TEST 20 |
| Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh] | 12,462 | 14,606 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Uvoz električne energije iz mreže, [MWh] | 62,457 | 60,368 | 116,579 | 102,068 | 92,34 | 85,386 | 80,295 | 76,552 | 73,727 | 71,555 |
| Proizvedena energija iz fotonaponskih panela, [MWh] | 167,495 | 167,495 | 23,927 | 47,855 | 71,783 | 95,711 | 119,639 | 143,567 | 167,495 | 191,423 |
| Potrošnja električnog grijača, [MWh] | 45,559 | 45,547 | 2,387 | 5,901 | 11,408 | 19,012 | 27,436 | 36,096 | 44,466 | 52,507 |
| Potrošnja kompresora, [MWh] | 45,162 | 45,163 | 51,926 | 51,107 | 49,944 | 48,603 | 47,31 | 46,191 | 45,266 | 44,427 |
| Potrošnja cirkulacijske pumpe, [MWh] | 3,099 | 3,099 | 2,761 | 2,799 | 2,855 | 2,922 | 2,988 | 3,046 | 3,093 | 3,137 |
| Energija pohranjena u bateriju, [MWh] | 13,015 | 15,027 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potražnja za električnom energijom bez dizalica topline, [MWh] | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 |
| Izvoz električne energije u mrežu, [MWh] | 54,391 | 52,444 | 2,243 | 8,926 | 18,727 | 29,371 | 41,011 | 53,597 | 67,207 | 81,718 |
| Razlika uvoza i izvoza, [MWh] | 8,066 | 7,924 | 114,336 | 93,142 | 73,613 | 56,015 | 39,284 | 22,955 | 6,52 | -10,163 |

Tablica 5-1. Godišnji energetske tokovi dobiveni u RES2GEO (nastavak)

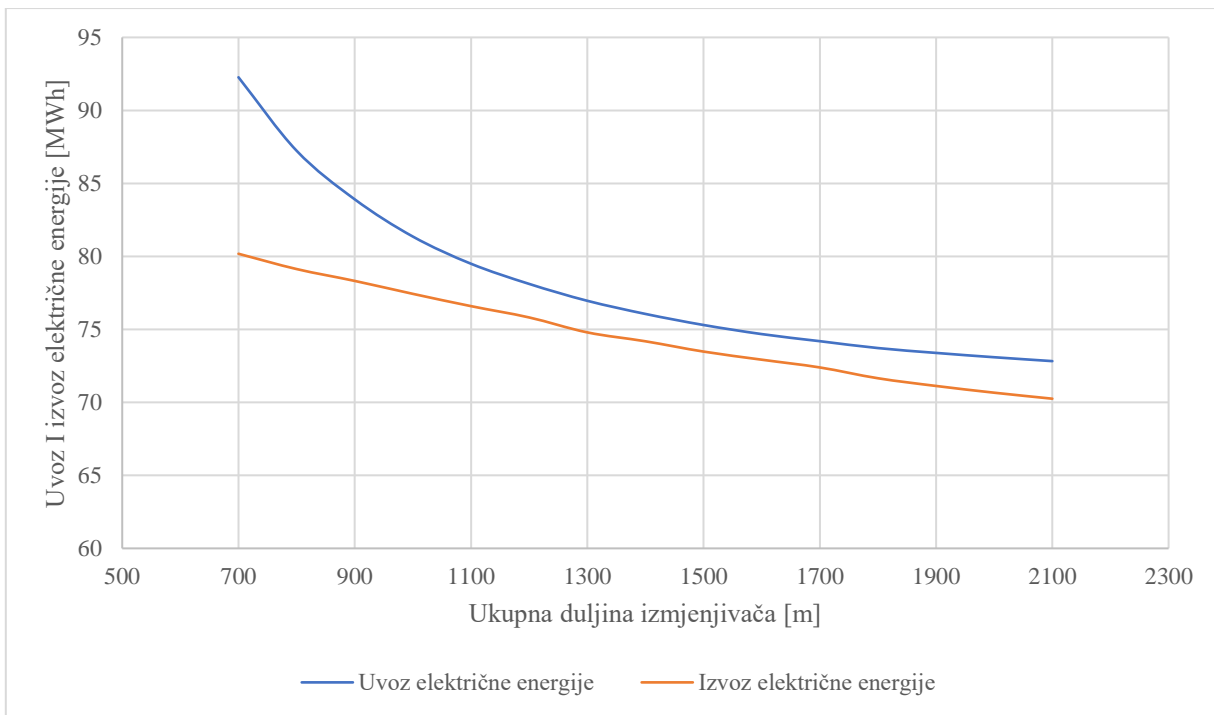
| STAVKA | TEST 21 | TEST 22 | TEST 23 | TEST 24 | TEST 25 | TEST 26 | TEST 27 | TEST 28 | TEST 29 | TEST 30 |
|--|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Uvoz električne energije iz mreže, [MWh] | 3,50964E+11 | 82,45 | 76,069 | 73,727 | 92,267 | 87,238 | 83,908 | 81,357 | 79,497 | 78,115 |
| Proizvedena energija iz fotonaponskih panela, [MWh] | 167495 | 167,495 | 167,495 | 167,495 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 |
| Potrošnja električnog grijača, [MWh] | 23307 | 34,979 | 40,837 | 44,466 | 31,278 | 33,682 | 35,431 | 36,997 | 38,411 | 39,621 |
| Potrošnja kompresora, [MWh] | 50385 | 47,717 | 46,031 | 45,266 | 48,86 | 47,96 | 47,585 | 47,105 | 46,734 | 46,504 |
| Potrošnja cirkulacijske pumpe, [MWh] | 3,50964E+11 | 11,999 | 5,446 | 3,093 | 24,245 | 18,761 | 14,869 | 12,119 | 10,057 | 8,469 |
| Energija pohranjena u bateriju, [MWh] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potražnja za električnom energijom bez dizalica topline, [MWh] | 81194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 |
| Izvoz električne energije u mrežu, [MWh] | 78736 | 74,062 | 70,059 | 67,207 | 80,179 | 79,133 | 78,32 | 77,435 | 76,592 | 75,818 |
| Razlika uvoza i izvoza, [MWh] | 3,50964E+11 | 8,388 | 6,01 | 6,52 | 12,088 | 8,105 | 5,588 | 3,922 | 2,905 | 2,297 |
| STAVKA | TEST 31 | TEST 32 | TEST 33 | TEST 34 | TEST 35 | TEST 36 | TEST 37 | TEST 38 | TEST 39 | TEST 40 |
| Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Uvoz električne energije iz mreže, [MWh] | 76,96 | 76,06 | 75,302 | 74,679 | 74,192 | 73,722 | 73,389 | 73,093 | 72,826 | 72,557 |
| Proizvedena energija iz fotonaponskih panela, [MWh] | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 173,477 | 179,459 |
| Potrošnja električnog grijača, [MWh] | 41,099 | 41,958 | 42,928 | 43,718 | 44,432 | 45,354 | 46,015 | 46,597 | 47,122 | 48,699 |
| Potrošnja kompresora, [MWh] | 46,108 | 45,95 | 45,715 | 45,51 | 45,385 | 45,185 | 45,015 | 45,024 | 44,929 | 44,808 |
| Potrošnja cirkulacijske pumpe, [MWh] | 7,255 | 6,265 | 5,475 | 4,824 | 4,28 | 3,828 | 3,438 | 3,106 | 2,82 | 3,117 |
| Energija pohranjena u bateriju, [MWh] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potražnja za električnom energijom bez dizalica topline, [MWh] | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 | 81,194 |
| Izvoz električne energije u mrežu, [MWh] | 74,796 | 74,185 | 73,481 | 72,925 | 72,394 | 71,653 | 71,126 | 70,664 | 70,253 | 74,213 |
| Razlika uvoza i izvoza, [MWh] | 2,164 | 1,875 | 1,821 | 1,754 | 1,798 | 2,069 | 2,263 | 2,429 | 2,573 | -1,656 |

Testovima 13 do 19, gdje je rađena analiza osjetljivosti na instaliranu snagu fotonaponskih panela, vidi se da viša snaga direktno utječe na manji uvoz električne energije. Također, s povećanom snagom fotonaponskih panela, smanjuje se potrošnja dizalice topline, odnosno povećava potrošnja grijača i cirkulacijske pumpe, jer se viškovi električne energije pohranjuju kao toplinska u ležište (Slika 5-2).

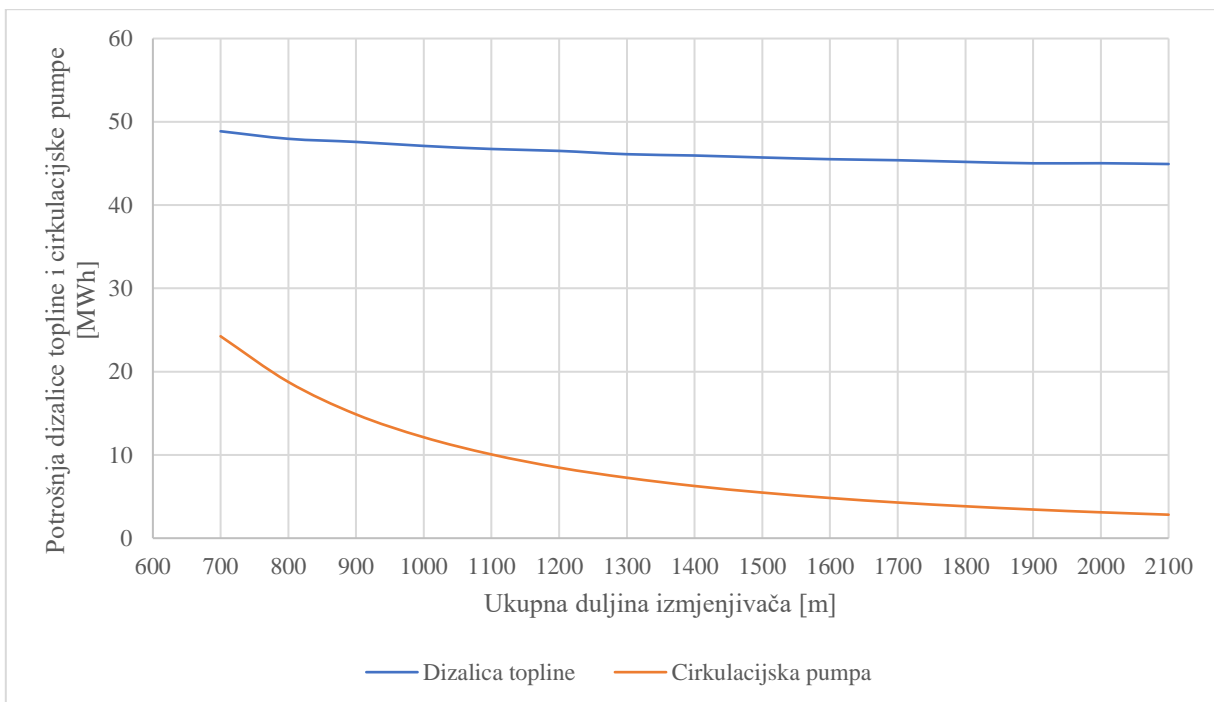


Slika 5-4. Ovisnost godišnje potrošnje električne energije dizalice topline, cirkulacijske pumpe i električnog grijača o instaliranoj snazi fotonaponskih panela, uz 2000 m

Testovima 25 do 39, gdje je rađena analiza osjetljivosti na ukupnu duljinu podzemnog izmjenjivača, vidi se da izvoz električne energije s duljim izmjenjivačem opada gotovo linearno, dok se uvoz električne energije smanjuje, no pad se smanjuje s povećanjem duljine (Slika 5-3). Također istim testovima prikazana je ovisnost potrošnje cirkulacijske pumpe i dizalice topline o duljini podzemnog izmjenjivača (Slika 5-4).



Slika 5-5. Ovisnost godišnjeg uvoza i izvoza električne energije u duljini izmjenjivača, uz 145 kW snage fotonaponskih panela



Slika 5-6. Ovisnost godišnje potrošnje električne energije dizalice topline i cirkulacijske pumpe o duljini podzemnog izmjenjivača, uz 145 kW snage fotonaponskih panela

6. REZULTATI FINANCIJSKE ANALIZE I ANALIZE OSJETLJIVOSTI

Kao što je navedeno u poglavlju 4., za procjenu isplativosti sustava korišteni su neto sadašnja vrijednost i interna stopa povrata. U tablici 6.1. prikazani su dobiveni rezultati.

Tablica 6-1. Rezultati neto sadašnje vrijednosti i interne stope povrata

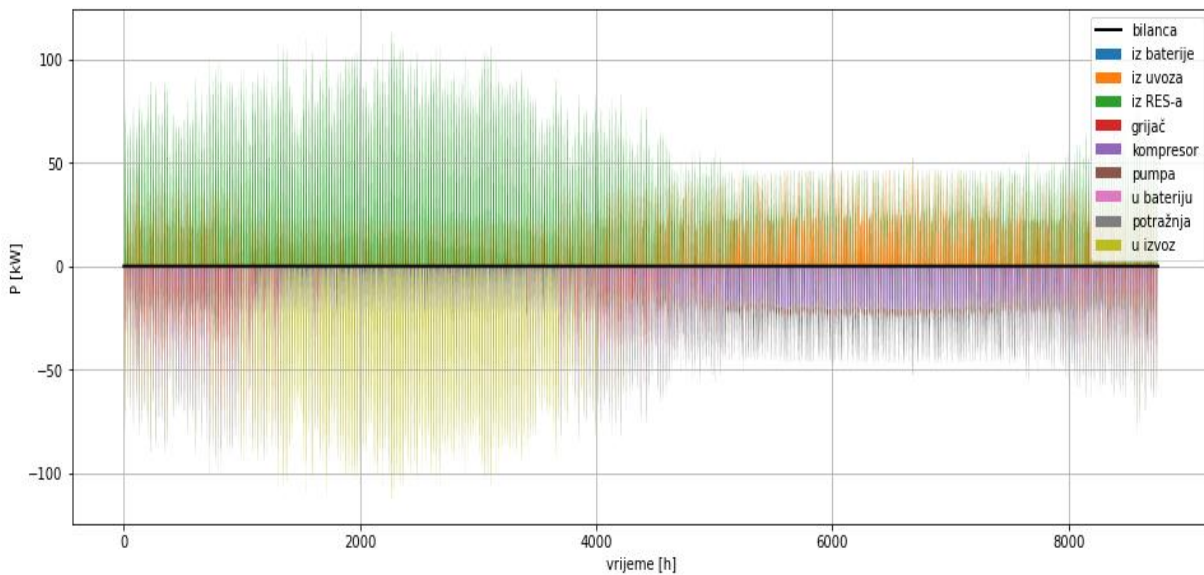
| TEST | NPV, [HRK] | IRR, [%] | TEST | NPV, [HRK] | IRR, [%] |
|---------|------------|----------|---------|------------|----------|
| TEST 1 | -427.937 | 0,64% | TEST 21 | -2,E+12 | - |
| TEST 2 | -304.440 | 2,42% | TEST 22 | 67.284 | 7,07% |
| TEST 3 | -329.694 | 2,08% | TEST 23 | 9.172 | 6,14% |
| TEST 4 | -193.538 | 3,46% | TEST 24 | -74.084 | 4,96% |
| TEST 5 | -363.928 | 0,93% | TEST 25 | 59.442 | 6,96% |
| TEST 6 | -46.235 | 5,36% | TEST 26 | 78.006 | 7,26% |
| TEST 7 | -74.084 | 4,96% | TEST 27 | 84.515 | 7,35% |
| TEST 8 | -129.863 | 4,24% | TEST 28 | 83.586 | 7,33% |
| TEST 9 | -179.773 | 3,64% | TEST 29 | 76.857 | 7,21% |
| TEST 10 | -229.159 | 3,10% | TEST 30 | 66.230 | 7,03% |
| TEST 11 | -278.681 | 2,58% | TEST 31 | 52.077 | 6,80% |
| TEST 12 | -326.248 | 2,12% | TEST 32 | 38.697 | 6,59% |
| TEST 13 | -466.531 | -1,80% | TEST 33 | 23.550 | 6,35% |
| TEST 14 | -379.480 | -0,14% | TEST 34 | 8.271 | 6,12% |
| TEST 15 | -303.234 | 1,23% | TEST 35 | -7.890 | 5,89% |
| TEST 16 | -240.340 | 2,33% | TEST 36 | -25.702 | 5,63% |
| TEST 17 | -183.333 | 3,28% | TEST 37 | -43.124 | 5,39% |
| TEST18 | -129.056 | 4,13% | TEST 38 | -60.419 | 5,15% |
| TEST 19 | -74.084 | 4,96% | TEST 39 | -77.631 | 4,93% |
| TEST 20 | -17.427 | 5,76% | TEST 40 | -46.843 | 5,35% |

Iz razloga navedenih u poglavlju 5., testovi 6, 12, 21 i 40 nisu uzeti u daljnje razmatranje. Gledajući neto sadašnju vrijednost, najisplativiji model dobiven je testom 27 u kojem prema tablici 6-1, neto sadašnja vrijednost u razdoblju od 25 godina iznosi 84,515 HRK uz internu stopu povrata od 7.35%. Model 27 nema bateriju, ukupna duljina izmjenjivača mu je 900 metara, instalirana snaga fotonaponskih panela je 145 kW, potrebna snaga dizalice topline iznosi 21.25 kW, dok je snaga cirkulacijske pumpe 7.63 kW. U tablici 6-2 prikazan je novčani tok modela 27. U tablici u stupcu kumulativna neto dobit, koja je diskontirana vidi se da se očekivani povrat investicije ostvaruje u 14. godini. Treba napomenuti da profitabilnost ovog modela i svih drugih s pozitivnom neto sadašnjom vrijednošću, direktno ovisi o instaliranoj snazi fotonaponskih panela. Uz istu ukupnu duljinu podzemnog izmjenjivača, ali bez proizvodnje električne energije, neto sadašnja vrijednost ispada -508,300 HRK.

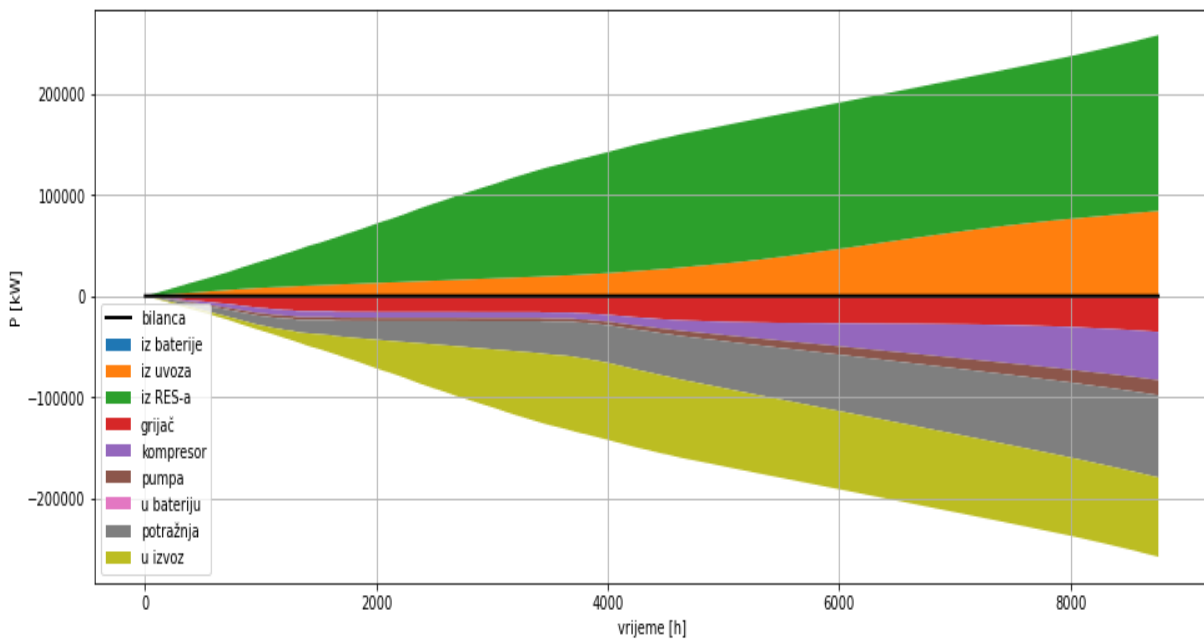
Tablica 6-2. Novčani tok modela 27 u HRK

| Godina | Vlastiti kapital | IPMT | PPMT | Godišnja rata | Ušteda na plinu | Ušteda na električnoj energiji | Ušteda na CO ₂ | Ukupna ušteda | Neto dobit | Neto dobit diskontirana | Kumulativna neto dobit |
|--------|------------------|--------|---------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|------------|-------------------------|------------------------|
| 0 | -405.373 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -405.373 | -405.373 | -405.373 |
| 1 | | 48.645 | 141.443 | 190.088 | 118.424 | 68.775 | 0 | 187.199 | -2.889 | -2.726 | -408.098 |
| 2 | | 44.401 | 145.687 | 190.088 | 119.608 | 69.119 | 0 | 188.727 | -1.361 | -1.211 | -409.310 |
| 3 | | 40.031 | 150.057 | 190.088 | 120.804 | 69.464 | 0 | 190.269 | 181 | 152 | -409.158 |
| 4 | | 35.529 | 154.559 | 190.088 | 122.012 | 69.812 | 0 | 191.824 | 1.736 | 1.375 | -407.783 |
| 5 | | 30.892 | 159.196 | 190.088 | 123.233 | 70.161 | 0 | 193.393 | 3.305 | 2.470 | -405.313 |
| 6 | | 26.116 | 163.972 | 190.088 | 124.465 | 70.512 | 0 | 194.977 | 4.888 | 3.446 | -401.867 |
| 7 | | 21.197 | 168.891 | 190.088 | 125.710 | 70.864 | 0 | 196.574 | 6.486 | 4.313 | -397.554 |
| 8 | | 16.131 | 173.958 | 190.088 | 126.967 | 71.219 | 0 | 198.185 | 8.097 | 5.080 | -392.474 |
| 9 | | 10.912 | 179.176 | 190.088 | 128.236 | 71.575 | 0 | 199.811 | 9.723 | 5.755 | -386.719 |
| 10 | | 5.537 | 184.552 | 190.088 | 129.519 | 71.932 | 0 | 201.451 | 11.363 | 6.345 | -380.374 |
| 11 | | | | | 130.814 | 72.292 | 18.833 | 221.939 | 221.939 | 116.915 | -263.459 |
| 12 | | | | | 132.122 | 72.654 | 18.833 | 223.609 | 223.609 | 111.127 | -152.332 |
| 13 | | | | | 133.443 | 73.017 | 18.833 | 225.293 | 225.293 | 105.626 | -46.706 |
| 14 | | | | | 134.778 | 73.382 | 18.833 | 226.993 | 226.993 | 100.399 | 53.693 |
| 15 | | | | | 136.125 | 73.749 | 18.833 | 228.708 | 228.708 | 95.432 | 149.125 |
| 16 | | | | | 137.487 | 74.118 | 18.833 | 230.438 | 230.438 | 90.711 | 239.836 |
| 17 | | | | | 138.862 | 74.488 | 18.833 | 232.183 | 232.183 | 86.225 | 326.061 |
| 18 | | | | | 140.250 | 74.861 | 18.833 | 233.944 | 233.944 | 81.961 | 408.021 |
| 19 | | | | | 141.653 | 75.235 | 18.833 | 235.721 | 235.721 | 77.909 | 485.930 |
| 20 | | | | | 143.069 | 75.611 | 18.833 | 237.514 | 237.514 | 74.058 | 559.988 |
| 21 | | | | | 144.500 | 75.989 | 18.833 | 239.322 | 239.322 | 70.398 | 630.386 |
| 22 | | | | | 145.945 | 76.369 | 18.833 | 241.147 | 241.147 | 66.920 | 697.306 |
| 23 | | | | | 147.404 | 76.751 | 18.833 | 242.989 | 242.989 | 63.614 | 760.920 |
| 24 | | | | | 148.878 | 77.135 | 18.833 | 244.846 | 244.846 | 60.472 | 821.391 |
| 25 | | | | | 150.367 | 77.520 | 18.833 | 246.721 | 246.721 | 57.486 | 878.877 |

Na slikama 6-1 i 6-2 prikazani su satni i kulminirani energetske tokovi modela 27 kroz godinu.



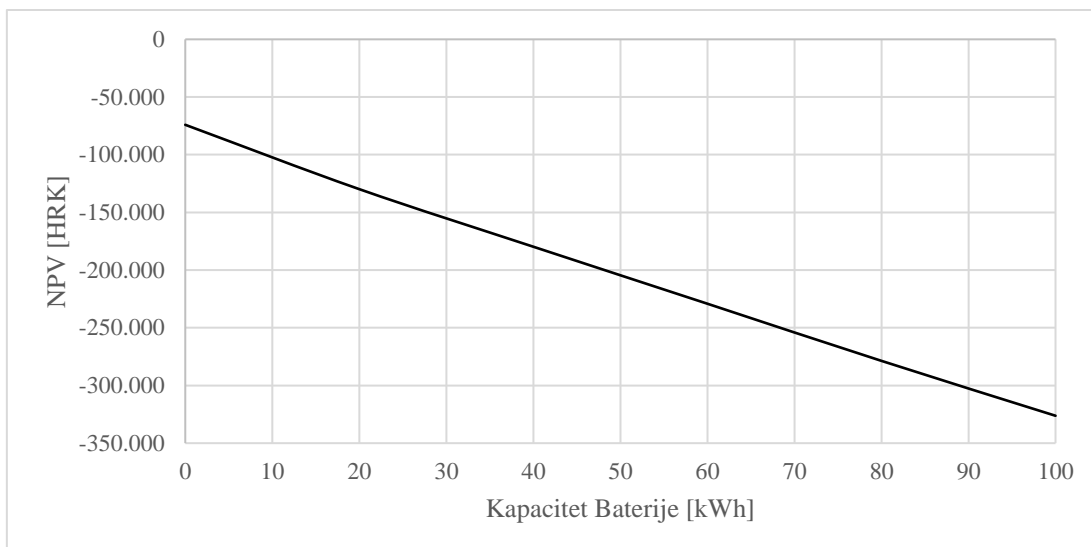
Slika 6-1. Energetske tokovi modela 27



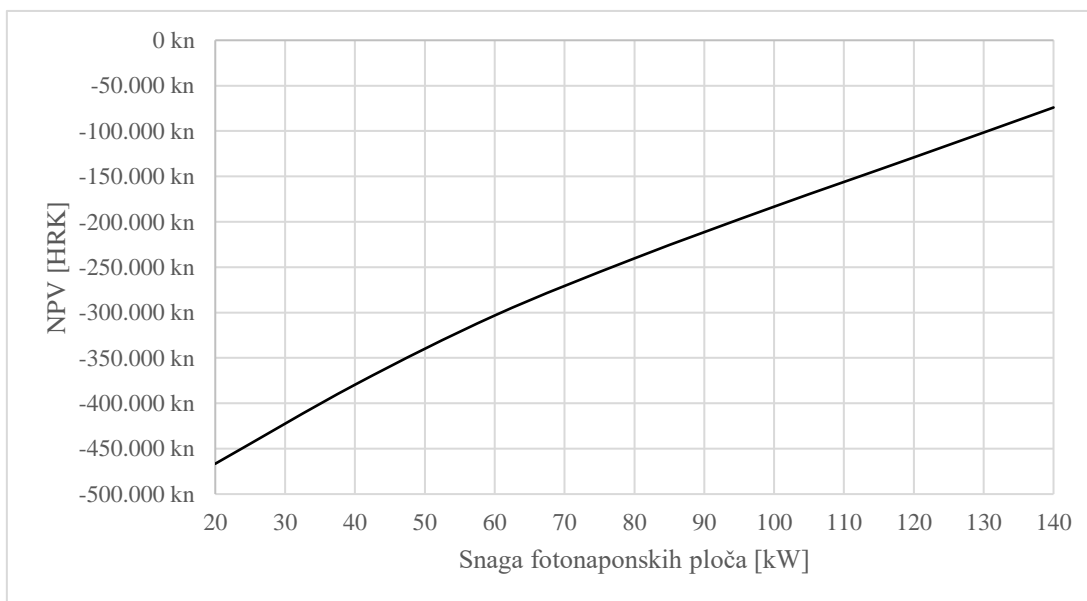
Slika 6-2. Kulminirani energetske tokovi modela 27

6.1. FINANCIJSKE ANALIZE OSJETLJIVOSTI

Na slikama 6-1 i 6-2 prikazane su promjene neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o instaliranom kapacitetu baterije i instaliranoj snazi fotonaponskih panela. Analize su napravljene prema testovima 7 – 12 za osjetljivost na bateriju i testovima 13 – 19 za osjetljivost na fotonaponske panele.

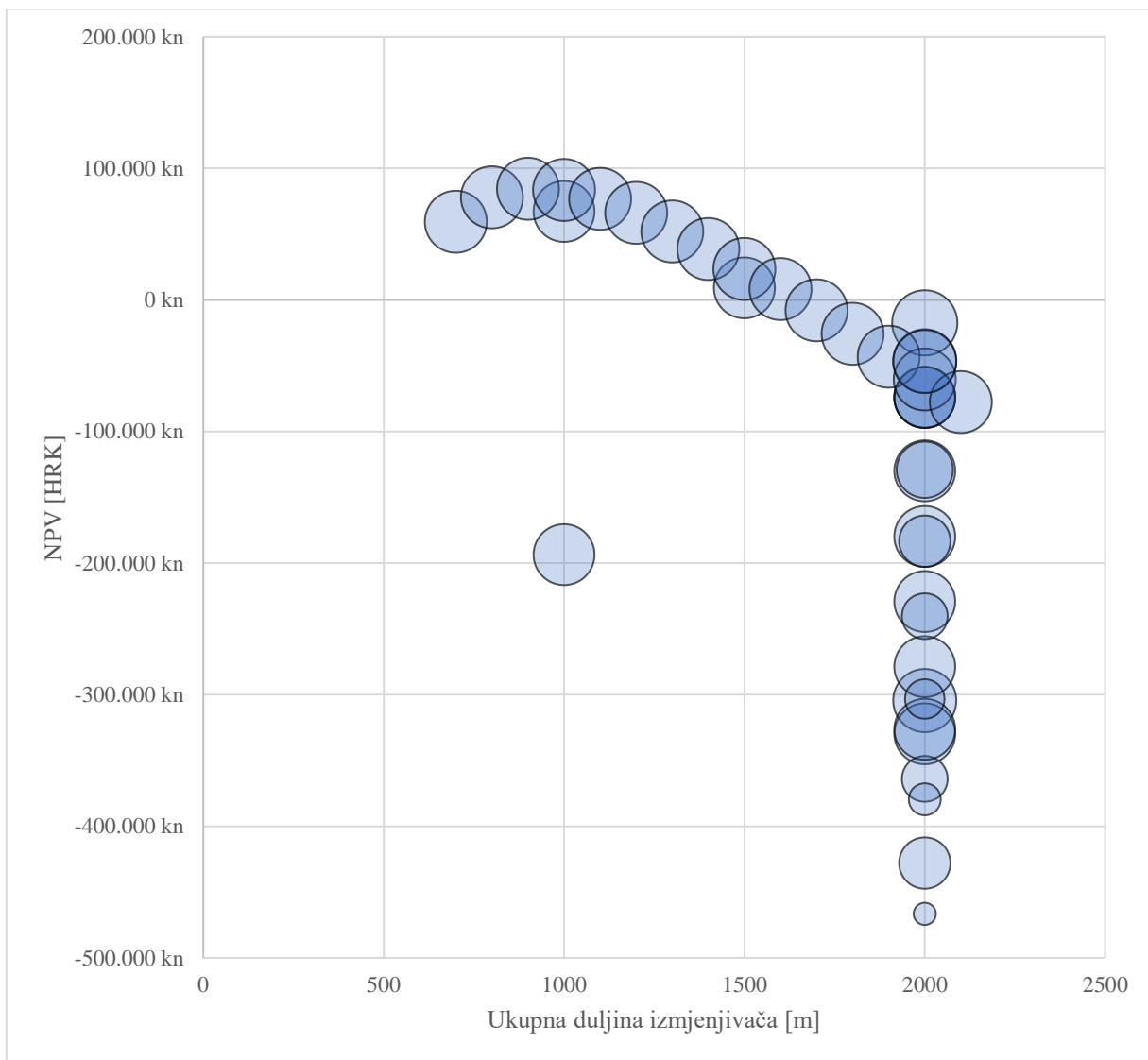


Slika 6-3. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i 140 kW fotonaponskih panela



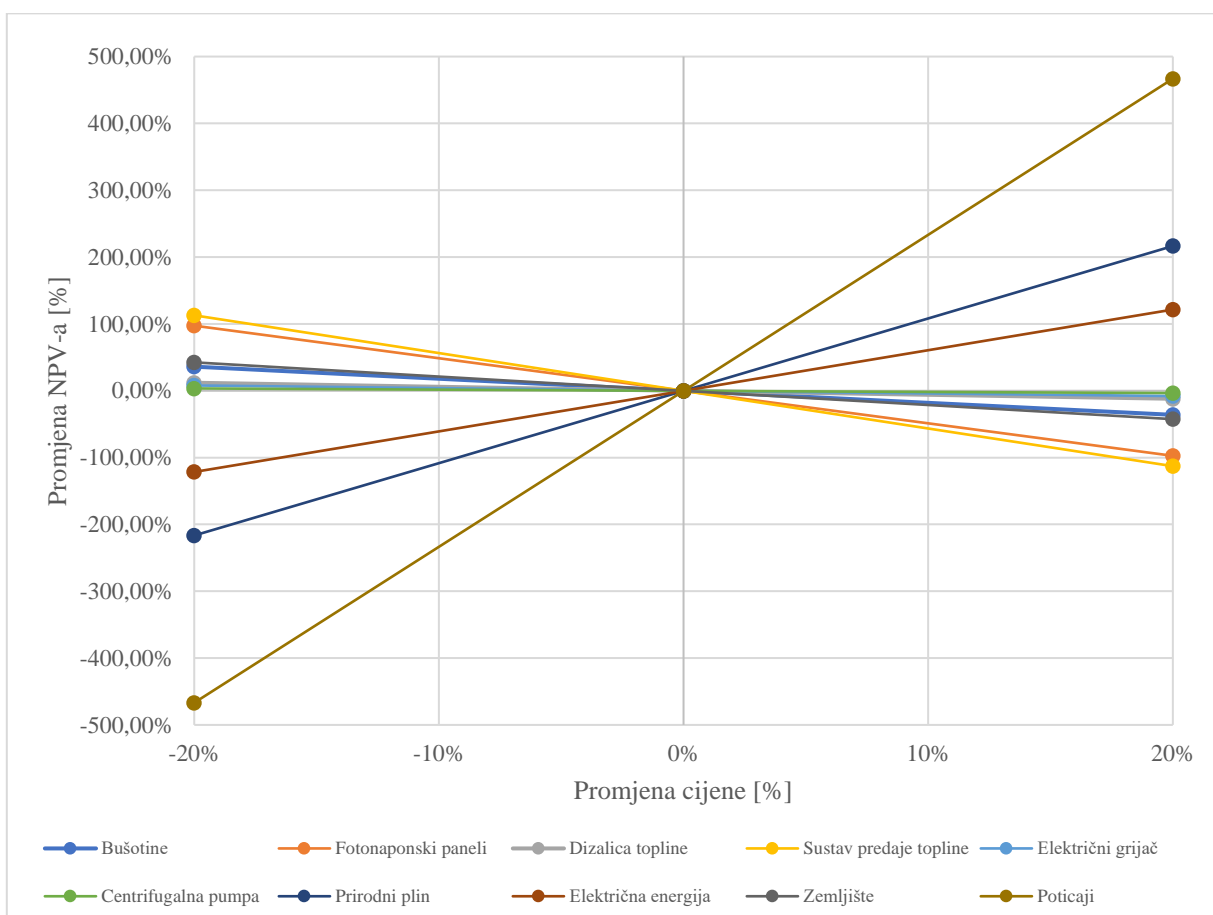
Slika 6-4. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i bez baterije

Iz priloženih slika vidi se da je baterija neisplativa u bilo kojem kapacitetu, odnosno s porastom kapaciteta neto sadašnja vrijednost opada, dok je isplativost fotonaponskih panela veća s povećanjem instalirane snage. Na slici 6-3 prikazan je raspršeni graf koji prikazuje ovisnost neto sadašnje vrijednosti o ukupnoj duljini izmjenjivača, gdje površina krugova predstavlja instaliranu snagu fotonaponskih panela. Sa slike vidimo da je NPV najviši pri ukupnim duljinama od 700 do 1200 metara, uz najveću instaliranu snagu (145 kW) fotonaponskih panela.



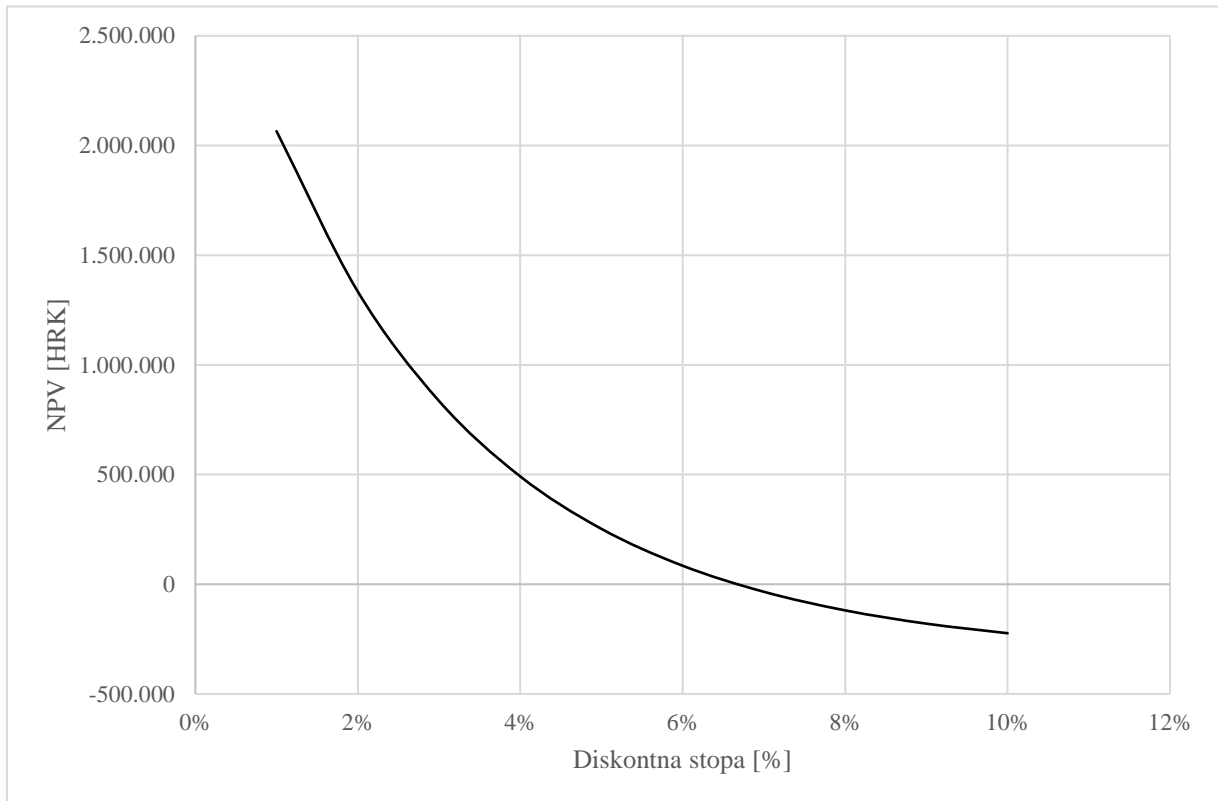
Slika 6-5. Ovisnost neto sadašnje vrijednosti od ukupnoj duljini izmjenjivača i instaliranoj snazi fotonaponskih panela

Na slici 6-4 prikazana je analiza osjetljivosti neto sadašnje vrijednosti na +/- 20 % promjenu cijene određenih kapitalnih troškova i cijene energenata, a na slici 6-5 prikazana je osjetljivost neto sadašnje vrijednosti na promjenu diskontne stope. Analiza je napravljena na modelu 27. Iz slike vidimo da najveći utjecaj na neto sadašnju vrijednost ima udio poticaja za realizaciju projekta, čak 466% uz povećanje ili smanjenje poticaja s 30% za 20%. Nakon poticaja najveći utjecaj imaju cijene prirodnog plina i električne energije. Promjena cijene prirodnog plina od 20% rezultira s čak 216% promjenom neto sadašnje vrijednosti, dok promjena cijene električne energije za 20% rezultira s 121 % promjenom neto sadašnje vrijednosti. Sljedeći najveći utjecaj na neto sadašnju vrijednost ima sustav predaje topline (112%), te nakon njega cijena fotonaponskih panela (97%).



Slika 6-6. Analiza osjetljivosti na kapitalne troškove i cijenu energenata

Iz slike 6-5 vidi se da blago povećanje diskontne stope rezultira eksponencijalnim rastom profitabilnosti projekta, gdje pri diskontnoj stopi nižoj od 2,5%, neto sadašnja vrijednost prelazi milijun HRK.



Slika 6-7. Promjena NPV-a u odnosu na diskontnu stopu

7. ZAKLJUČAK

Iako je kapitalna investicija visoka, iz financijske analize vidi se da je projekt u razdoblju od 25 godina isplativ, s povratom investicije u četrnaestoj godini, ali samo uz državne poticaje jer je cijena provoda novog sustava predaje/preuzimanja topline u postojećim kućama previsoka, a potrebno je i kupiti određenu površinu zemljišta na kojem bi se projekt realizirao, što ga razlikuje od tipičnih projekata s geotermalnim dizalicama topline na novim nekretninama. Također, sustav geotermalne dizalice topline za grijanje i hlađenje u ovakvom projektu bez fotonaponskih panela nije isplativ, stoga je nužno instalirati određenu snagu panela kako bi se uvoz električne energije minimizirao. Ono što bi povisilo neto sadašnju vrijednost projekta je prestanak subvencioniranja potrošnje električne energije, što je prikazano u analizi osjetljivosti na slici 6-4. Nadalje, uz skori prestanak regulacije cijena prirodnog plina, moguće je povećanje cijene za konačnog kupca, što bi također podiglo isplativost projekta. Uz financijske prednosti ovakvog sustava, treba napomenuti da bi ulica, ako zanemarimo automobile, bila odgovorna za minimalan iznos stakleničkih plinova, odnosno samo za onoliko koliko ih se proizvelo u energetsom miks električne energije iz uvoza.

8. POPIS LITERATURE

1. Banks, D., 2012., An introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, 2nd Edition, ISBN: 978-0-470-67034-7, Chichester, Velika Britanija
2. Jovanovac, I., 2016., *Mikromreže*, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek
3. Kappelmayer, O.; Haenel, R. 1974. Geothermics with Special Reference to Application, Gebruder Borntraeger, Berlin, ISBN: 3443130062
4. Kavanaugh, S.P.; Rafferty, K. 1997. *Ground-source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*. American Society of Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
5. Kurevija, T. (2010): *Energetsko Vrednovanje Plitkih Geotermalnih Potencijala Republike Hrvatske*, Doktorski rad, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

INTERNET IZVORI

6. BlueSky Energy, 2021., GREENROCK Saltwater Battery, URL: https://www.bluesky-energy.eu/en/saltwater_battery/ (27.8.2020.)
7. Dhar, M., 2017., How Do Solar Panels Work?, URL: <https://www.livescience.com/41995-how-do-solar-panels-work.html#:~:text=Simply%20put%2C%20a%20solar%20panel,they%20convert%20sunlight%20into%20electricity.> (27.8.2020.)
8. DPY MERCANTILE INC., 2015., Deron Chilled / Ground Water to Water Heat Pump, URL: <http://www.dpymercantile.com/DeronWS%20TEST.html>
9. Ecoforest, 2020., Heat Pump, URL: <https://ecoforest.com/en/heat-pumps> (27.8.2020.)
10. Energetski certifikat, 2020., Što je energetski razred zgrade?, URL: <https://energetski-certifikat.hr/energetski-razred/> (20.8.2020.)
11. EnergySage, 2020., How much does solar storage cost? Understanding solar battery prices, URL: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-do-solar-batteries-cost/> (27.8.2020.)
12. Evans, P., 2017., How Thermostatic Expansion Valves Work, URL: <https://theengineeringmindset.com/thermostatic-expansion-valves-work/> (17.8.2020.)

13. Evans, P., 2018., Heat Pump Explained, URL: <https://theengineeringmindset.com/heat-pumps-explained/> (17.8.2020.)
14. Evans, P., 2017., How Inverters Work, URL: <https://theengineeringmindset.com/how-inverters-work/> (17.8.2020.)
15. GLOBAL SOLAR ATLAS, 2020., URL: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=45.85153,16.065265,19&s=45.851753,16.06522&m=site&pv=small,180,35,1> (14.8.2020.)
16. Grozdek, M., 2015., Tehnoekonomska analiza dizalica topline, URL: <http://geothermalmapping.fsb.hr/wp-content/uploads/2015/02/Tehnoekonomska-analiza-dizalica-topline-IPA-radionica-Zadar.pdf> (17.08.2020.)
17. Hayes, A., 2020., *Internal Rate of Return (IRR)*, Investopedia, URL: <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp> (28.8.2020.)
18. Hidro-Metal, 2018., Centrifugalna pumpa, URL: <https://www.pumpe.hr/opcenito-o-pumpama/centrifugalne-pumpa> (11.08.2020.)
19. Interreg Central Europe, 2017., Joint Report on Chosen Approaches and Methods for Calibration, URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-DT3.5.1-Joint-report-on-chosen-approaches.pdf> (14.08.2020.)
20. International Renewable Energy Agency, 2020., Battery Storage Paves Way for a Renewable-powered Future, URL: <https://www.irena.org/newsroom/articles/2020/Mar/Battery-storage-paves-way-for-a-renewable-powered-future> (27.8.2020.)
21. International Renewable Energy Agency, 2020., Renewable Power Generation Costs in 2019, URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019#:~:text=Electricity%20costs%20from%20utility%2Dscale,respectively%2C%20for%20newly%20commissioned%20projects.> (27.8.2020.)
22. Kagan, J., 2020., Payback Period, Investopedia, URL: <https://www.investopedia.com/terms/p/paybackperiod.asp> (28.8.2020.)
23. Kenton, W., 2020., Net Present Value (NPV), Investopedia, URL: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp> (28.8.2020.)

24. Kanpus – HVAC, 2020., Air Conditioner 4 Way Reversing Valve, URL: <http://www.kanpus-hvac.com/sale-7920349-air-conditioner-4-way-reversing-valve-air-conditioning-parts-refrigeration-valve.html> (25.08.2020.)
25. Lemmens, H., 2019., UC San Diego Works to Build Batteries of the Future, URL: <https://www.thermofisher.com/blog/microscopy/uc-san-diego-works-to-build-batteries-of-the-future/> (7.8.2020.)
26. Marsh, J., 2020., Saltwater batteries: what you need to know, URL: <https://news.energysage.com/saltwater-batteries-what-you-need-to-know/> (1.9.2020.)
27. Omar, C., 2018., Applications of Centrifugal Pump – How They Can Best Cater Dairy Industry Needs?, URL: <https://startsmartsolutions.com/applications-of-centrifugal-pump-how-they-can-best-cater-dairy-industry-needs/> (27.8.2020.)
28. Ost, I., 2018., How much Energy does a Solar Panel Produce?, URL: <https://www.solar.com/learn/how-much-energy-does-a-solar-panel-produce/> (14.8.2020.)
29. Raymond, J., Therrien R., Gosselin, L., 2007., Geothermal Energy Resources of Active Mines, Conference: Congrès de l'Institut canadien des mines, Montreal, Kanada URL: https://www.researchgate.net/publication/263385553_Geothermal_energy_resources_of_active_mines (13.8.2020.)
30. Roberts, D., Chang, A., 2018., Meet the Microgrid, the Technology Poised to Transform Electricity, URL: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/12/15/16714146/greener-more-reliable-more-resilient-grid-microgrids> (11.8.2020.)
31. Servis Jelić d.o.o., 2020., Termostatski Ekspanzijski Ventil, URL: <https://servis-jelic.com/index.php?item=termostatski-ekspanzijski-ventil&action=article&aid=512&lang=hr> (11.8.2020.)
32. Solar Shop, 2020., URL: <https://www.solarno.hr/katalog/proizvod/ELEKT100KW/solarne-elektrane-maxcell-100kw-moduli> (17.8.2020.)
33. Sučić, I., 2020., Moderni načini pretvorbe energije Sunca u električnu energiju - fotonapon - Fotonaponski sustavi, URL: <https://www.obnovljivi.com/energija-sunca/53-moderni-nacini-pretvorbe-energije-sunca-u-elektricnu-energiju-fotonapon?start=1> (26.8.2020.)
34. Trading Economics, 2020., URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium> (1.9.2020.)

35. Tuckers, 2014., *How does a Reversing Valve Work in a Heat Pump?*, URL: <https://www.tuckersac.com/blog/heating-service/how-does-a-reversing-valve-work-in-a-heat-pump/> (5.9.2020.)
36. Zablocki, A., 2019., *Fact Sheet: Energy Storage (2019)*, URL: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019#:~:text=Lithium%20Dion%20batteries%20are%20by,energy%20density%20and%20are%20lightweight.> (27.8.2020.)

IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Tehno-ekonomska analiza mikromreže s
plitkim geotermalnim izvorima topline pomoću modela RES2GEO“ izradio samostalno na
temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom
literaturom.*



Domagoj Leko



KLASA: 602-04/20-01/242
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 23.11.2020.

Domagoj Leko, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/242, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 02.11.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MIKROMREŽE S PLITKIM GEOTERMALNIM IZVORIMA TOPLINE POMOĆU MODELA RES2GEO

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Luka Perković, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)