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: **2024-04-25**

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.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

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

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

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. FINANCIJSKA 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 FINANCIJSKE ANALIZE I ANALIZE OSJETLJIVOSTI 37
6.1. FINANCIJSKE 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 energetskih tokova električne i toplinske energije u modelu RES2GEO 7
Slika 3-2. Detaljan prikaz energetskih tokova toplinske pumpe, grijača i ležišta za režime grijanja i hlađenja 8
Slika 3-3. Fotonaponska čelija 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 energetski 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 m^3 = 9,75 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 energetski 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

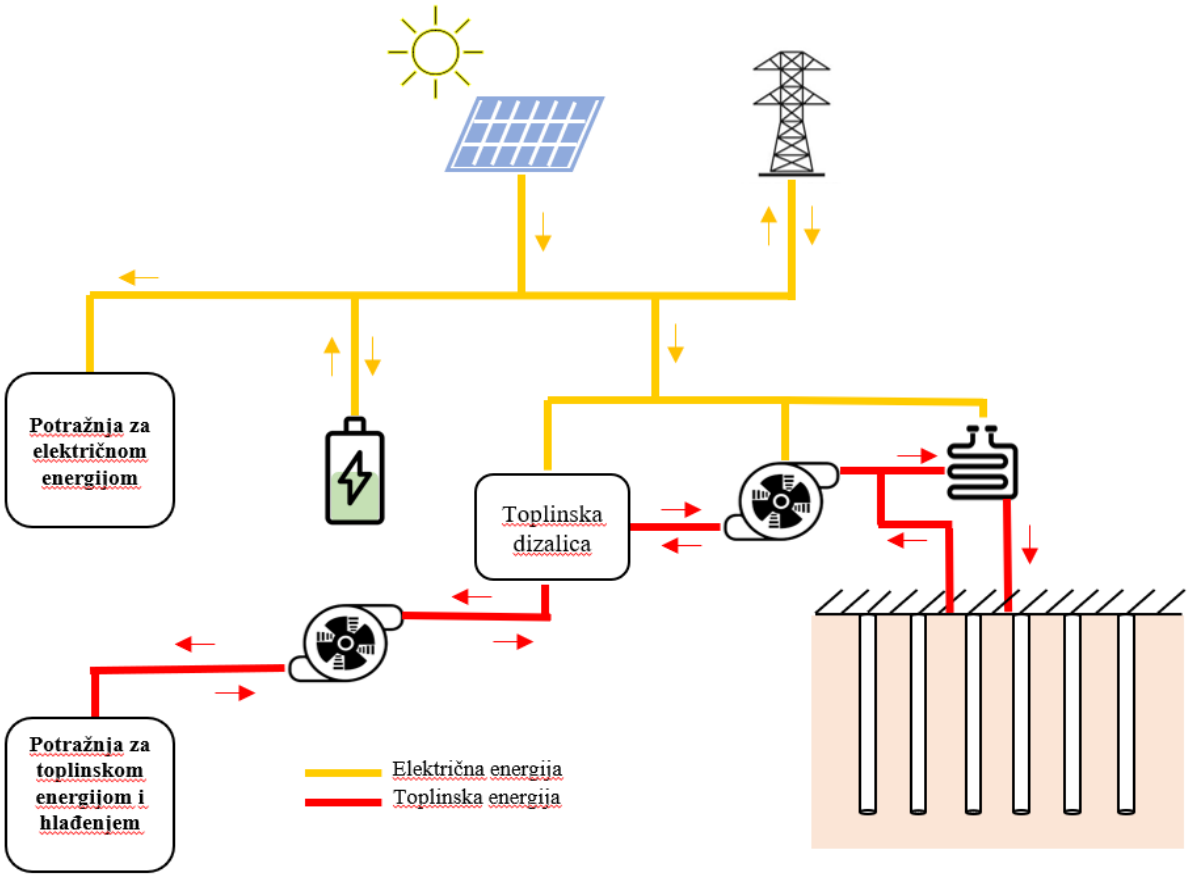
OZNAKA	ZNAČENJE	SI
A	Površina protoka	m^2
COP	Koeficijent efikasnosti dizalice topline	/
J/kg °C	Specifična toplina	J/kg °C
C_t	Razlika između prihoda i rashoda tijekom jednog perioda	HRK
C_0	Kapitalna investicija	HRK
D_{el}	Potražnja za električnom energijom	kWh
D_{th}	Potražnja za toplinskom energijom	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 topline 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)

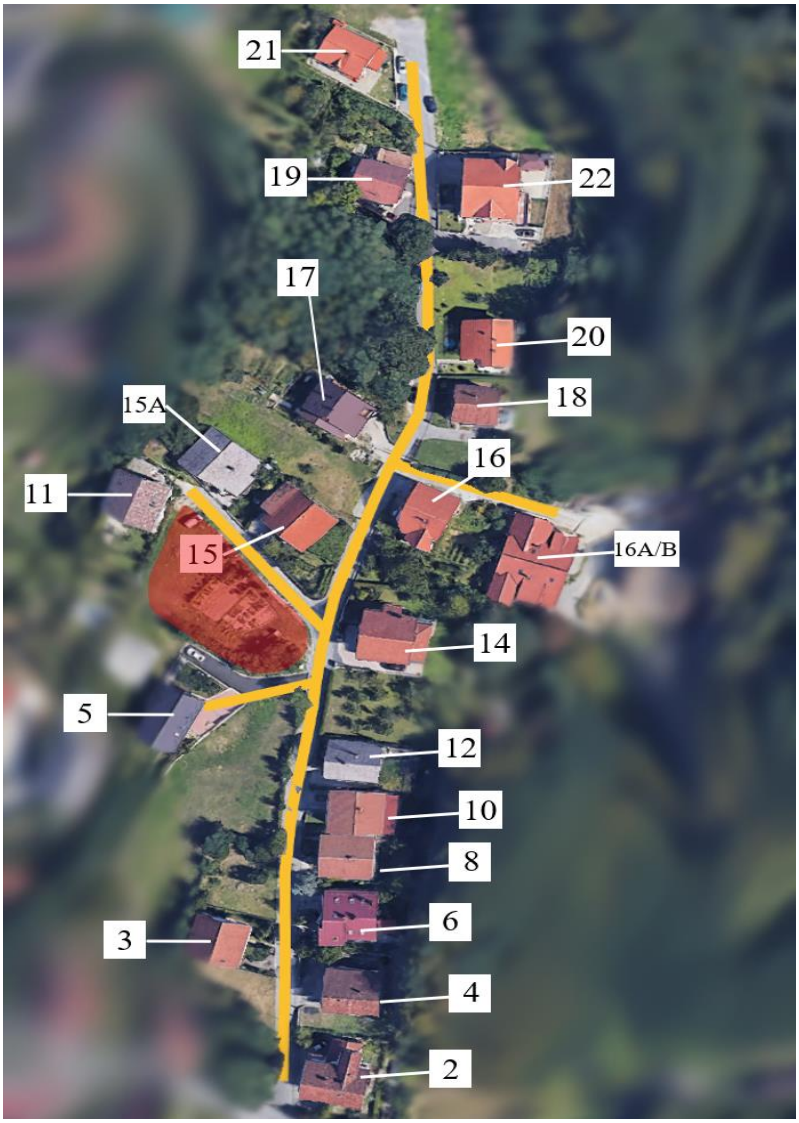
U ovome diplomskome radu biti će modelirana jedna privatna mikromreža (Slika 1-1), točnije sustav jedne ulice na sjeveroistočnom dijelu Grada Zagreba, gdje će se električna energija proizvoditi iz OIE, odnosno fotonaponskih panela, dok će se toplinska energija proizvoditi pomoću geotermalne dizalice 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

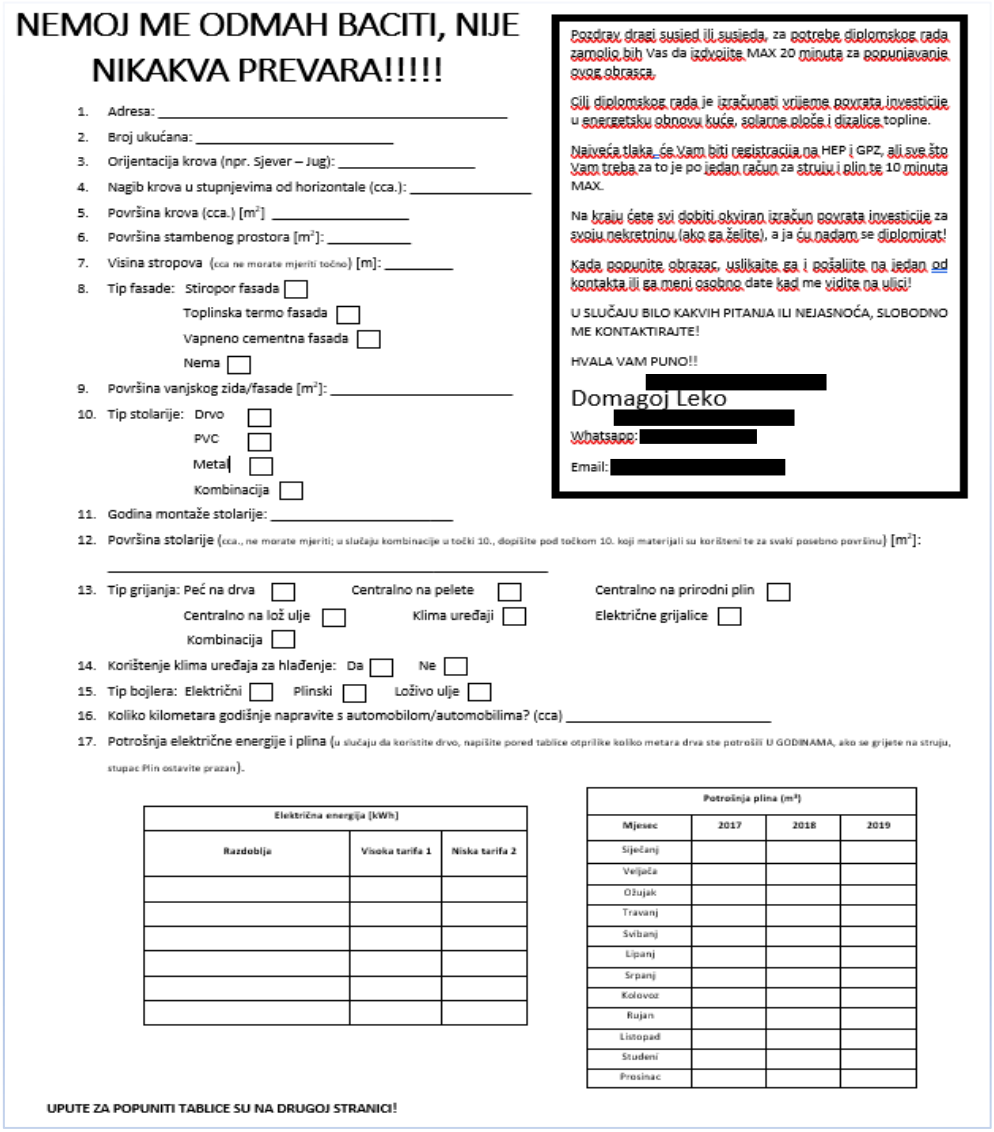
Ulica na temelju koje se izvodi studija, nalazi se na uzbrdici u podsljemenskoj zoni (Slika 2-1.). Sve nekretnine u ulici su obiteljske kuće, koje električnu energiju povlače s mreže, dok za grijanje i toplu vodu koriste prirodni plin. Crvenom površinom označeno je zemljište na kojem bi se postavili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

1. Adresa: _____
2. Broj ukućana: _____
3. Orijentacija krova (npr. Sjever – Jug): _____
4. Nagib krova u stupnjevima od horizontale (cca.): _____
5. Površina krova (cca.) [m^2] _____
6. Površina stambenog prostora [m^2]: _____
7. Visina stropova (cca ne morate mjeriti točno) [m]: _____
8. Tip fasade: Stiropor fasada ☐
   Toplinska termo fasada ☐
   Vapneno cementna fasada ☐
   Nema ☐
9. Površina vanjskog zida/fasade [m^2]: _____
10. Tip stolarije: Drvo ☐
    PVC ☐
    Metal ☐
    Kombinacija ☐
11. Godina montaže stolarije: _____
12. 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) [m^2]: _____
13. Tip grijanja: Peć na drva ☐ Centralno na pelete ☐ Centralno na prirodni plin ☐
    Centralno na lož ulje ☐ Klima uređaji ☐ Električne grijalice ☐
    Kombinacija ☐
14. Korištenje klima uređaja za hlađenje: Da ☐ Ne ☐
15. Tip bojlera: Električni ☐ Plinski ☐ Loživo ulje ☐
16. Koliko kilometara godišnje napravite s automobilom/automobilima? (cca) _____
17. Potrošnja električne energije i plina (u slučaju da koristite drvo, napišite pored tablice otprilike koliko metara drva ste potrošili U GODINAMA, ako se grijete 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!

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

Cilj diplomskog rada je izračunati vrijeme povrata investicije u energetsku obnovu kuće, solarne ploče i dizalice topline.

Najveća 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 nekretninu (ako ga želite), a ja ću nadam se diplomirat!

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

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

HVALA VAM PUNO!!

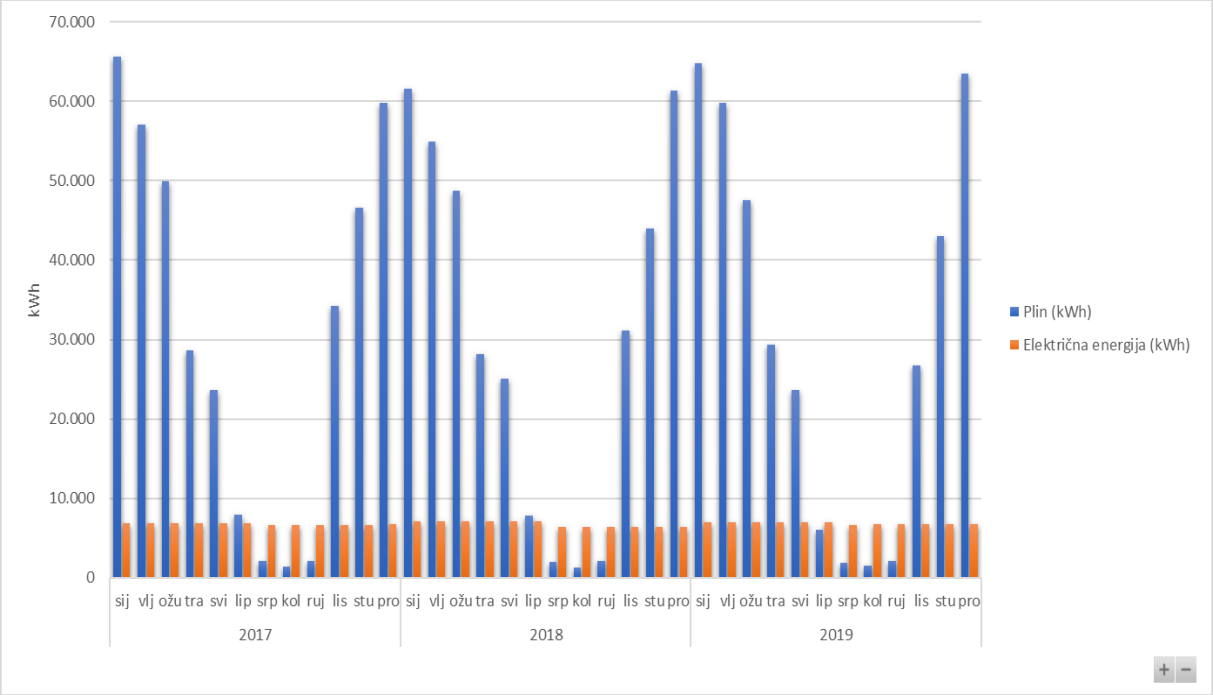
[redacted]
Domagoj Leko
[redacted]
Whatsapp: [redacted]
Email: [redacted]

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 energetskih tokova i financijske analize.

Tablica 2-2. Ukupne godišnje potrošnje (1 m^3 = 9,75 kWh)

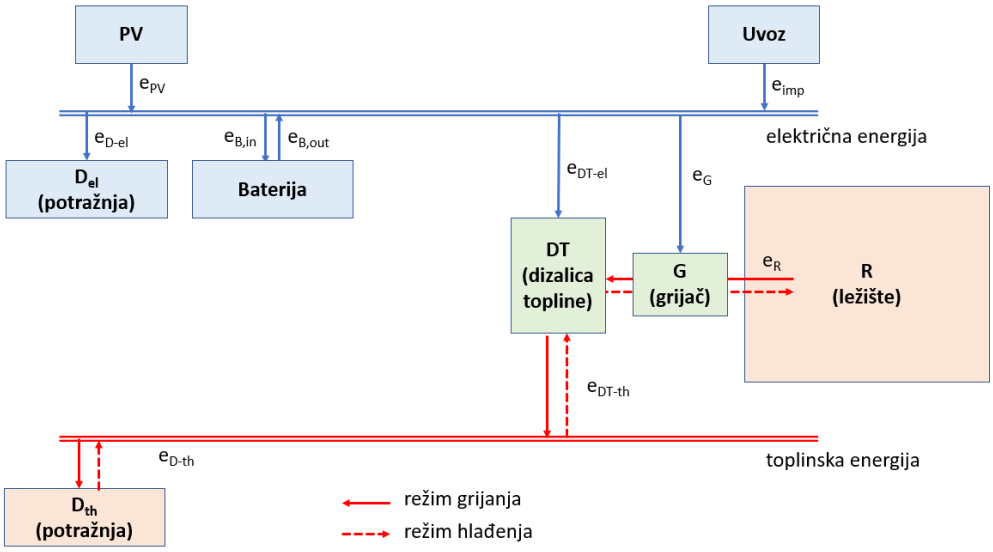
Godina	Plin [kWh]	Električna energija [kWh]
2017	**378.957**	**81.242**
2018	**368.186**	**81.694**
2019	**369.996**	**81.985**

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 m^2, 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/m^2, što bi cjelokupnu ulicu svrstalo u energetski razred C (Energetski certifikat, 2019).

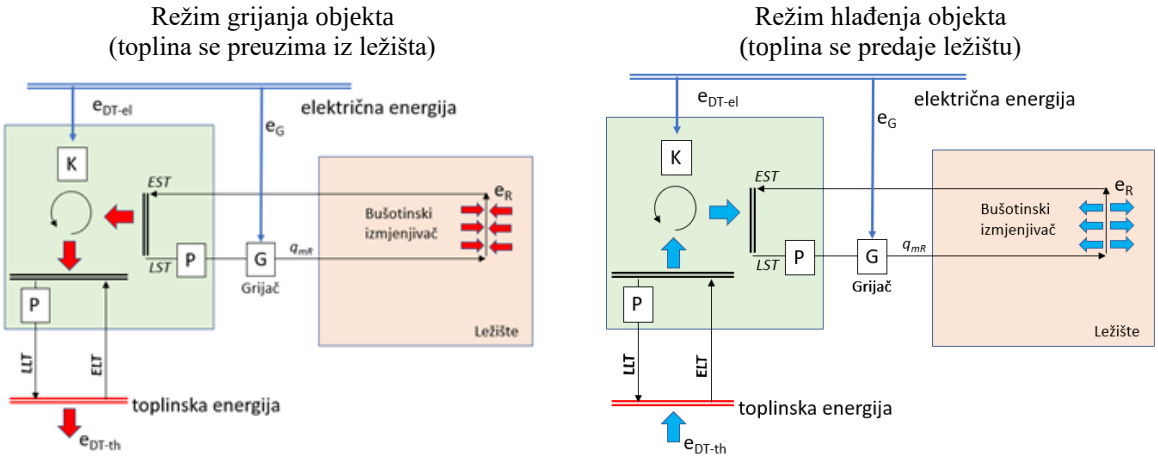
3. METODA IZRAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U VIŠEGODIŠNJOJ SIMULACIJI ENERGETSKOG SUSTAVA

Kao što je već navedeno, za proračun energetskih 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 energetskih 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:

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

$$e_{D-th} = e_{DT-th} \tag{3-2}$$

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

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

i režim hlađenja:

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

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).

$$COP = \frac{e_{DT-th}}{e_{DT-el}} \tag{3-5}$$

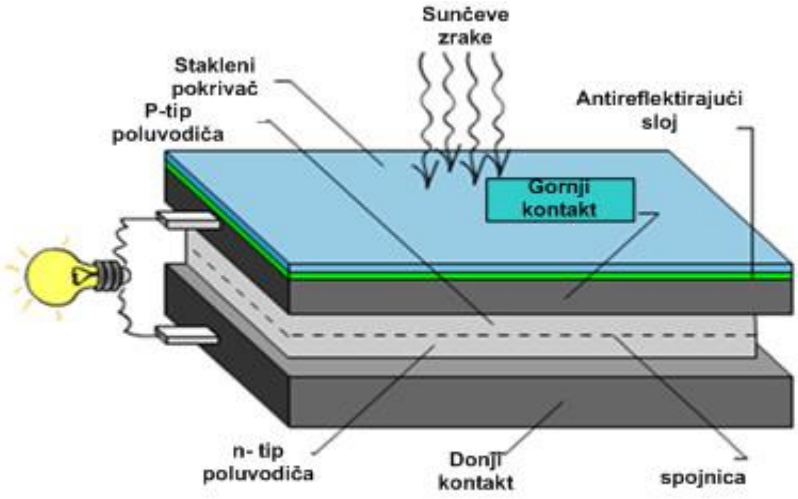
COP ovisi o temperaturi EST (engl. *Entering Source Temperature*), a načelna formula je:

$$COP = 0.0029 \cdot EST^2 + 0.0958 \cdot EST + 3.3662 \tag{3-6}$$

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.

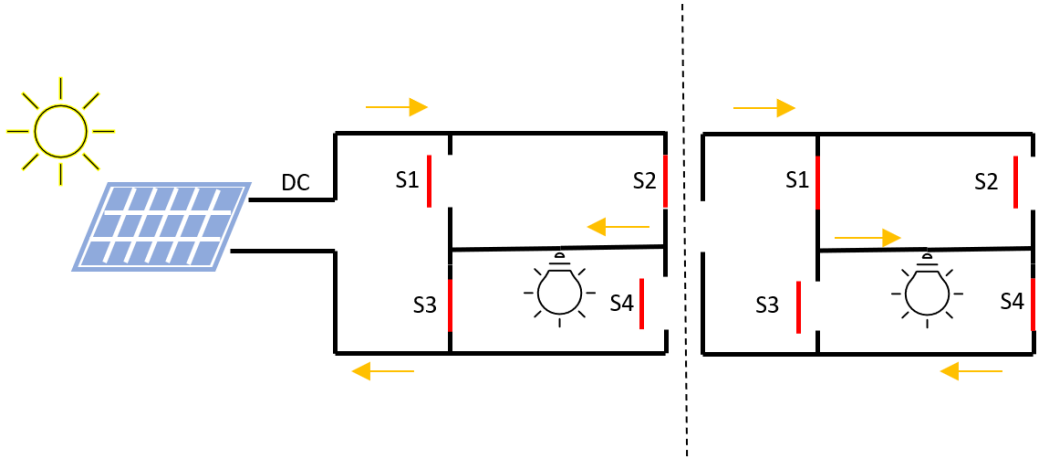
3.1. FOTONAPONSKI PANELI

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)

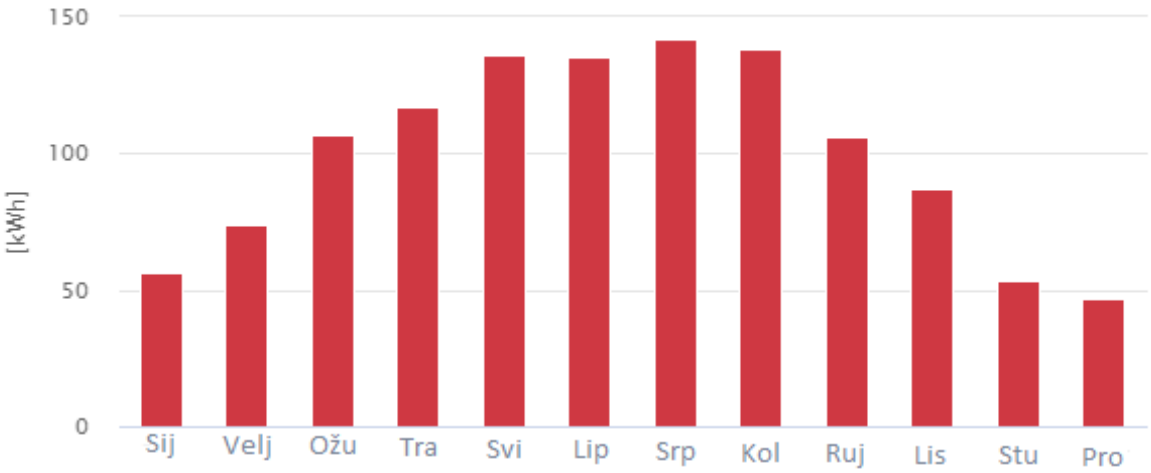
Uređaji koji su dizajnirani za rad na izmjeničnoj struji, poput perilica, hladnjaka itd., ne mogu raditi na istosmjernoj. Stoga je uz fotonaponske panele nužno instalirati i inverter. Solarni inverter služi za konvertiranje istosmjerne struje proizvedene iz fotonaponskih panela u izmjeničnu struju, no 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).

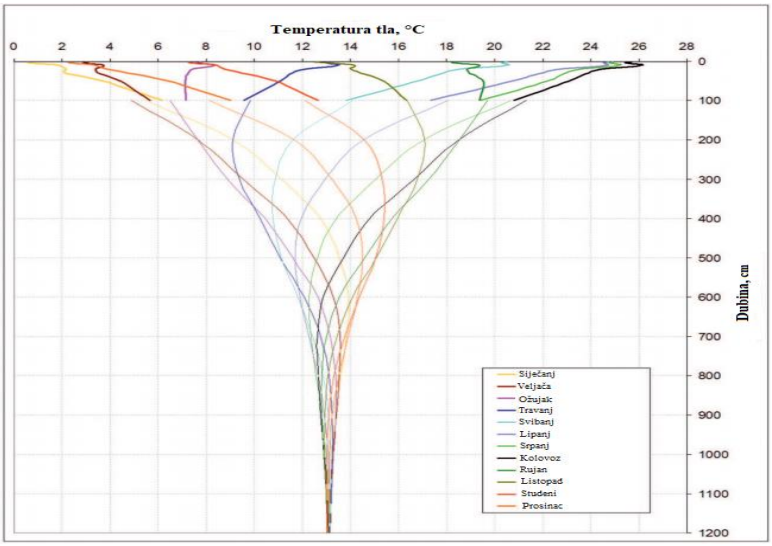
Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih panela ovisi o azimutu, nagibu u odnosu na horizontalu i količini insolacije (Ost, 2018). Za ulicu iz ovog projekta, procjena godišnje proizvodnje iz 1 kW instalirane snage fotonaponskih panela, pod kutom od 35° i azimutom od 180°, iznosi 1,200 kWh (Global 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)

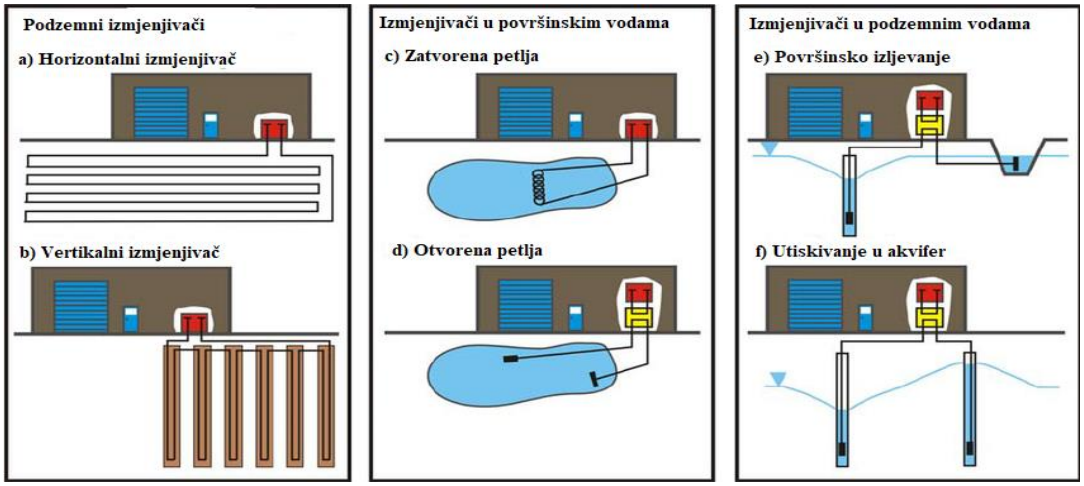
3.2. GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE

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)

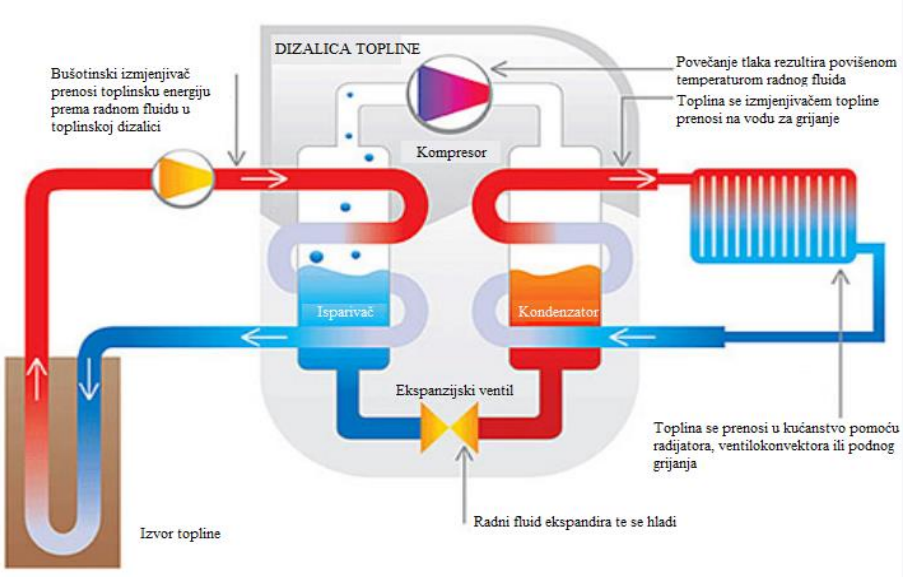
Geotermalne dizalice topline preuzimaju toplinu iz tla ili vode cirkulirajući vodu s aditivima kroz podzemni sustav cijevi. Toplinska dizalica zatim podiže temperaturu, te se toplina iskorištava za grijanje ili toplu vodu. Za rad im je potrebna električna energija, ali im je prednost u tome što potroše 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.

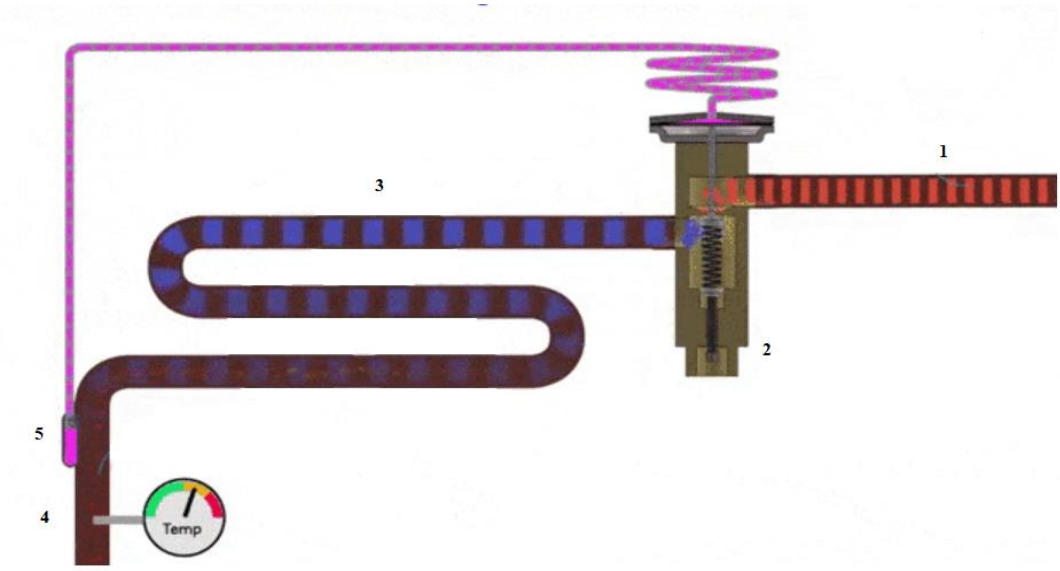
Sama toplinska dizalica radi na principu cirkulacije rashladnog fluida (engl. *refriegerant*) u kompresijsko – ekspanzijskom ciklusu (Banks, 2012) Shema rada prikazana je na slici 3-7.



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)



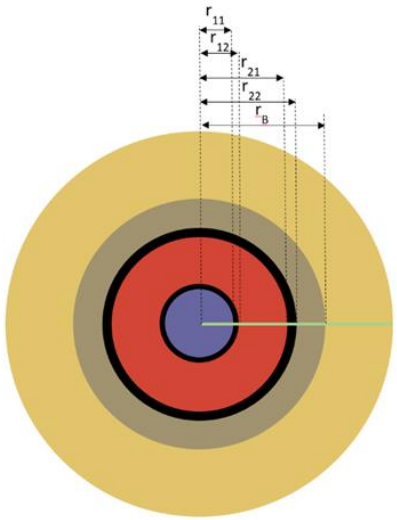
Slika 3-10. Shematski prikaz rada ekspanzijskog ventila (Evans, 2017)

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/m^{3}K (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 m^2/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):

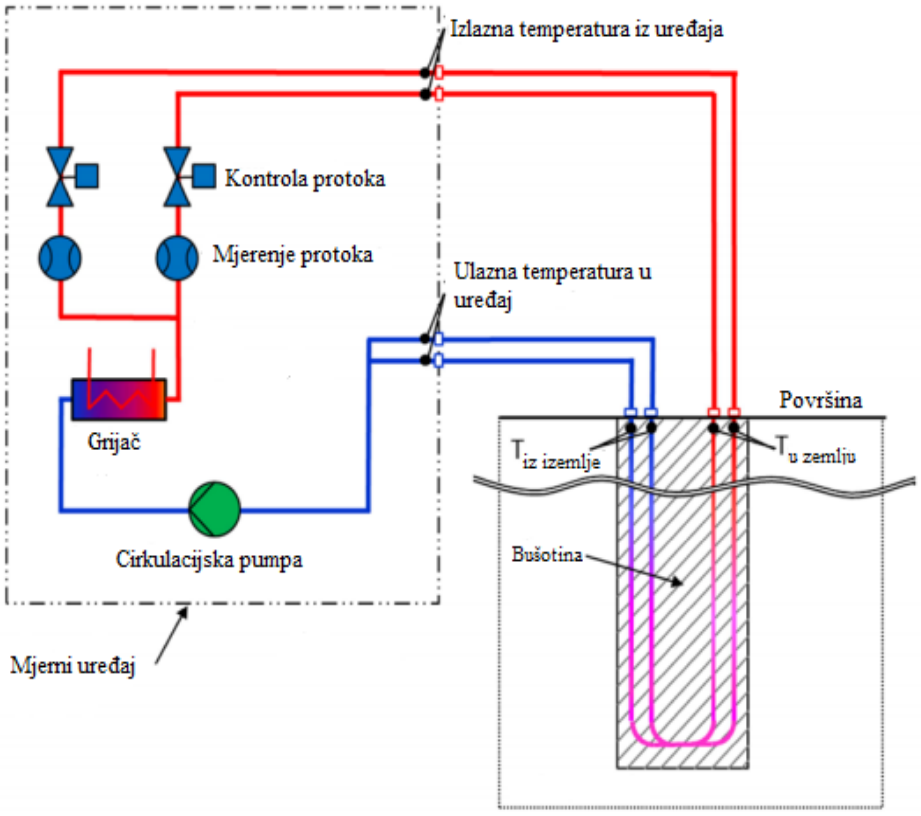
Tablica 3-1. Karakteristične veličine toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti za različite vrste stijena (Kappelmayer 1974, Kavanaugh, 1997)

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°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/m^3
- Specifični toplinski kapacitet ležišta: 3500 J/kgK
- Toplinska vodljivost cementacije: 1,2 W/mK
- Gustoća cementacije: 2500 kg/m^3
- Specifični toplinski kapacitet cementacije: 880 J/kgK
- Gustoća tubinga PVC: 900 kg/m^3
- 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/m^3 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:

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

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,

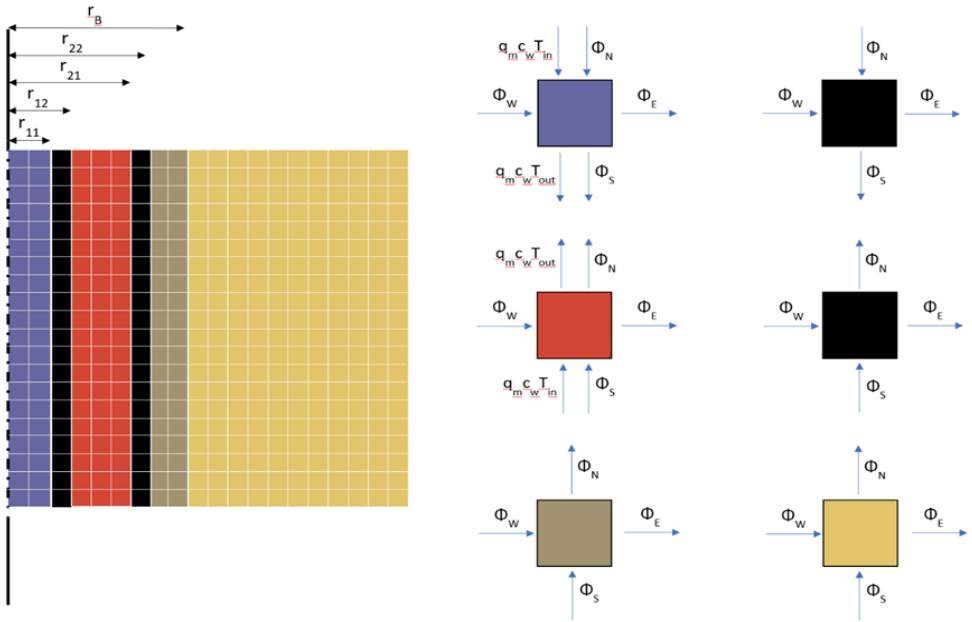
stijenke/PVC i cementacija). Također, s obzirom na to da je načelno je svaka ćelija osim rubnih okružena s četiri ćelije na četiri strane (gore N/north; dolje S/south; lijevo W/west; desno E/istok).

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

Kako je koeficijent prolaza topline k = λ/udaljenost, a masa ćelije m=ρV, gornju jednadžbu možemo napisati u obliku:

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

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 (λ/ρc). 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

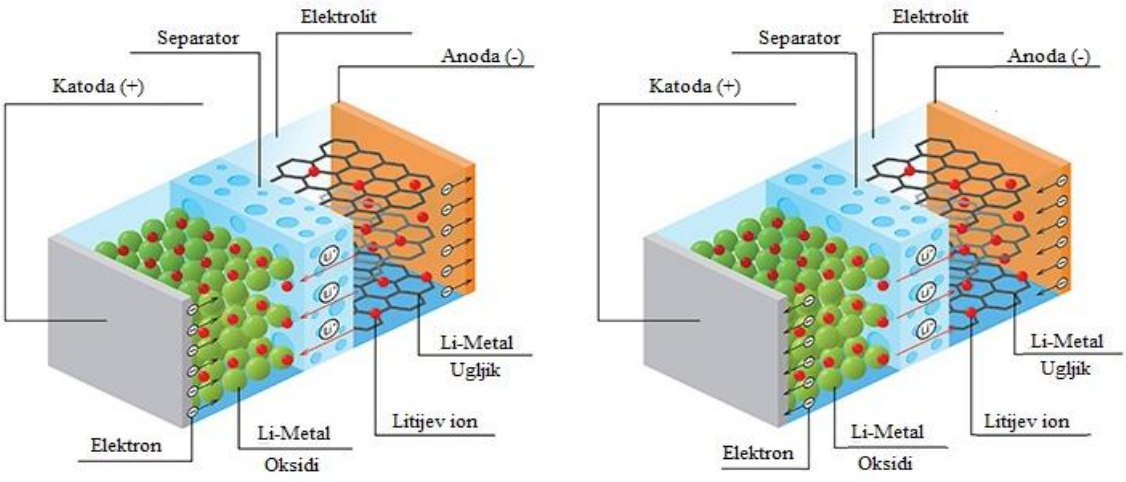
3.4. BATERIJA

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 energetsku 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

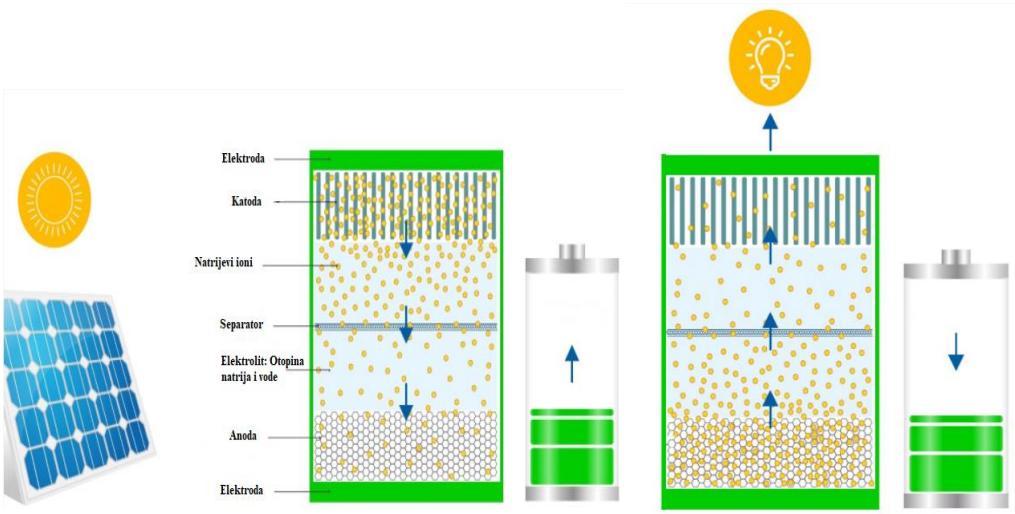
kroz vodič. Kada svi ioni litija pređu s anode na katodu, baterija je prazna. Prilikom punjenja, kretanje je obrnuto, ioni litija koji su pozitivno nabijeni kreću se s katode prema anodi.

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 energetskog 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.



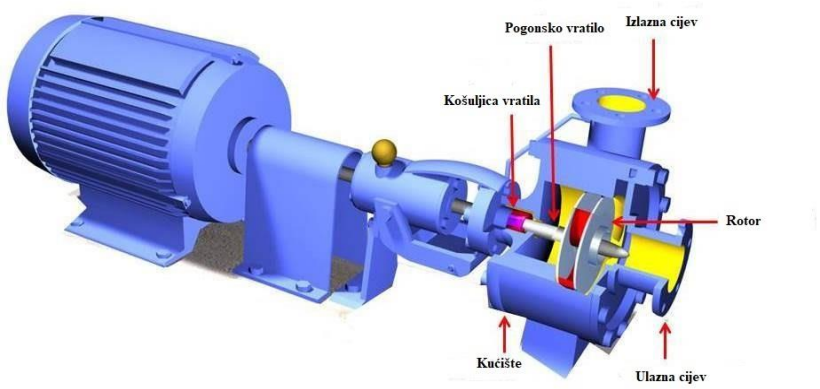
Slika 3-16. Punjenje (lijevo) i pražnjenje (desno) Na-ion baterije (BlueSky Energy, 2020)

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:

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

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:

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

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 energetski 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/m^2 (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
Trošak projekta: [HRK]	30.000,00
Jedinična cijena baterije: [HRK/kWh]	5.088,00
Jedinična cijena bušotine: [HRK/m]	355,00
Jedinična cijena fotonaponskih čelija: [HRK/kW]	5.950,00
Jedinična cijena dizalice topline: [HRK/kW]	5.000,00
Cijena instalacija grijanja/hlađenja po kućama: [HRK/Ulica]	1.000.000,00
Cijena grijača: [HRK/kW]	1.000,00
Jedinična cijena centrifugalnih pumpi: [HRK/kW]	4.000,00
Cijena raskopavanja, polaganja cijevi i asfaltiranja kanala ulice, [HRK]	100.000,00
Cijena zemljišta: [HRK]	376.500,00
Državni poticaji, %	30
Udio kredita u investiciji, %	80
Kamatna stopa, %	3
Period otplate kredita, broj godina	10
Diskontna stopa, %	6

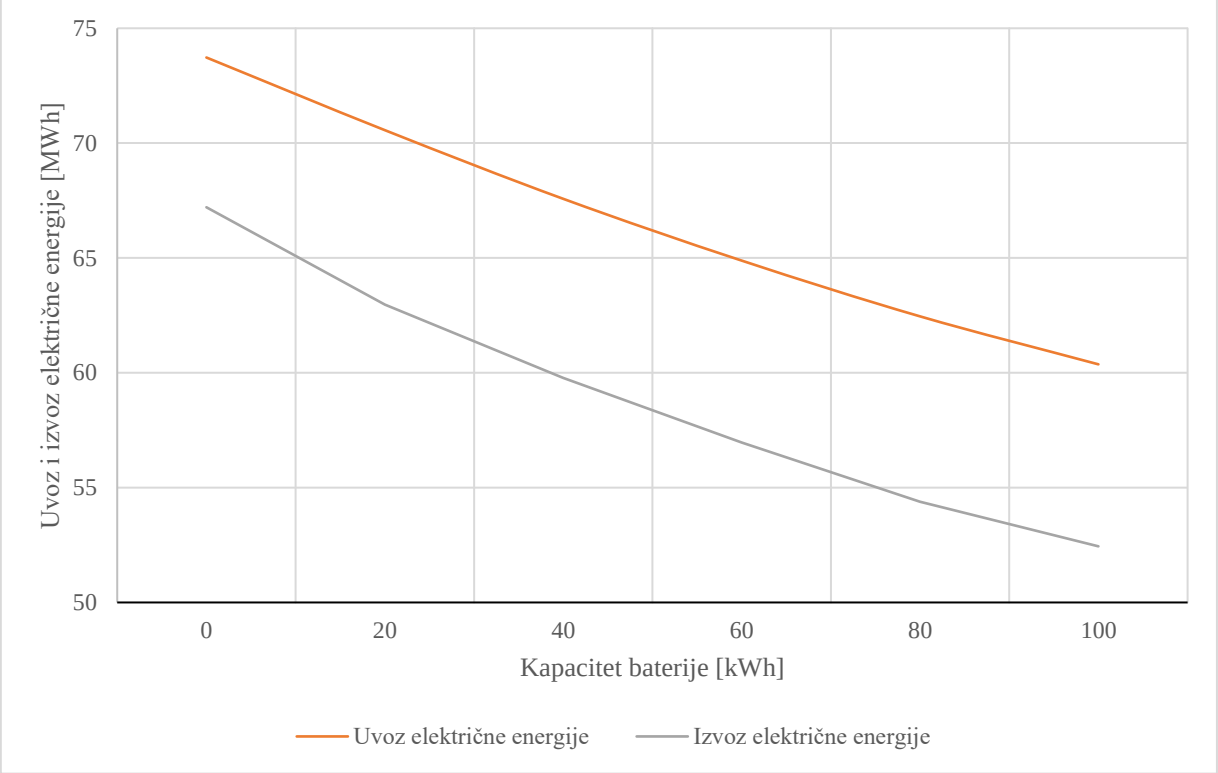
Godišnji prihodi temeljeni su na uštedama od zamjene plina kao energenta za grijanje, smanjene potrošnje električne energije iz mreže kao rezultat instalirane snage fotonaponskih panela te pretpostavljene izbjegnute tarife za proizvedeni CO_2 prilikom grijanja na plin koja bi krenula na naplatu od 2030. godine. Jedinične cijene električne energije i prirodnog plina, uz pretpostavljenu tarifu za CO_2 prikazane su u tablici 4-2. Jedan utrošeni kWh prirodnog plina rezultira s 0,22 kg CO_2 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 CO_2 i eskalacija cijene

Stavka	Iznos
Električna energija, HRK/kWh	0,91
Prirodni plin, HRK/kWh	0,31
CO_2, HRK/kg	0,23
Godišnja eskalacija cijene prirodnog plina, %	1
Godišnja eskalacija cijene električne energije, %	0,5

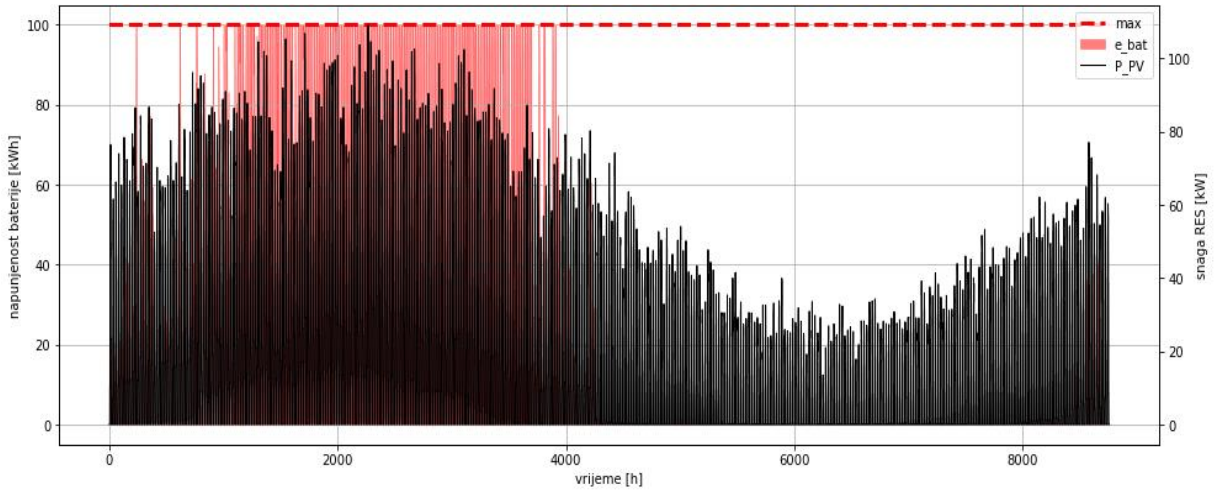
5. REZULTATI MODELIRANJA ENERGETSKIH TOKOVA

Ulazni podaci u proračune energetskih 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).



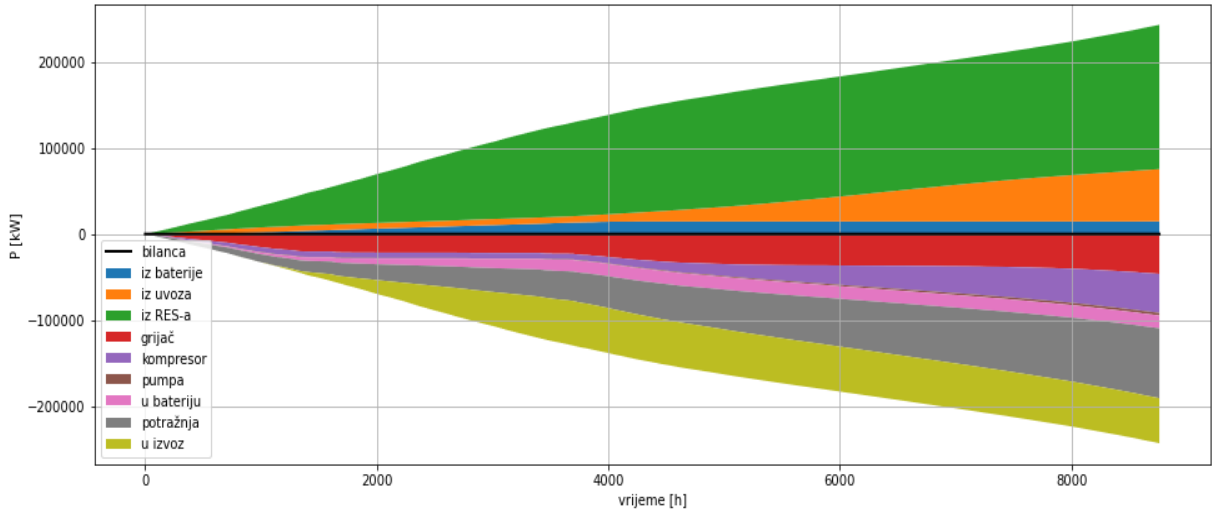
Slika 5-1. Ovisnost uvoza i izvoza električne energije o kapacitetu baterije uz 140 kW fotonaponskih panela i 2000 m ukupne duljine izmjenjivača

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



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

Tablica 5-1. Godišnji energetski 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

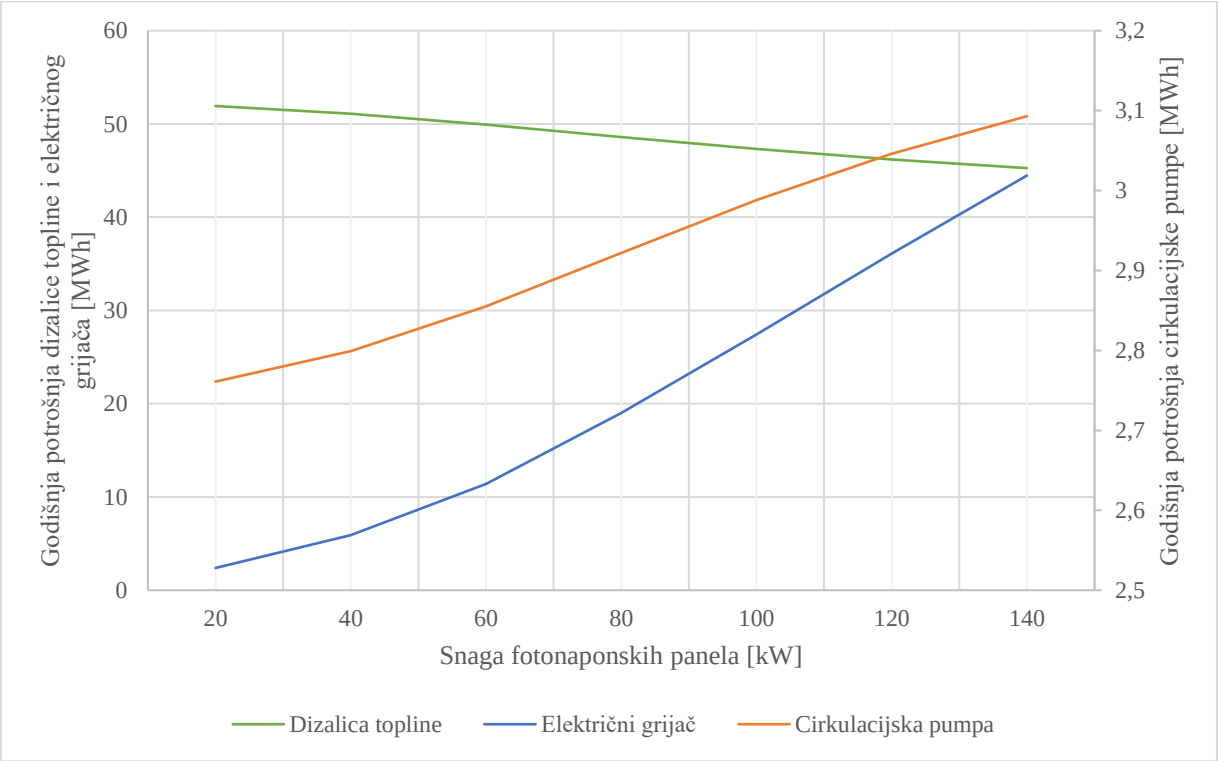
STAVKA	TEST 11	TEST 12	TEST 13	TEST 14	TEST 15	TEST 16	TEST 17	TEST 18	TEST 19	TEST 20
Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh]	12,462	14,606	0	0	0	0	0	0	0	0
Uvoz električne energije iz mreže, [MWh]	62,457	60,368	116,579	102,068	92,34	85,386	80,295	76,552	73,727	71,555
Proizvedena energija iz 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 energetski tokovi dobiveni u RES2GEO (nastavak)

STAVKA	TEST 21	TEST 22	TEST 23	TEST 24	TEST 25	TEST2 6	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

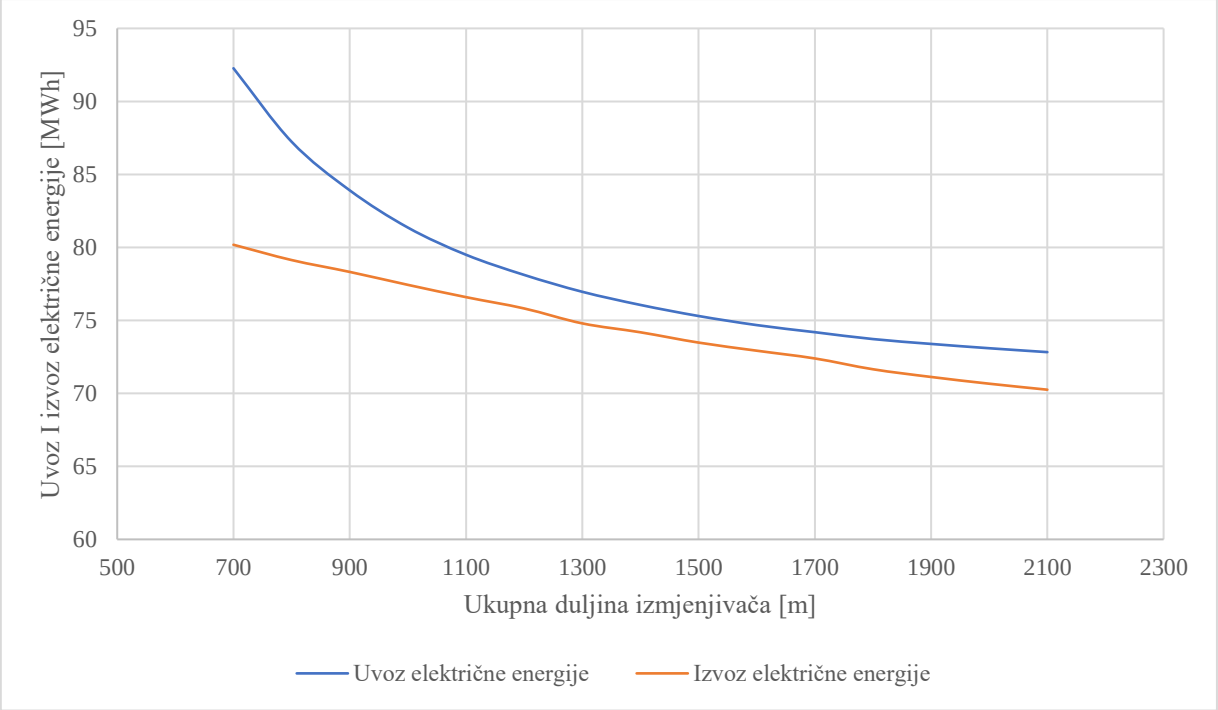
STAVKA	TEST 31	TEST 32	TEST 33	TEST 34	TEST 35	TEST 36	TEST 37	TEST 38	TEST 39	TEST 40
Električna energija preuzeta iz baterije, [MWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uvoz električne energije iz mreže, [MWh]	76,96	76,06	75,302	74,679	74,192	73,722	73,389	73,093	72,826	72,557
Proizvedena energija iz fotonaponskih 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).

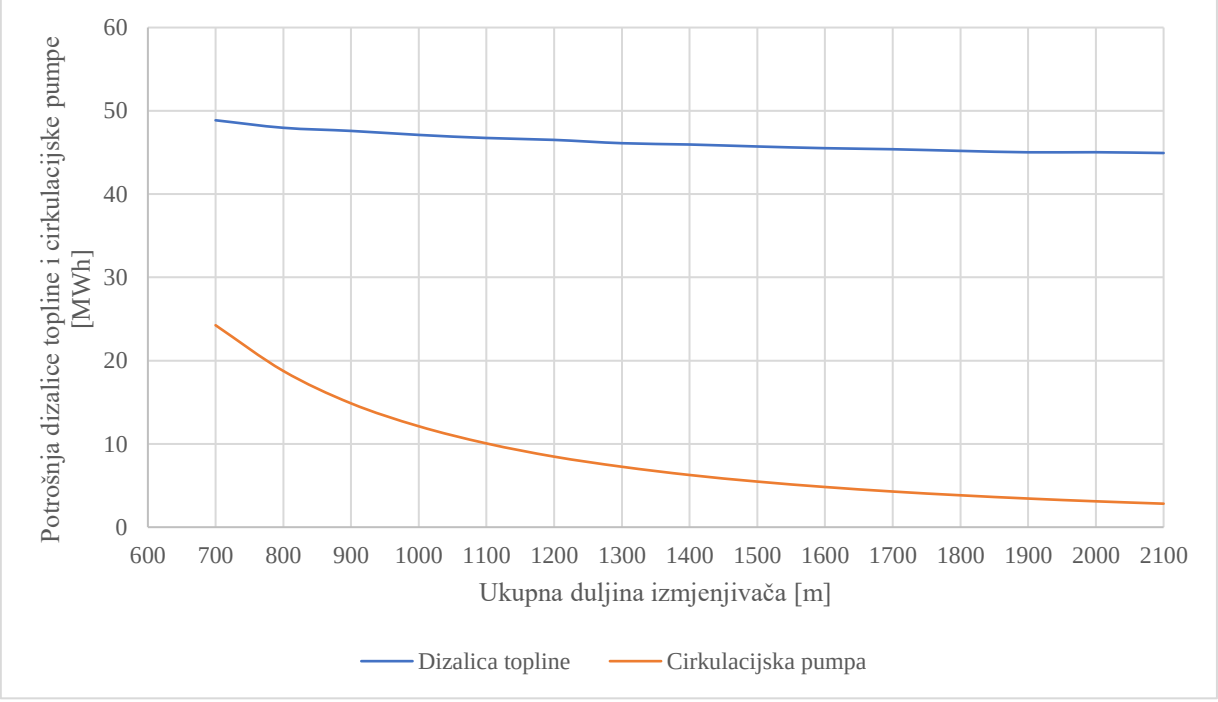


Slika 5-4. Ovisnost godišnje potrošnje električne energije dizalice topline, cirkulacijske pumpe i električnog grijača o instaliranoj snazi fotonaponskih panela, uz 2000 m

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

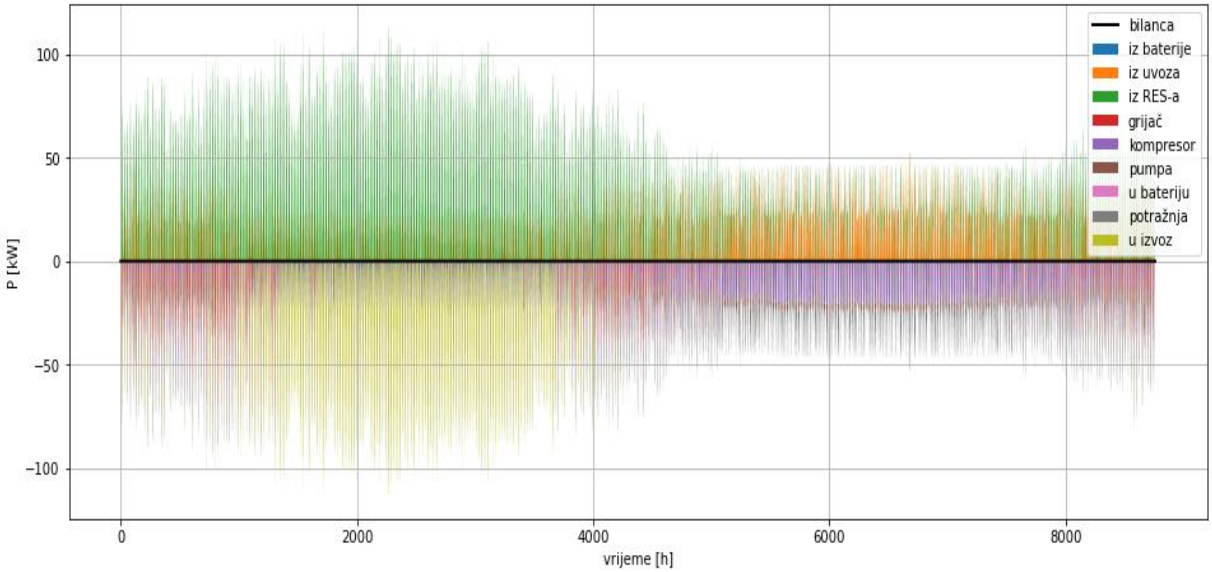
TEST	NPV, [HRK]	IRR, [%]		TEST	NPV, [HRK]	IRR, [%]
TEST 1	-427.937	0,64%		TEST 21	-2,E+12	-
TEST 2	-304.440	2,42%		TEST 22	67.284	7,07%
TEST 3	-329.694	2,08%		TEST 23	9.172	6,14%
TEST 4	-193.538	3,46%		TEST 24	-74.084	4,96%
TEST 5	-363.928	0,93%		TEST 25	59.442	6,96%
TEST 6	-46.235	5,36%		TEST 26	78.006	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.

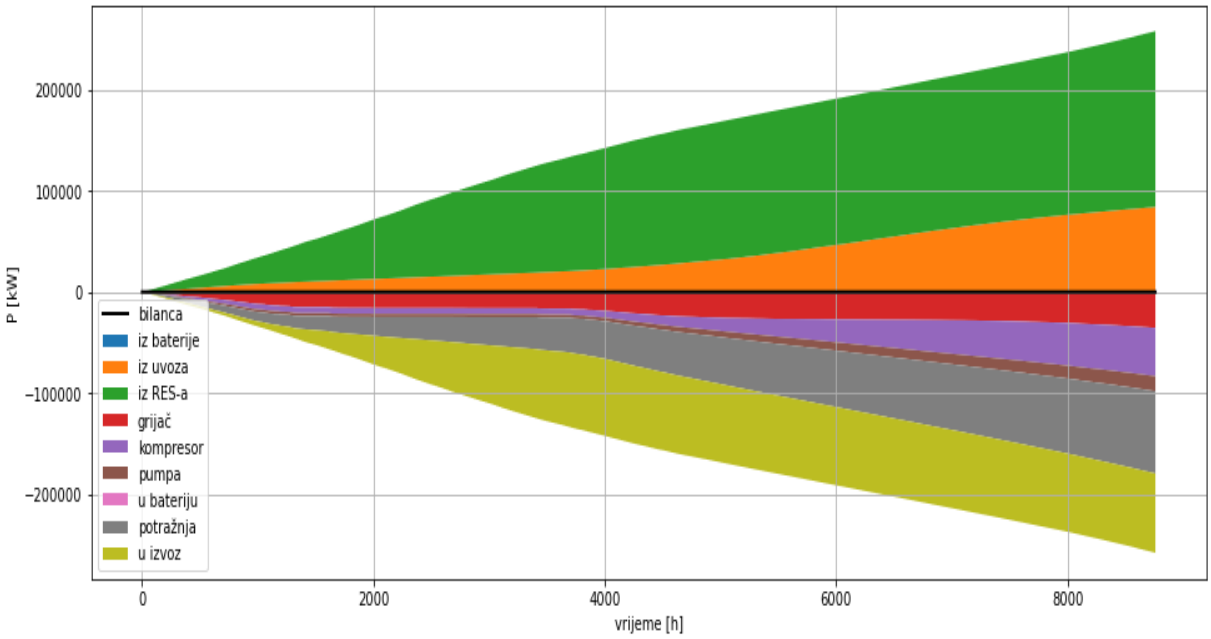
Tablica 6-2. Novčani tok modela 27 u HRK

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 energetski tokovi modela 27 kroz godinu.



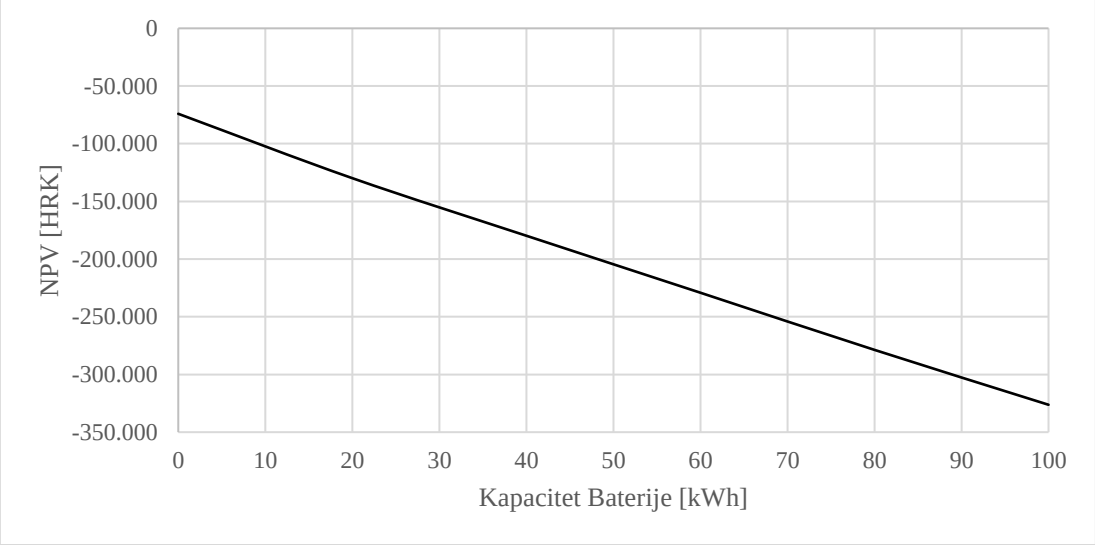
Slika 6-1. Energetski tokovi modela 27



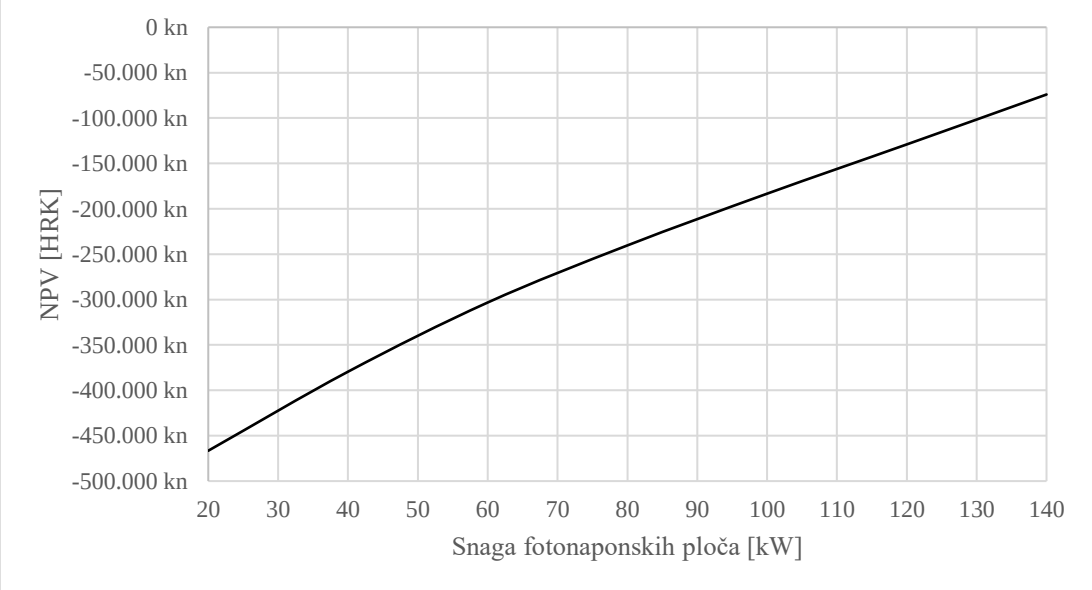
Slika 6-2. Kulminirani energetski tokovi modela 27

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.

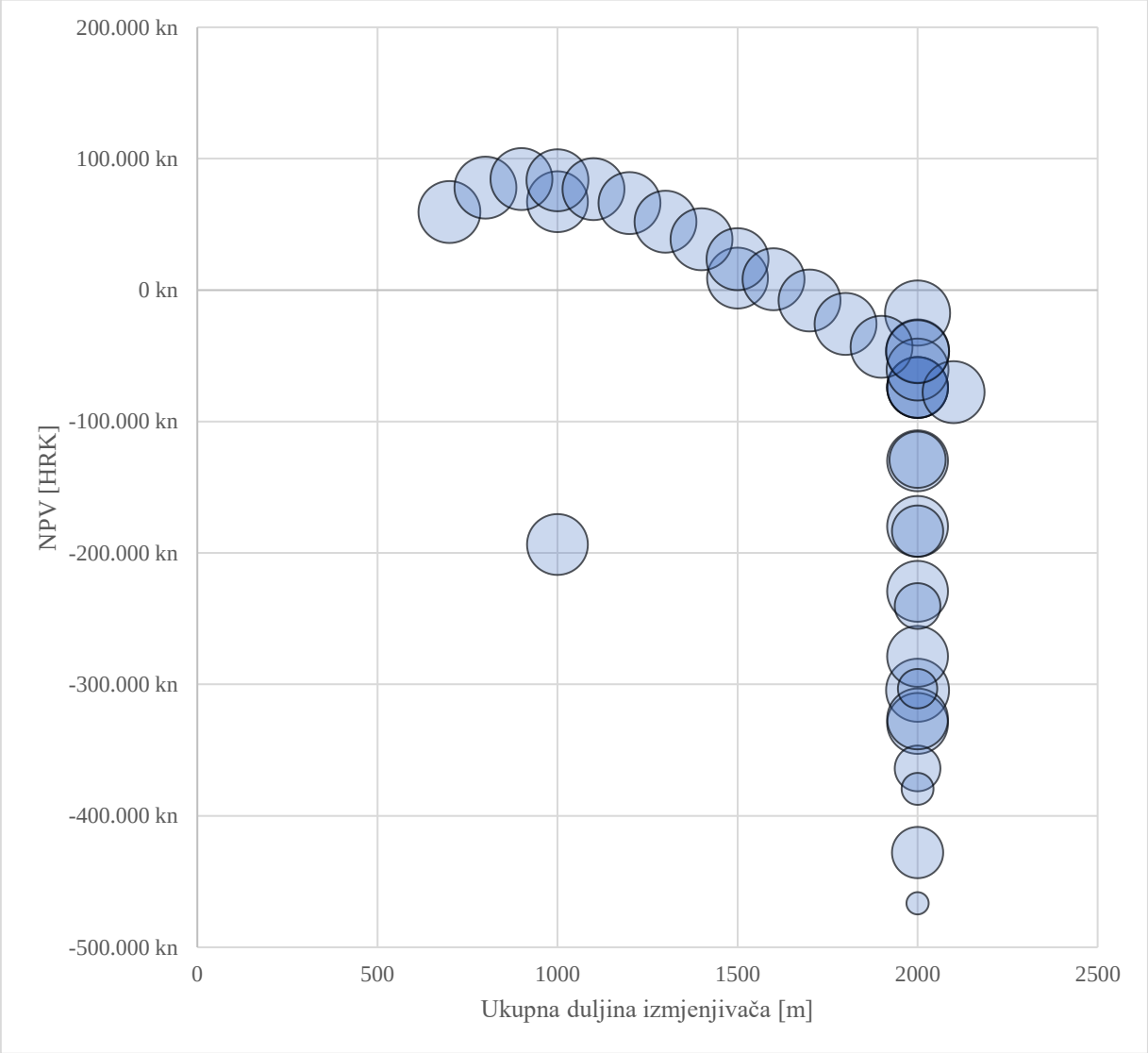


Slika 6-3. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i 140 kW fotonaponskih panela



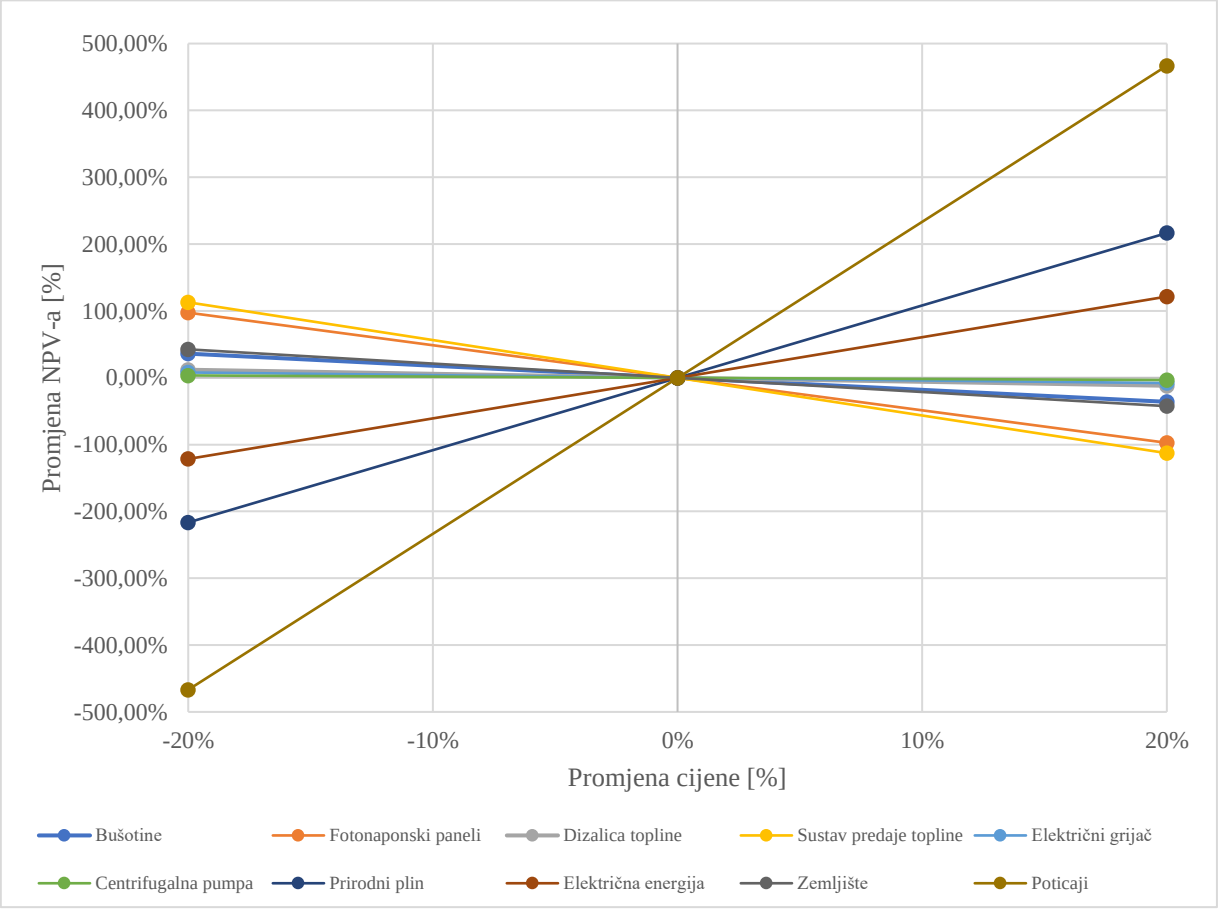
Slika 6-4. Promjena neto sadašnje vrijednosti u ovisnosti o kapacitetu baterije, uz 2000 m podzemnog izmjenjivača i bez baterije

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.



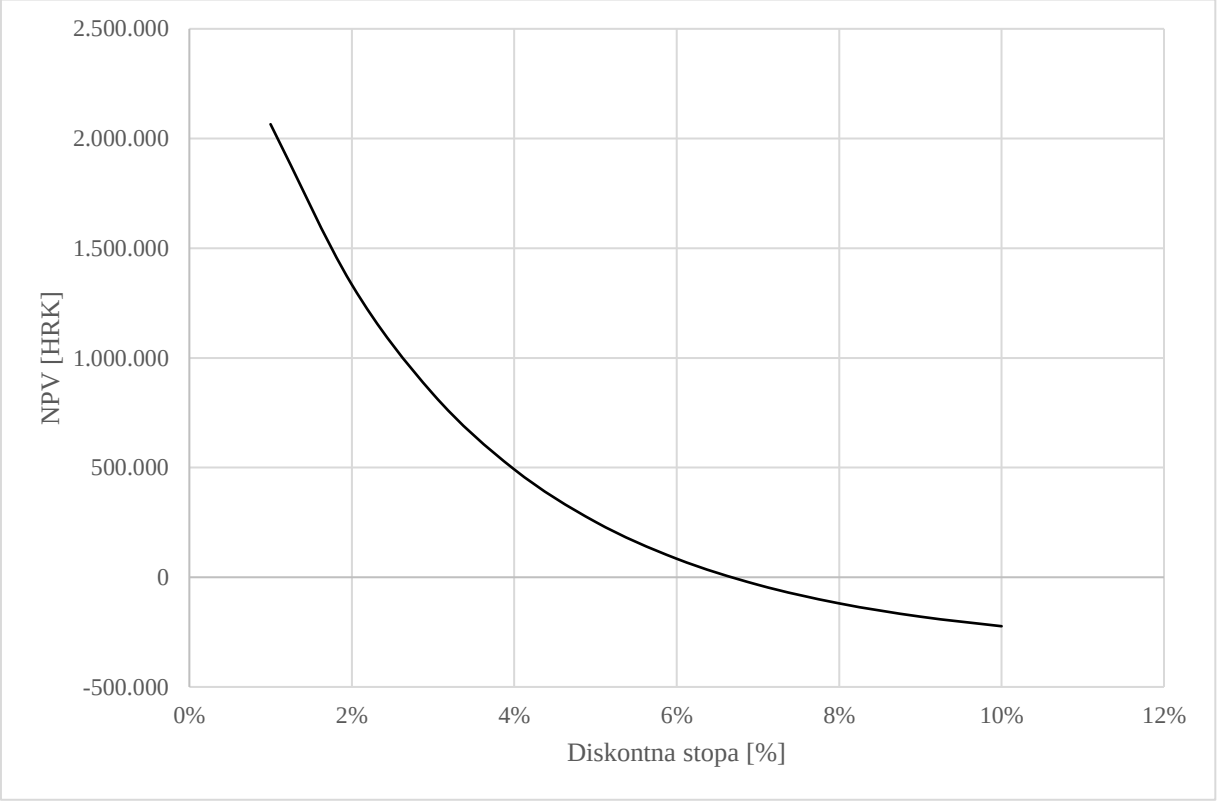
Slika 6-5. Ovisnost neto sadašnje vrijednosti od ukupnoj duljini izmjenjivača i instaliranoj snazi fotonaponskih panela

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 energetskom miksu 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.)

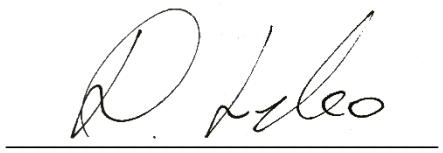
13. Evans, P., 2018., Heat Pump Explained, URL: https://theengineeringmindset.com/heat-pumps-explained/ (17.8.2020.)
14. Evans, P., 2017., How Inverters Work, URL: https://theengineeringmindset.com/how-inverters-work/ (17.8.2020.)
15. GLOBAL SOLAR ATLAS, 2020., URL: https://globalsolaratlas.info/detail?c=45.85153,16.065265,19&s=45.851753,16.06522&m=site&pv=small,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-expanzijski-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%2Dion%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)