Tehno-ekonomska analiza centraliziranog toplinskog sustava baziranog na geotermalnoj energiji

Herc, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:999490

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Herc

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing. Luka Herc

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Nevenu Duiću i asistentu Hrvoju Dorotiću mag.ing.mech. na stručnoj pomoći i savjetima za vrijeme izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja.

Luka Herc

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Herc** Mat. br.: 0035200073

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza centraliziranog toplinskog sustava baziranog na geotermalnoj energiji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of a geothermal district heating system**

Opis zadatka:

Geotermalna energija trenutno ima relativno mali udio u ukupnoj proizvodnji toplinske i električne energija premda javno dostupni podaci na razini Europske unije i Republike Hrvatske pokazuju značajne potencijale. U Republici Hrvatskoj je do sada izgrađeno samo jedno postrojenje koje proizvodi električnu energiju unatoč postojećim geotermalnim bušotinama koje mjere visoke temperature i protoke geotermalne vode. Geotermalna postrojenja imaju visoke specifične investicijske, ali niske operativne troškove i mogućnost postizanja visokog faktora opterećenja na godišnjoj razini. Zbog toga su pogodna za korištenje u centraliziranim toplinskim sustavima, a posebice u kombiniranoj proizvodnji električne i toplinske energije, ako su temperature geotermalnih bušotina dovoljno visoke. Cilj ovoga rada je izrada tehno-ekonomske analize centraliziranog toplinskog sustava lociranog u Republici Hrvatskoj koji je baziran na geotermalnoj energiji.

U sklopu rada potrebno je:

1. Izraditi detaljan pregled literature o geotermalnim postrojenjima i centraliziranim toplinskim sustavima;
2. Opisati geotermalne potencijale Europske unije i Republike Hrvatske;
3. Odabrati potencijalnu lokaciju u Republici Hrvatskoj za izgradnju geotermalnog postrojenja;
4. Predložiti tehnološko rješenje i razraditi najmanje 2 scenarija korištenja geotermalne energije u sklopu centraliziranog toplinskog sustava;
5. Izraditi tehno-ekonomsku analizu.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... *I.*
POPIS SLIKA ..... *III.*
POPIS TABLICA ..... *VI.*
POPIS KRATICA ..... *VIII.*
POPIS OZNAKA ..... *IX.*
SAŽETAK XI
SUMMARY XII
1. UVOD 1
2. GEOTERMALNA ENERGIJA 2
2.1. Struktura Zemlje 3
2.2. Podrijetlo geotermalne energije 3
2.3. Proizvodnja električne energije 4
2.3.1. Sustav suhozasićene pare (engl. dry steam) 5
2.3.2. Sustav jednostrukog isparivanja (engl. Single flash) 5
2.3.3. Sustav dvostrukog isparivanja (engl. Double flash) 6
2.3.4. Binarni Organski Rankineov i Kalina ciklus 7
2.4. Geotermalna energija u Europi 8
2.5. Geotermalna energija u Hrvatskoj 10
2.6. Centralizirani toplinski sustavi 11
3. OPIS ZADATKA 16
4. METODA 19
4.1. Opis tehničkog proračuna 19
4.2. Opis tehno - ekonomske analize 26
5. ANALIZA SCENARIJA 31
5.1. Scenarij 1. ORC + CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska 31
5.2. Scenarij 2. ORC + spoj na CTS Grada Karlovca 33

5.3. Scenarij 3. Spoj na CTS Grada Karlovca 35

5.4. Scenarij 4. Izgradnja ORC postrojenja 36

5.5. Scenarij 5. Izgradnja novog CTS-a baziranog na geotermalnoj dizalici topline 37

5.6. Scenarij 6. Kombinacija DT i kotla s električnim grijačem 39

5.7. Scenarij 7. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin 39

5.8. Scenarij 8. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu 40

6. REZULTATI TEHNO – EKONOMSKE ANALIZE 42

6.1. Scenarij 1 – Geotermalni ORC i CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska 42

6.2. Scenarij 2 - Geotermalni ORC i priključak na CTS grada Karlovca 44

6.3. Scenarij 3 - Geotermalni CTS s priključkom na grad Karlovac 45

6.4. Scenarij 4. Geotermalni ORC na lokaciji Rečica 46

6.5. Scenarij 5 - Novi CTS baziran na geotermalnoj toplinskoj dizalici topline 47

6.6. Scenarij 6 - Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s električnim grijačem 49

6.7. Scenarij 7 - Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s kotlom na prirodni plin .. 51

6.8. Scenarij 8 – Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s kotlom na biomasu 54

6.9. Usporedba rezultata tehno – ekonomske analize 56

7. ZAKLJUČAK 59

POPIS SLIKA

Slika 1. Geotermalni gradijent na području Hrvatske prikazan u °C/100m [2] 2

Slika 2. Gustoća toplinskog toka [12] 3

Slika 3. Pregled tehnologija [22] 4

Slika 4 Shematski prikaz sustava suhe pare [1] 5

Slika 5. Shematski prikaz sustava jednostrukog isparivanja [1] 6

Slika 6. Shematski prikaz sustava dvostrukog isparivanja [1] 7

Slika 7. Shematski prikaz binarnog ORC postrojenja [1] 8

Slika 8. Geotermalni potencijali na području EU [27] 9

Slika 9. instalirana snaga sustava grijanja baziranih na geotermalnoj energiji na području Europe [29] 9

Slika 10. Panonska i Dinaridska geološka regija [2] 10

Slika 11. Nalazišta termalne vode [2] 11

Slika 12. Generacijski pregled CTS-ova [15] 13

Slika 13. Zastupljenost različitih goriva u CTS-u [15] 13

Slika 14. Udio CTS-a u proizvodnji toplinske energije [33] 14

Slika 15. Cijena toplinske energije u CTS-ovima u Hrvatskoj [30] 15

Slika 16. Prikaz lokacije bušotina i naselja s potencijalom uvođenja CTS-a 16

Slika 17. Prikaz lokacije bušotina [2],[31] 18

Slika 18. GIS karta [7] 19

Slika 19. Dnevna raspodjela potrošnje PTV-a [4] 20

Slika 20. Prikaz područja rada i COP-ova nekih dizalica topline [6] 22

Slika 21. Veza opterećenja i učinkovitosti kotla na biomasu [18] 22

Slika 22. Ovisnost učinkovitosti kotla na prirodni plin o opterećenju [36] 23

Slika 23. Veza između temperature toplinskog izvora i snage [5] 24

Slika 24. Utjecaj djelomičnog opterećenja na relativnu učinkovitost ORC-a [26] 24

Slika 25. Shema postrojenja [26] 25

Slika 26. Prikaz modela poticanja OIE [24] 26

Slika 27. Kretanje cijena električne energije 27

Slika 28. Specifična cijena zrakom hlađenog ORC-a [9] 27

Slika 29. Cijena prirodnog plina u ovisnosti o količini izraženo u [kWh] [41] 29

Slika 30. Specifična investicija za kotao na biomasu [43] 30

Slika 31. Rad ORC-a 32

Slika 32. Rad CTS-a 32

Slika 33. CTS Rečica 33

Slika 34. CTS - Karlovac 34

Slika 35. Međuovisnost generiranja električne i toplinske energije 34

Slika 36. Veza nazivne snage sustava i faktora opterećenja 36

Slika 37. Rad dizalice topline 37

Slika 38. Temperature u sustavu 37

Slika 39. CTS Lanište 38

Slika 40. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla s električnim grijačem 39

Slika 41. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla na prirodni plin 40

Slika 42. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla na biomasu 41

Slika 43. Struktura troškova 42

Slika 44. Analiza osjetljivosti 43

Slika 45. Analiza osjetljivosti 43

Slika 46. Struktura troškova za slučaj najviše snage (10,32 MW) 44

Slika 47. Utjecaj prodajne cijene toplinske energije i snage na IRR 44

Slika 48. Struktura troškova 45

Slika 49. Utjecaj prodajne cijene i nazivne snage na IRR 46

Slika 50. Analiza osjetljivosti za scenarij izgradnje ORC postrojenja..... 46

Slika 51. Struktura troškova (DT = 23,18 MW) 47

Slika 52. Analiza osjetljivosti za slučaj primjene geotermalne dizalice topline 48

Slika 53. Utjecaj instalirane snage dizalice topline na IRR 49

Slika 54. Utjecaj instalirane snage dizalice topline na IRR 49

Slika 55. Struktura investicije za referentni slučaj (DT = 18 MW) 50

Slika 56. Utjecaj snage DT i cijene toplinske energije na IRR 51

Slika 57. Odaziv IRR na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na PP 52

Slika 58. Struktura troškova za referentni slučaj (DT = 12 MW) 52

Slika 59. Odaziv IRR na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na PP 53

Slika 60. Odaziv IRR-a na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na biomasu 54

Slika 61. Struktura troškova za referentni scenarij (DT = 14 MW)..... 55

Slika 62. Odaziv IRR-a na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na biomasu (bez toplinskih podstanica) 56

Slika 63. Prikaz IRR-a i NPV-a 57

Slika 64. Prikaz uštede emisija CO_2 po pojedinim scenarijima 57

Slika 65. Prikaz referentnih cijena toplinske energije, potrebnih cijena te potreban udio nepovratnih sredstva..... 57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva radioaktivnih izotopa u Zemljinoj kori [3] 4

Tablica 2. Pregled CTS-ova u Hrvatskoj [13] 14

Tablica 3. Pregled karakteristika geotermalnih bušotina na području grada Zagreba [11] 17

Tablica 4. Podaci o lokacijama 18

Tablica 5. Katalog dvostrukih predizoliranih cijevi proizvođača „ISOPLUS“ [23] 21

Tablica 6. Podaci o pojedinim dijelovima CTS-a [10] 28

Tablica 7. Ostali potrebni podaci 30

Tablica 8. Popis scenarija 31

Tablica 9. Podaci o scenariju1. ORC + CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska 32

Tablica 10. Podaci o scenariju 2. ORC + spoj na CTS Grada Karlovca 35

Tablica 11. Podaci o scenariju 3. Spoj na CTS Grada Karlovca 36

Tablica 12. Podaci o scenariju 4. izgradnja ORC postrojenja 36

Tablica 13. Podaci o scenariju 5. Izgradnja novog CTS-a baziranog na geotermalnoj dizalici topline 38

Tablica 14. Podaci o scenariju 6. DT + kotao s električnim grijačem 39

Tablica 15. Podaci o scenariju 7. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin 40

Tablica 16. Podaci o scenariju 8. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu 41

Tablica 17. Rezultati tehno ekonomske analize za referentni slučaj ORC + CTS 42

Tablica 18. Rezultati tehno - ekonomske analize za referentne vrijednosti varijante scenarija 1. kupci sami financiraju toplinske podstanice 43

Tablica 19. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 2. Geotermalni ORC i priključak na CTS grada Karlovca 45

Tablica 20. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 3. Geotermalni CTS s priključkom na grad Karlovac 45

Tablica 21. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 4. Geotermalni ORC na lokaciji Rečica 47

Tablica 22. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj samo dizalice topline 48

Tablica 23. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj samo dizalice topline (bez toplinskih podstanica)..... 49

Tablica 24. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + ELGR 50

Tablica 25. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + ELGR (bez toplinskih podstanica)..... 51

Tablica 26. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na PP 53

Tablica 27. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na PP (bez toplinskih podstanica)..... 54

Tablica 28. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na biomasu 55

Tablica 29. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na biomasu (bez toplinskih podstanica)..... 56

Tablica 30. Opis scenarija 58

POPIS KRATICA

Kratica	Puni naziv
CTS	Centralizirani toplinski sustav
CHP	Kogeneracija (engl. *Combined heat and power*)
CO_2	Ugljični dioksid
PTV	Potrošna topla voda
GIS	Geografski informacijski sustav
HET	Hrvatska energetska tranzicija
EU	Europska Unija
HEP	Hrvatska elektroprivreda
HROTE	Hrvatski operator tržišta energije
EIHP	Energetski institut Hrvoje Požar
DT	Dizalica topline
PP	Prirodni plin
OIE	Obnovljivi izvori energije
ppm	Dijelova na milijun (engl. *parts per million*)
IRR	Unutarnja stopa povrata (engl. *internal return rate*)
NPV	Neto sadašnja vrijednost (engl *neto present value*)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q_t	MWh	Satno toplinsko opterećenje
Q_{god}	MWh	Ukupna godišnja potražnja za toplinskom energijom
SS	°C	Razlika između projektne i vanjske temperature
$T_{projektna}$	°C	Projektna temperatura prostorije
$T_{vanjska}$	°C	Vanjska temperatura
Q_{PTVsat}	MWh	Satna toplinska potražnja tople vode
Q_{PTVgod}	MWh	Ukupna godišnja potražnja za potrošnom toplom vodom
μ	-	Faktor opterećenja
COP	-	Koeficijent učinkovitosti dizalice topline
T_{polaz}	°C	Temperatura polaska u CTS-u
T_{izvor}	°C	Temperatura izvora topline
ε	-	Carnotova efikasnost dizalice topline
P	MW	Snaga
m_w	kg/s	Maseni protok vode u CTS-u
ΔT	°C	Razlika temperature povrata i polaza u CTS-u
P_{el}	kW	Nazivna električna snaga
$Q_{mvodaORC}$	kg/s	Maseni protok vode kroz izmjenjivač topline
P_0	kW/kg	Specifična snaga
P_{th}	MW	Toplinska snaga
η_{th}	-	Toplinska učinkovitost
E_{biouk}	MWh	Ukupna energija koju kotao na biomasu treba dostaviti u CTS s uračunatim toplinskim gubitcima kotla
$E_{biopotr}$	MWh	Energija koju kotao na biomasu treba dostaviti u CTS
η_{kotao}	-	Učinkovitost kotla na biomasu
TP_i	kn/kWh	Tržišna premija u određenom vremenskom razdoblju
RV	kn/kWh	Referentna vrijednost električne energije
TC_i	kn/kWh	Tržišna cijena električne energije u određenom vremenskom razdoblju
Q_{lin}	kWh/m	Linearna gustoća toplinske energije
$l_{mreže}$	m	Duljina cijele mreže
C	kn/god	Godišnja naknada za korištenje izvora
E_{el}	kWh	Ukupna godišnja generirana električna energija
E_{heat}	kWh	Ukupna godišnja generirana toplinska energija
ω	kn/kWh	Prodajna cijena toplinske energije
m_{CO2}	kg	Godišnja ušteda emisija CO_2
E_{CH4}	kWh	Potrošnja prirodnog plin

Q_{mCH4}	kg/kWh	Specifična emisija CO_2 kod izgaranja prirodnog plina
El_{spec}	kg/kWh	Specifična emisija CO_2 elektroenergetskog sustava hrvatske
E_{el}	kWh	Potrošnja električne energije
PC_{geo}	kn/kWh	Poticajna cijena za električnu energiju iz geotermalnih postrojenja

SAŽETAK

Geotermalna energija je idealna tehnologija za povećanje udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne i toplinske energije. Povijesno je bila ograničena na geološki aktivnija područja, ali se napretkom prvenstveno ORC tehnologije ostvaruje mogućnost primjene na izvorima s relativno niskom temperaturom termalne vode. Korištenje geotermalne energije u svrhu grijanja sve više postaje mogućnost čak i kod izvora s niskim temperaturama. Nove energetski visokoučinkovite zgrade ne zahtijevaju visoke temperature u sustavu grijanja pa se toplinske potrebe mogu zadovoljiti i iz niskotemperaturnih izvora. Ukoliko zgrade nisu niskoenergetske ili je kombinacija zgrada raznih energetskih karakteristika što je i najčešći slučaj, postoji mogućnost korištenja geotermalnih dizalica topline samostalno ili u kombinaciji s nekom drugom tehnologijom.

U sklopu ovog rada su razmatrana moguća tehnička rješenja primjene geotermalne energije u svrhu proizvodnje električne i toplinske energije. Razmatrane su dvije lokacije (Rečica i Lanište) i za svaku je izrađeno nekoliko tehničkih rješenja. Prikazuje se proračun CTS-a i njegovih komponenata te geotermalnog binarnog ORC-a. Određivanje toplinskog opterećenja je provedeno stupanj – sat metodom, a radna karakteristika svake komponente sustava je modelirana pripadajućom funkcijom. Kako bi se odredila najbolja kombinacija instaliranih snaga pojedinih komponenata, provedena je tehno – ekonomska analiza.

Za slučaj lokacije „Rečica“ su napravljene 4 varijante korištenja izvora: izgradnja binarnog ORC postrojenja i CTS-a u obližnjim naseljima, izgradnja binarnog ORC postrojenja i spoja na CTS grada Karlovca, samo opskrba CTS-a u Karlovcu te izgradnja samo ORC postrojenja. Na lokaciji „Lanište“ je napravljeno također 4 varijanta: izgradnja novog CTS-a i opskrba putem geotermalne dizalice topline, kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla s električnim grijačem, kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin, kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu.

Na lokaciji „Rečica“ su svi scenariji s izuzetkom scenarija izgradnje ORC-a i novog CTS-a u naseljima Rečica i Luka Pokupska profitabilni s unutarnjim stopama povrata iznad 20 %. Najprofitabilniji je scenarij izgradnje geotermalnog ORC postrojenja. Scenariji razmatrani na lokaciji Lanište nisu isplativi unutar 15 godina te je potrebno uložiti nepovratna sredstva ili povećati cijenu toplinske energije. Najbolji od projekata na toj lokaciji je kombinacija geotermalne dizalice topline koja radi u baznom opterećenju te kotla na prirodni plin koji pokriva vršna opterećenja.

SUMMARY

Geothermal energy is reliable renewable energy source. It has historically been limited to usage only on geologically active locations, but with the advancements in ORC technology, it has become viable to use relatively low temperature heat sources.

New highly energy efficient buildings do not require high water temperature in their heating systems. Therefore, it is possible to use lower temperature heat sources. The most common case when designing district heating network is combination of buildings with differing thermal properties. In that case, additional heat source may be required to provide desired temperature of heating water. This can be geothermal heat pump standalone or in combination with electric heater, natural gas boiler or biomass boiler.

In this thesis, two possible locations (Rečica and Lanište) were analyzed for usage of geothermal energy in electricity and heat generation. Few technical solutions were made for each of them. This thesis describes the procedure of designing DH network with all of its components and geothermal binary ORC. Yearly heat load distributions were made by using the degree – hour method. Each component of the facility is described with mathematical function. For each scenario techno – economic analysis has been made. It shows which scenario is better and worth investing and also enables comparison between various scenarios.

At the site "Rečica", four scenarios were made: use of geothermal energy solely for electricity generation with ORC, combination of ORC and new district heating system in nearby towns Rečica and Luka Pokupska, combination of electricity generation in ORC and supply of existing district heating system in Karlovac City and only supply of DH in Karlovac. Four scenarios were also made for the second location, "Lanište": New district heating system based on geothermal heat pump, on combination of geothermal heat pump and electric heater, combination with the natural gas boiler and combination with biomass boiler.

All of the scenarios at the site "Rečica" with exception of new ORC and DH in Rečica and Luka Pokupska are profitable with internal return rate above 20 %. The most profitable scenario is the one which includes electricity generation in geothermal ORC facility. At the site "Lanište", none of the scenarios are profitable within 15 years. However, they can be made profitable with the application for EU funding or by increasing heat prices. The best scenario at this site is combination of geothermal heat pump for covering the base load with natural gas boiler for peak demand.

Key words:

ORC, Organic Rankine cycle, binary ORC, geothermal energy, district heating, electricity generation, renewable energy sources, heat pump, natural gas, biomass, boiler,

1. UVOD

Svjetske prosječne temperature zraka u posljednjih 100 godina neprestano rastu. Zabilježeni je porast od 1°C s obzirom na predindustrijske razine. Kao glavni uzrok tog rasta temperature je definirano povišenje udjela stakleničkog plina CO_2 u atmosferi. Uočeno je da najveći udio tog povećanja dolazi iz sagorijevanja fosilnih goriva. Uočeno je da se koncentracija CO_2 u atmosferi neprekidno povećava. Tako je sredinom 20. stoljeća bila oko 300 ppm, dok je 2013. godine premašila brojku od 400 ppm. [34]. Europa je povijesno najveći potrošač fosilnih goriva sa 36 % svih emisija. Nalazi ispred SAD-a sa 26 % i ispred Kine sa 13 % [35].

EU je već 2007. godine počela provoditi energetsku politiku s ciljem smanjenja emisija CO_2 i povećanjem korištenja obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne te toplinske energije. Jedna od mjera smanjenja emisija je povećanje energetske efikasnosti postojećih sustava kao što je energetska obnova zgrada i uvođenje centraliziranih sustava grijanja. 2008. je usvojeni paket mjera 20-20-20 koji uključuju smanjenje emisija do 2020 za 20 %, u odnosu na 1990., 20% udjela obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije i 20 % manju potrošnju energije. 12. prosinca 2015. u Parizu je postignut sporazum o klimatskim promjenama u kojeg je potpisalo 184 zemalja svijeta. Cilj sporazuma je ograničiti porast prosječnih svjetskih temperatura ispod 2 °C, a po mogućnosti na 1,5 °C. Novi paket mjera koji se odnosi za razdoblje do 2030. godine predviđa smanjenje emisija u odnosu na 1990. za 40 %, a do 2050 za 80 do 95 %. Također se traži udio OIE u ukupnoj proizvodnji energije sa 27 % te povećanje energetske učinkovitosti za 27 %. Ispunjenjem ovih ciljeva se predviđa sniženje troškova proizvodnje električne energije.

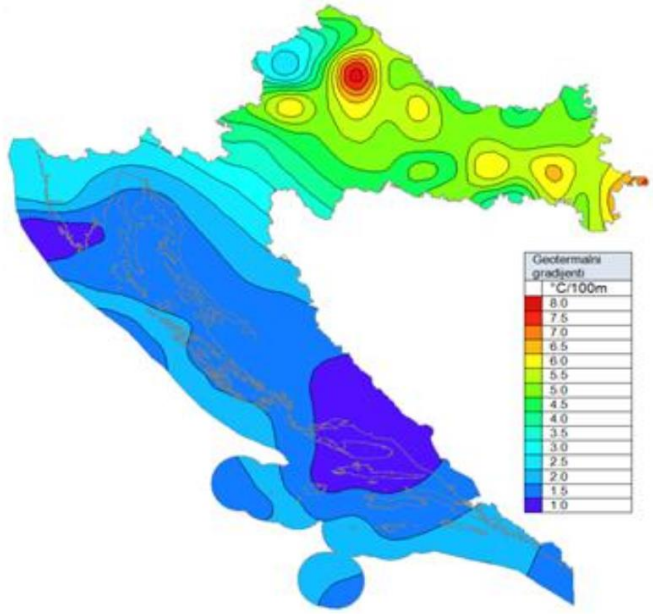
Prelaskom na OIE, kapitalne investicije u proizvodna postrojenja preuzimaju najveći dio svih životnih troškova postrojenja, dok su operativni troškovi manji. Povećanjem lokalne proizvodnje iz obnovljivih izvora se povećava energetska sigurnost Europe, ubrzava rast grana industrije povezanih sa energetikom i energetskom učinkovitošću i stvaraju nova radna mjesta. Smanjenjem emisija dolazi do brojnih pozitivnih učinka na okoliš i zdravlje.

Tehnologije proizvodnje električne i toplinske energije iz OIE su među ostalim zahvaljujući pozitivnim energetskim politikama EU došle do visoke razine razvijenosti gdje po proizvodnoj cijeni energije konkuriraju ili sve češće nude nižu cijenu od klasičnih tehnologija baziranih na fosilnim gorivima. Jedna od tehnologija koja se razmatra u ovom radu je geotermalno binarno ORC postrojenje koje svoj razvoj duguje razvoju klimatizacijske tehnologije i ORC postrojenja prvobitno namijenjenih iskorištavanju biomase.

2. GEOTERMALNA ENERGIJA

Riječ „*geotermal*“ dolazi iz grčkog „*geo*“ što znači Zemlja i „*therme*“ toplina. Geotermalna energija je smatrana obnovljivim i čistim energetskim izvorom. Korištenje geotermalne energije ima vrlo dugu povijest i moguće ju je koristiti na različite načine. Tisućama godina je korištena u svrhu pranja, kuhanja, kupanja i u ljekovite svrhe.

Začeci korištenja geotermalne energije u svrhu grijanja sežu do četrnaestog stoljeća do Francuskog gradića Chaudes-Aigues. Prva bušotina u svrhu iskorištavanja termalne vode je izrađena u blizini grada Reykjavika na Islandu 1755. dok se tek tokom 20. stoljeća geotermalna energija počela iskorištavati na komercijalnoj razini za proizvodnju električne i toplinske energije. Prva komercijalna elektrana pogonjena geotermalnom energijom je počela s radom 1913. godine u Laderellou, Italija, a prvi veći centralizirani toplinski sustav grijanja na Islandu 1930-ih.

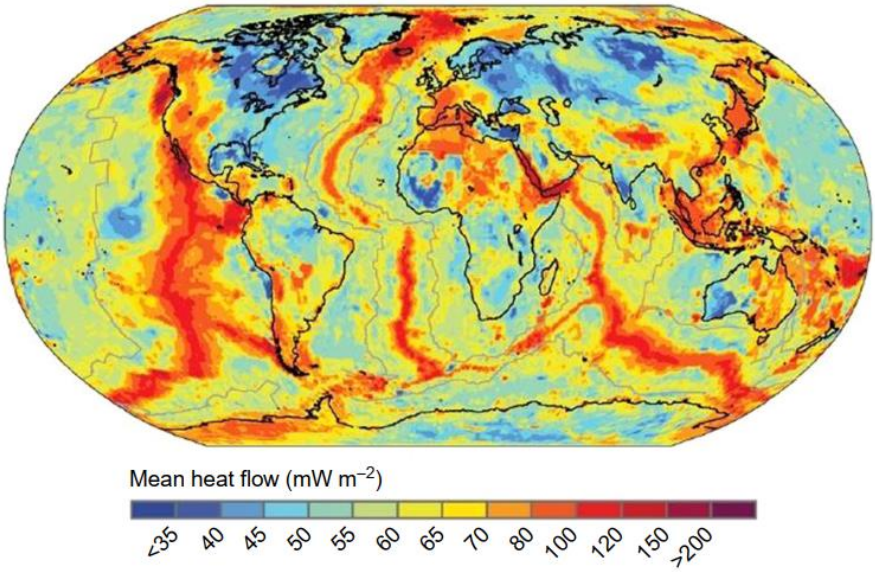


Slika 1. Geotermalni gradijent na području Hrvatske prikazan u °C/100m [2]

Karakteristika kojom se definiraju potencijalna nalazišta geotermalne energije se naziva geotermalnim gradijentom. Slika 1. prikazuje Geotermalni gradijent na području Republike Hrvatske. Geotermalni gradijent opisuje brzinu prirasta temperature s povećanjem dubine. Tako se na nekim mjestima visoke temperature stijena ili vode mogu doseći relativno blizu površine, dok je negdje potrebno ići puno dublje da se dosegne ista temperatura. Geotermalni gradijent je usko povezan s gustoćom toplinskog toka na površini i također služi procjeni geotermalnog potencijala. Na iznos gustoće toplinskog toka utječu dubina i temperatura izvora, toplinska svojstva stijena i hidrološka svojstva područja. Slika 2. prikazuje raspodjelu gustoće toplinskog toka na karti Zemlje.

Ustanovljeno je da energija oslobođena radioaktivnim raspadom u Zemljinoj kori iznosi $8 \cdot 10^{12}$ W, u plaštu $32 \cdot 10^{12}$ W, a jezgri $1{,}7 \cdot 10^{12}$ W. Zbroj toplinskog toka po površini Zemlje čini 42 TW. Većina ove energije je današnjim tehnologijama nedostupna za iskorištavanje, ali na

nekim područjima ovisno o geološkoj aktivnosti i sastavu kore postoji veći geotermalni potencijal iskazan u gustoći toplinskog toka i geotermalnom temperaturnom gradijentu.



Slika 2. Gustoća toplinskog toka [12]

Ovisno o karakteristikama nalazišta postoje različite tehnologije iskorištavanja geotermalne energije. Za temperature više od 100 °C ekonomičnije ju je koristiti u proizvodnji električne energije i ta se isplativost eksponencijalno povećava rastom temperature nalazišta. Kod nisko-temperaturnih nalazišta (ispod 100 °C) je isplativo iskorištavanje samo u ogrjevne svrhe Ukoliko nije zadovoljena minimalna polazna temperatura polaska mreže centraliziranog toplinskog sustava, uobičajeno je koristiti geotermalne dizalice topline koje služe dogrijavanju, ali je moguća primjena i drugih izvora toplinske energije kao što su otpadna toplina, kotlovi na biomasu, Sunčevo zračenje i slično.

Iskorištavanje geotermalne energije se može podijeliti n:

1) Direktno iskorištavanje toplinske energije za procese grijanja
2) Proizvodnja električne energije

2.1. Struktura Zemlje

Unutrašnjost Zemlje se sastoji od više slojeva u obliku ljusaka različitih karakteristika. U samom centru se nalazi kruta željezna jezgra okružena tekućom vanjskom jezgrom. Najveći dio unutrašnjosti zauzima plašt dok se na njemu nalaze tektonske ploče. Unutrašnja jezgra je izvor topline koja se konvekcijskim strujama prenosi sve do Zemljine kore i površine.

2.2. Podrijetlo geotermalne energije

Geotermalna energija je definirana kao energija pohranjena u unutrašnjosti Zemlje. Podrijetlo joj je u radioaktivnom raspadu elemenata u Zemljinoj jezgri i zaostaloj toplini formacije Zemlje. Pretvorba kinetičke energije međuzvjezdanih tijela u sudaru s Zemljom je dovela do velikog povećanja temperature u unutrašnjosti Zemlje, a toplinski tok uočljiv na površini je rezultat

velikog temperaturnog gradijenta unutrašnjosti Zemlje (oko 5700K) do prosječne temperature svemira (3 K). Radioaktivnom raspadu se pridodaje 60% oslobođene topline, dok je ostatak oslobođen postupnim hlađenjem Zemljine jezgre. Većina topline oslobođene radioaktivnim raspadom se pridodaje elementima s vrlo dugim vremenom poluraspada. Tablica 1. prikazuje vrijeme poluraspada i specifičnu oslobođenu toplinu izotopa Urana (U-238 i U-235), Torija (Th-232) i Kalija (K-40). Najveći udio navedenih radioaktivnih elemenata se nalazi približno podjednako raspoređeni u površinskom sloju starije kontinentalne, ali ih nedostaje u puno mlađoj oceanskoj kori. [3]

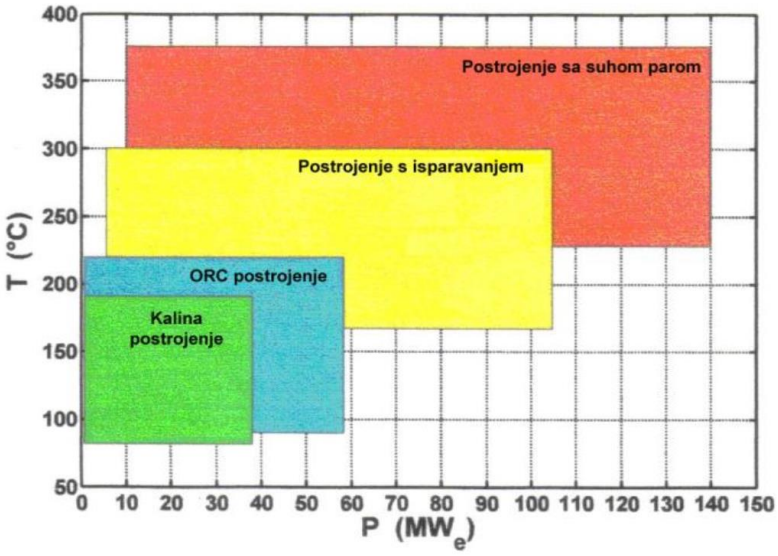
Iznimka ovom pravilu su geološki aktivna područja u blizini vulkana na rubovima tektonskih ploča ili blizu rubova u slučaju podvlačenja jedne tektonske ploče ispod druge. U tim područjima većina oslobođene topline dolazi iz prisustva magme u blizini površine Zemlje.

Tablica 1. Svojstva radioaktivnih izotopa u Zemljinoj kori [3]

Izotop	Vrijeme poluraspada (godine)	Proizvodnja topline J kg^{-1} god^{-1}
U-238	$4{,}5 \cdot 10^9$	$2{,}97 \cdot 10^3$
U-235	$0{,}71 \cdot 10^9$	$18{,}01 \cdot 10^3$
Th-232	$13{,}9 \cdot 10^9$	$0{,}83 \cdot 10^3$
K-40	$1{,}3 \cdot 10^9$	$0{,}92 \cdot 10^3$

2.3. Proizvodnja električne energije

Proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora je vrlo pogodna i uklapa se u energetske strategije bazirane na niskom udjelu fosilnih goriva. Glavna karakteristika je vrlo niska ili nulta emisija CO_2 što ponajprije ovisi o primijenjenoj tehnologiji.



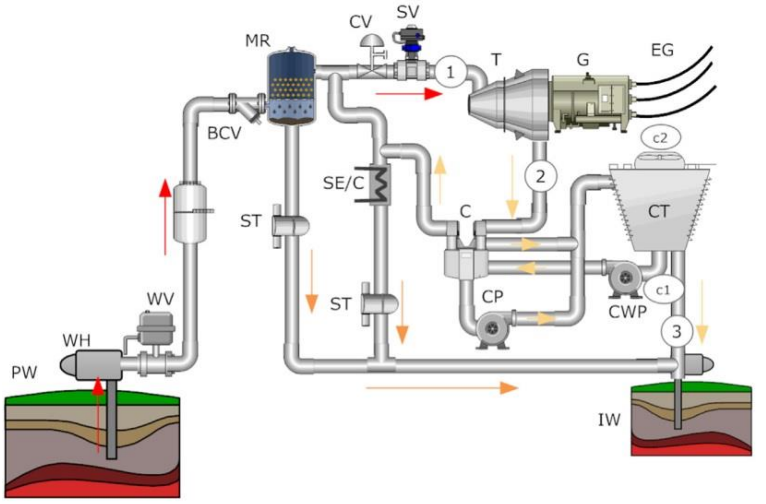
Slika 3. Pregled tehnologija [22]

Kao problem se često javljaju visoki investicijski troškovi i nesigurnost stvarnih karakteristika nalazišta prije same izrade ispitnih bušotina. Rješenje ovog problema je u korištenju već izrađenih bušotina u svrhu istraživanja ugljikovodika čime se postavljaju ograničenja mjesta

primjene jer samo u tom području postoje pouzdani podaci o nalazištu, ali se i bitno snižavaju troškovi kapitalne investicije. Slika 3. daje pregled primjene geotermalne energije i okvirne granice primjene različitih tehnologija generiranja električne energije.

2.3.1. Sustav suhozasićene pare (engl. dry steam)

Sustav suhozasićene pare se primjenjuje na nalazištima s najvišim iznosom temperature, tlaka i entalpije. Osnovna karakteristika je da na izvoru nema termalne vode, nego izlazi visokotlačna suho-zasićena para. Zbog visokih parametara je ova tehnologija najpovoljnija za proizvodnju električne energije. Dodatna je prednost mogućnost izravnog korištenja pare uz osnovno filtriranje u parnoj turbini što svodi kompleksnost postrojenja i specifične investicijske troškove na minimum u usporedbi s drugim tehnologijama. Ovu tehnologiju je moguće primijeniti na vrlo malom broju lokacija koje zadovoljavaju potrebne uvjete što joj je ujedno i najveći nedostatak. Slika 4. prikazuje shemu ovog tipa postrojenja. Ovakva nalazišta se nalaze u geološki aktivnim područjima u blizini aktivnih vulkana.



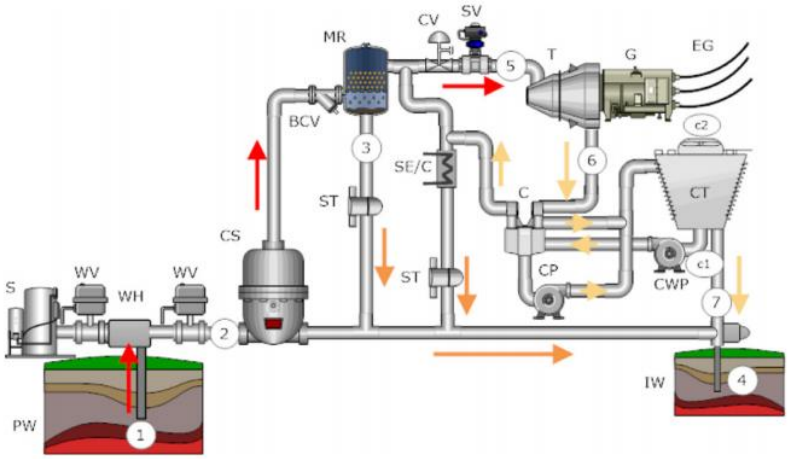
PW	Production well	BCV	Ball check valve	SE	Steam jet ejectors
WH	Wellhead	MR	Moisture remover	C	Condenser
WV	Well valves	ST	Steam tramp	CP	Condensate pump
IW	Injection well	CV	Control valve	CWP	Condensed water pump
EG	Electric grid	SV	Stop valve	T/G	Turbine- Generator

Slika 4 Shematski prikaz sustava suhe pare [1]

2.3.2. Sustav jednostrukog isparivanja (engl. Single flash)

Slika 5. prikazuje sustav jednostrukog isparivanja se koristi na termalnom izvorima gdje izlazi visokotlačna termalna voda temperature više od 260 °C. Pošto je potrebno iz visokotlačne vode dobiti vodenu paru za korištenje u parnoj turbini, potrebno joj je sniziti tlak i time joj omogućiti prelazak u zasićeno područje. Ovo sniženje tlaka se ovisno o izvedbi postrojenja može dogoditi u bušotini uslijed pada hidrostatskog tlaka (u tom slučaju se već na izvoru dobiva voda u zasićenom području), prigušivanjem na izlazu iz bušotine, ili na ulazu u ciklonske separatore. Ciklonski separatori se koriste za odvajanje dviju faza na temelju razlika u gustoći te u svrhu izdvajanja nečistoća iz termalne vode koje mogu oštetiti parnu turbinu. Vodena para zatim odlazi u parnu turbinu gdje ekspandira do kondenzatorskog tlaka uz pretvorbu toplinske u

mehaničku energiju koja se transformira u električnu u električnom generatoru. Tlak do kojeg se odvija ekspanzija je određen temperaturom rashladnog medija. U ovoj vrsti postrojenja se otopljeni plinovi u termalnoj vodi izdvajaju zbog pada tlaka termalne vode. Ovisno o lokaciji, to su najčešće CO_2, CH_4 i H_2S. Ti plinovi se tretiraju prije puštanja u atmosferu, a u hibridnim postrojenjima se još dodatno u plinskim motorima iskorištava metan CH_4. Ovo znači da ovaj tip postrojenja nije CO_2 neutralan, ali su emisije relativno male u usporedbi s klasičnim termoelektranama. (0.06kg/kWh) [2].

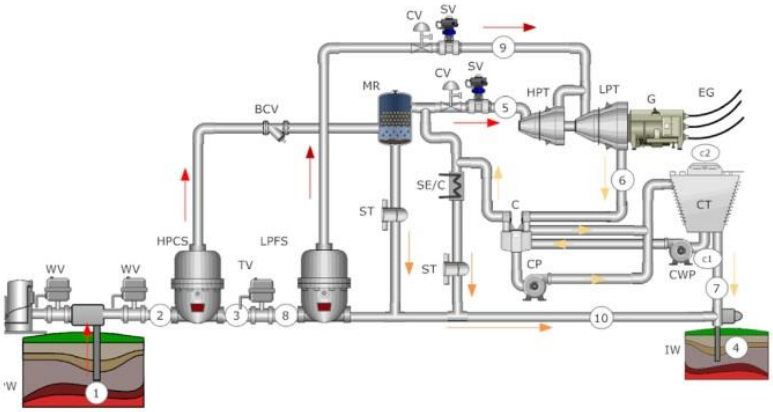


PW	Production well	BCV	Ball check valve	SV	Stop valve
S	Silencer	MR	Moisture remover	SE	Steam jet ejectors
WV	Well valves	ST	Steam tramp	C	Condenser
CS	Cyclone separator	CV	Control valve	CP	Condensate pump
IW	Injection well	EG	Electric grid	CWP	Condensed water pump
G	Generator	T	Turbine	WH	Wellhead

Slika 5. Shematski prikaz sustava jednostrukog isparivanja [1]

2.3.3. Sustav dvostrukog isparivanja (engl. Double flash)

Geotermalne elektrane koje rade na principu dvostrukog isparivanja su slične izvedbi s jednostrukim isparivanjem. Slika 6. prikazuje shemu ovog tipa postrojenja u kojoj se vidi razlika u usporedbi s sustavom jednostrukog isparivanja. Razliku čini uvođenje još jednog stupanja izdvajanja vodene pare iz preostale vode nakon prvog isparivanja, a time i dvostupanjsku ekspanziju u parnoj turbini. U prosjeku se dobiva do 25 % više snage, ali su također i viši investicijski troškovi i troškovi održavanja zbog povećane kompleksnosti postrojenja. Dodavanjem još jednog izdvajanja pare se povećava iskorištavanje istog izvora. Sa svakim izdvajanjem pare u ciklonskim separatorima dolazi do značajnog pada tlaka pa time para dobivena u drugom izdvajanju ima značajno niže parametre od vodene pare dobivene u prvom izdvajanju. Ovisno o izvedbi postrojenja postoje dvije mogućnosti iskorištavanja vodene pare iz drugog izdvajanja. Može se odvoditi u niskotlačni dio turbine i ekspandirati do kondenzatorskog tlaka zajedno s vodenom parom iz prvog izdvajanja ili se može koristit potpuno odvojeni sustav s niskotlačnom turbinom u kojem sudjeluje samo vodena para iz drugog izdvajanja. Nakon prolaska i ukapljivanja u kondenzatoru, potrebno je nastali kondenzat vraćati u utisnu bušotinu s ciljem zadržavanja hidrološke stabilnosti sustava.



PW	Production well	SV	Stop valve	MR	Moisture remover
S	Silencer	SE	Steam jet ejectors	ST	Steam tramp
WV	Well valves	C	Condenser	CV	Control valve
BCV	Ball check valve	CP	Condensate pump	TV	Throttle valve
IW	Injection well	HPT	High pressure turbine	G	Generator
CWP	Condensed water pump	LPT	Low pressure turbine	EG	Electric grid
HPC	High pressure cyclone	LPF	Low pressure flash	WH	Wellhead
S	separator	S	separator		

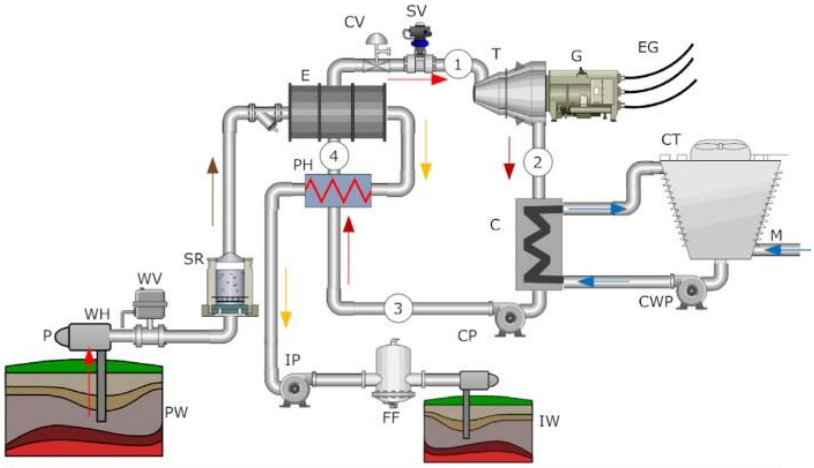
Slika 6. Shematski prikaz sustava dvostrukog isparivanja [1]

2.3.4. Binarni Organski Rankineov i Kalina ciklus

Binarni ciklus čiju shemu prikazuje Slika 7. je naziv za kružne cikluse u kojima se koriste dvije različite radne tvari u dva odvojena ciklusa. Binarna postrojenja su najprikladnija za temperaturni režim izvora između 120 i 150 °C, ali je moguće iskorištavanje izvora s temperaturom od 85 do 170 °C no tad se kod nižih temperatura pojavljuju problemi s vrlo visokim specifičnim investicijskim troškovima po instaliranoj snazi. Kod viših temperatura pak dolazi do problema s stabilnošću izmjene topline u izmjenjivačima topline zbog povećanog udjela parne faze koja smanjuje koeficijent prijelaza topline. Razlog korištenja druge radne tvari u odvojenom ciklusu je povoljnija krivulja napetosti kapljevina-para tj. niže temperature prelaska u paru u usporedbi s vodom što omogućuje rad s nisko-temperaturnim toplinskim izvorima. Drugi značajan razlog je potpuna odvojenost parno-turbinskog ciklusa od termalne vode. Time se smanjuje mogućnost akumulacije minerala na parno-turbinskom dijelu sustava i oštećenje parne turbine raznim nečistoćama u termalnoj vodi. Binarni ciklus je također najpovoljniji s strane emisija jer je termalna voda cijelo vrijeme pod tlakom na izlazu iz bušotine pa je smanjeno isplinjavanje otopivih plinova u vodi. Kod nekih postrojenja ne postoje emisije jer se ovisno o količini plinova, oni također kao i termalna voda tlače i vraćaju pod zemlju putem utisne bušotine.

Dodatan razlog za odabir ove tehnologije su niske potrebe za održavanjem jer su mnogi dijelovi postrojenja standardizirani zbog velike rasprostranjenosti ORC postrojenja. Niska potreba za održavanjem za sobom povlači i potreban manji broj zaposlenih. Također, zaposlenici u ORC postrojenju nisu podložni obvezi visokostručne naobrazbe kakva se javlja u parno-turbinskim postrojenjima zbog vrlo visokih tlakova i temperatura.

Kalina ciklus je modifikacija ORC-a. koristi se mješavina dvije tekućine s različitim točkama isparavanja. Najčešće je to mješavina amonijaka i vode. Jedna od prednosti ovog ciklusa je njegova viša termodinamička učinkovitost postignuta višom temperaturom dovođenja i nižom odvođenja što je moguće postići zbog činjenice da se radi o mješavini. Postoji tek mali broj postrojenja koje rade na ovom ciklusu pa još nedostaje široke dostupnosti komponenata i iskustva kao kod ORC-a.



PW	Production well	E	Evaporator	CV	Control valve
P	Pump	PH	Preheater	SV	Stop valve
WH	Wellhead	IP	Injection pump	T	Turbine
WV	Well valve	FF	Final filter	G	Generator
SR	Sand remover	IW	Injection well	EG	Electric grid
C	Condenser	CP	Condensate pump	CWP	Cooling water pump
M	Make-up water	CT	Cooling tower		

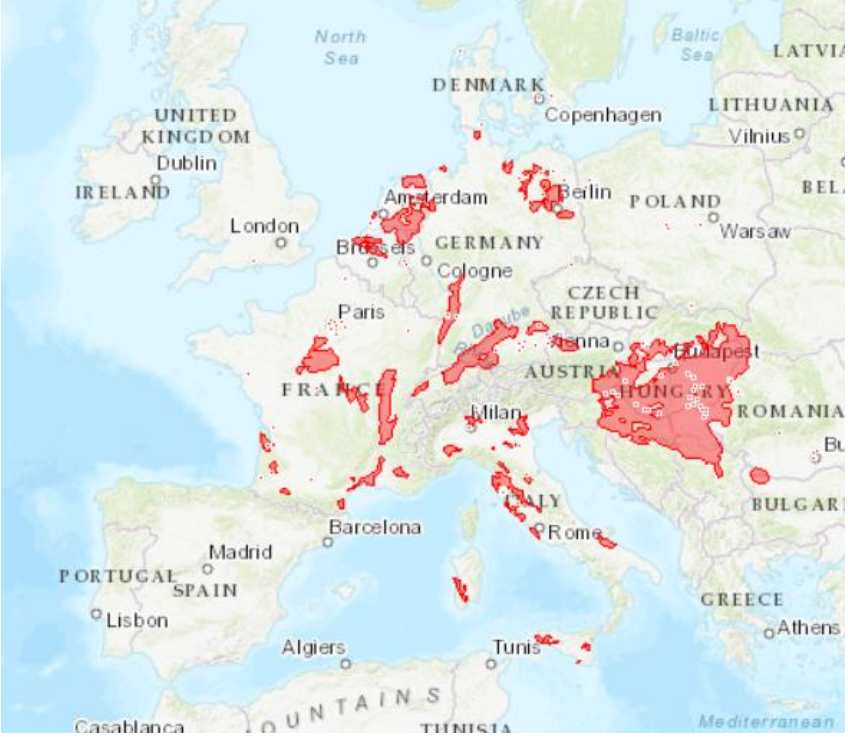
Slika 7. Shematski prikaz binarnog ORC postrojenja [1]

2.4. Geotermalna energija u Europi

Veći dio površine Europe se nalazi u prosječno geološki prosječno aktivnom području s prosječnim površinskim toplinskim tokom između 30 i 40 mW/m^2. Prosječni toplinski tok iznosi 30 mW/m^2. Na području nekih dijelova kontinenta je taj iznos mnogo viši. Tako se na jugu Europe i na Islandu površinska gustoća toplinskog toka kreće oko 100 mW/m^2. Slične karakteristike imaju i područja Panonskog bazena s toplinskim tokom od oko 80 mW/m^2 [20].

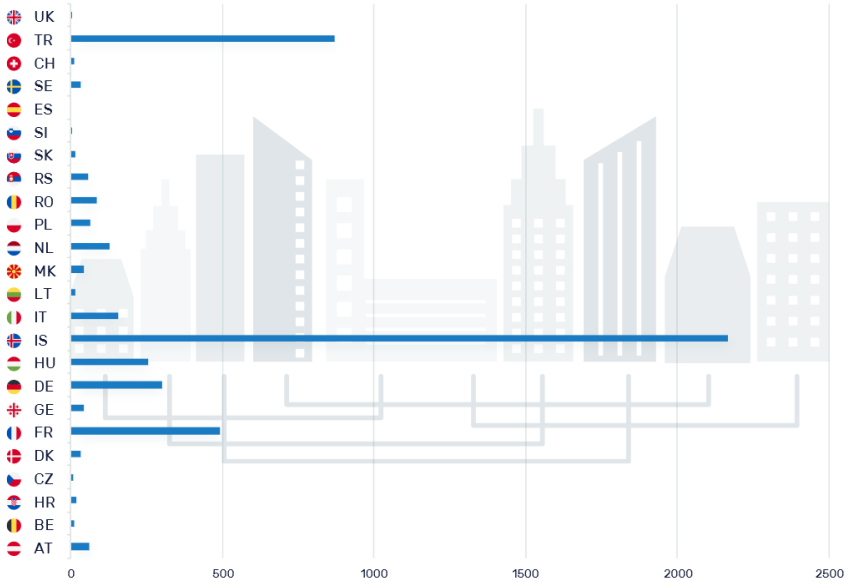
U Europskoj Uniji je instalirano 4.869 MW toplinske energije u izravnim sustavima grijanja [28]. dok je u sustavima potpomognutim dizalicama topline instalirano oko 22.900 MW. Također je instalirano 950 MW geotermalnih elektrana koje zajedno zadovoljavaju 0,2 % ukupnih energetskih potreba EU-a [21].

Slika 8. prikazuje crvenom bojom označena područja s temperaturom iznad 90°C na dubini od 1.000 m te time ukazuje na lokacije brojnih potencijalnih geotermalnih elektrana ili CTS-ova. Bijelim kružićima na istoj karti su označeni već postojeći CTS-ovi barem djelomično opskrbljivani geotermalnom energijom



Slika 8. Geotermalni potencijali na području EU [27]

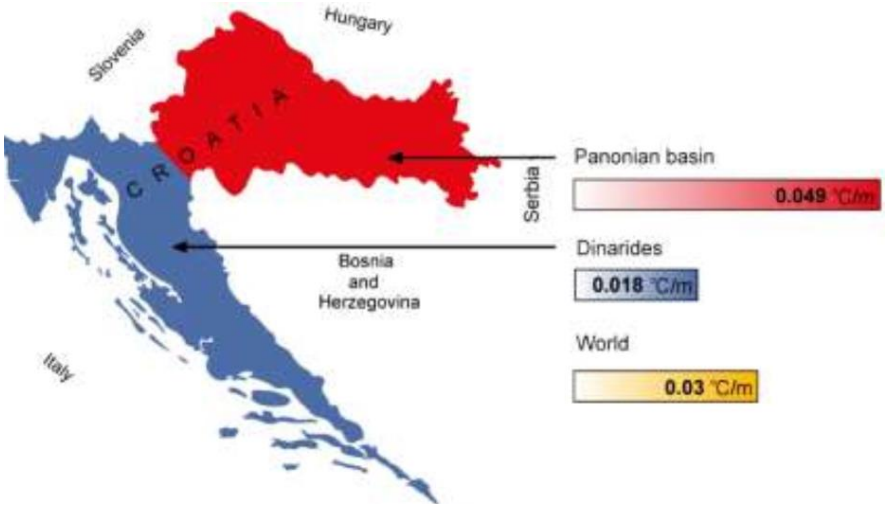
Slika 9. prikazuje instalirane kapacitete u [MW] sustava grijanja na području Europe baziranih na geotermalnoj energiji. Vidljivo je da je geotermalna energija najzastupljenija na Islandu gdje zadovoljava 85 % toplinskih i 27 % potreba za električnom energijom. Visok udio geotermalne energije je također i u Francuskoj. U gradu Parizu se primjerice dio CTS-a opskrbljuje iz geotermalnih izvora.



Slika 9. instalirana snaga sustava grijanja baziranih na geotermalnoj energiji na području Europe [29]

2.5. Geotermalna energija u Hrvatskoj

Republika Hrvatska se prostire duž dva različita geološka područja što prikazuje Slika 10. Sjeverni dio se nalazi na Panonskom bazenu, a jugo-zapadni na Dinaridskom bazenu. Ova dva područja imaju bitno različite geološke značajke. Tako se debljina kontinentalne kore u Panonskom bazenu kreče između 25 i 30 km, dok se u Dinaridskom kreče između 35 i 40 km. Debljina kontinentalne kore ima značajan utjecaj na iznos temperaturnog gradijenta i prosječnog toplinskog toka. Na području Hrvatske se temperaturni gradijent kreče između 0.018 do 0.07°C/m, a toplinski tok od 60 do 100mW/m^2. Slika 10. prikazuje podjelu Hrvatske s obzirom na geološka svojstva.



Slika 10. Panonska i Dinaridska geološka regija [2]

Mnoga geotermalna polja u Hrvatskoj kao Varaždinske toplice i Bizovačke toplice su otkrivena još za vrijeme Rimskog Carstva gdje su građene terme

U drugoj polovici 20. stoljeća je izrađeno više od 4.000 dubinskih bušotina u potrazi za ugljikovodicima. Slika 11. prikazuje lokacije na kojima je pronađena termalna voda.

Ukupni geotermalni potencijal u svrhu proizvodnje električne energije u Hrvatskoj iznosi 45,8 MW_e, a u svrhu proizvodnje toplinske energije 812 MW_t. Od 812 MW_t dostupnih se trenutno u svrhu grijanja 16 toplica i 2 objekta iskorištava tek 37 MW_t. [19]

Trenutno se u Hrvatskoj nalaze dvije geotermalne elektrane:

1) Geotermalna elektrana Velika Ciglena je prvo takvo postrojenje u Hrvatskoj. Vlasništvo je tvrtke Geoen- MB Holding. Postrojenje se nalazi u blizini grada Bjelovara, a koristi izvor s najvišim geotermalnim potencijalom u Hrvatskoj s temperaturom od 176 °C i izdašnosti od 200 l/s. Instalirana je snaga 17,5 MW_e, a radi na principu binarnog ORC-a što je ujedno jedno od najvećih ORC postrojenja u Europi. Izvor termalne vode je kao i kod većine nalazišta pronađen slučajno 1990. tijekom istraživanja ugljikovodika od strane INA-Naftaplin. Trenutno se nalazi u probnom radu i očekuje se puštanje u pogon početkom 2019. godine. U ovoj fazi projekta je planirana proizvodnja samo električne energije, ali postoje planovi za izgradnju i opskrbu termalnom vodom CTS-a u gradu Bjelovaru. [2], [16]

2) Hibridna geotermalna elektrana Draškovec se nalazi u Panonskom bazenu na sjeverozapadu Hrvatske u blizini grada Preloga. Temperatura termalne vode na izlazu iz bušotine je između 70 i 77°C s izdašnosti od 25 l/s. Karakteristika ovog izvora je u visokoj koncentraciji otopljenih plinova u vodi. Među otopljenim plinovima u termalnoj vodi se nalazi i prirodni plin koji se planira iskorištavati u plinskim motorima s unutrašnjim izgaranjem, a nastali CO_2 stlačiti i vračati pod zemlju zajedno s povratnom strujom vode u utisnu bušotinu. Električna energija će se proizvoditi također u nisko-temperaturnom ORC-u. Plan je u prvoj fazi proizvoditi 3,6 MW_e i 10 MW_t dok se izgradnjom dodatnih bušotina predviđa proširenje na 18,6 MW_e i 60 MW_t. Toplinskom energijom se planira napajati CTS u gradu Prelogu čija je izgradnja također planirana i spa centar pokraj lokacije same elektrane.

2.6. Centralizirani toplinski sustavi

Slika 11. Nalazišta termalne vode [2]

Centralizirani toplinski sustavi ili sustavi daljinskog grijanja su sustavi kod kojih se toplinska energija u obliku tople vode ili vodene pare proizvodi izvan zgrade čije potrebe za toplinskom energijom zadovoljava. Korištenjem CTS-a se smanjuju troškovi proizvodnje toplinske energije i emisije koje se također svode na nižu razinu zbog veće mogućnosti kontrole emisija i optimiranja proizvodnje toplinske energije na velikom centraliziranom postrojenju u usporedbi s manjim decentraliziranim postrojenjima. U slučaju korištenja kogeneracije, se integracijom CTS-a povećava učinkovitost cijelog postrojenja. Prednost CTS-a nad klasičnim kotlovima je što CTS kao izvor topline može koristiti veliki broj tehnologija te je moguća jednostavna implementacija OIE.

Toplina potrebna za zagrijavanje vode u CTS-u se može dobiti spaljivanjem goriva što uključje fosilna goriva, biomasu i otpad. Također se može dobiti u sklopu kombinirane proizvodnje električne i toplinske energije u termoenergetskim postrojenjima. U novije vrijeme sve češće korištenje električne energije za pogon dizalica topline ili otporničkih grijača ili proizvodnje toplinske energije putem sunčevih kolektora. Na nekim lokacijama je također geotermalna energija česti izvor toplinske energije.

2.6.1. Princip rada CTS-a

Toplinska energija se proizvodi u centralnom postrojenju, a transportira se do krajnjih korisnika putem mreže cijevi, tj. toplovodom. Većina sustava koristi dvije cijevi, jednu za polaz, a druga za povrat vode dok postoje i sustavi s jednom ili tri cijevi. Sustavi s jednom cijevi su zastupljeni u područjima gdje se kao radni medij koristi vodena para prvenstveno u industrijske svrhe. Sustav s tri cijevi se koristi kod sustava centraliziranog hlađenja kad je u ljetnoj sezoni potrebno dostavljati hladnu vodu u svrhu hlađenja, a u isto vrijeme postoji i potreba za dostavom toplinske energije za potrebe potrošne tople vode (PTV).

Bitan dio CTS-a su toplinske podstanice putem kojih se krajnji potrošači priključuju na sustav i time se hidraulički odvaja osnovni krug cijevi kojima se dostavlja toplina i krug unutar same zgrade na koji su spojeni krajnji potrošači (ogrjevna tijela).

Toplinska stanica poprima ulogu izvora topline u zgradi. Sadrži odvojene izmjenjivače topline za sustav grijanja i PTV te svu potrebnu mjernu i regulacijsku opremu.

2.6.2. Razvoj i povijest centraliziranih toplinskih sustava

- Prva generacija CTS-a

Prvi sustavi se pojavljuju krajem 19. stoljeća u SAD-u. Kao prijenosnik topline se koristi vodena para do temperature od 200°C. cijevi nisu toplinski izolirane pa nastaju veliki toplinski gubitci koji ograničuju primjenu i širenje mreže. Većina ovih sustava je zamijenjena naprednijom drugom generacijom 1930-ih godina, ali su se u nekim gradovima kao što su New York i Pariz zadržali.

- Druga generacija CTS-a

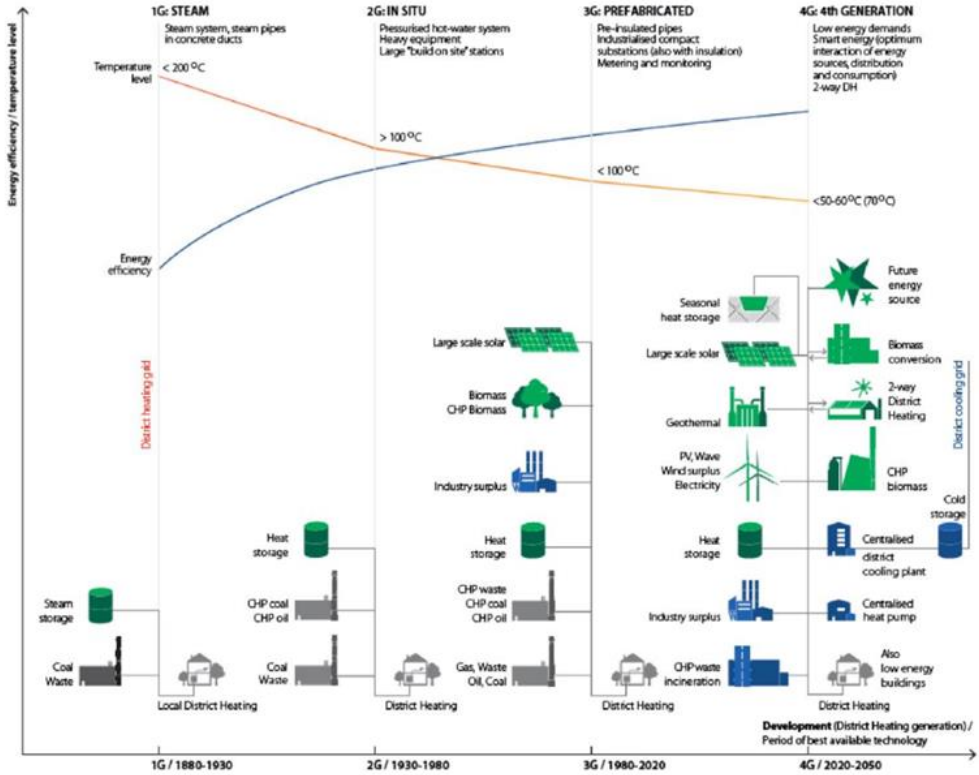
Pojavljuje se 1930-ih. Napredak u tehnologiji proizvodnje čeličnih cijevi omogućuju korištenje vode u kapljevitom stanju na temperaturama polaza višim od 100°C. Zbog korištenja vode u kapljevitom stanju i postojanja povratnog voda su smanjeni toplinski gubitci. Manji toplinski gubitci omogućuju širenje distribucijske mreže. Ovaj tip sustava je masovno korišten u zemljama bivšeg Sovjetskog Saveza i smatra se začetkom korištenja principa kogeneracije.

- Treća generacija CTS-a

Smatra se odgovorom na naftnu krizu 1973. pa se uvode dodatne mjere smanjenja gubitaka. Glavna mjera štednje je smanjenje temperature polaska ispod 100°C. U izvore topline se uključuju sunčeva energija, biomasa i industrijski otpad.

- Četvrta generacija CTS-a

Glavna karakteristika sustava četvrte generacije je dodatno sniženje temperature polaza ispod 60°C do 70°C. Moguća je primjena samo u slučaju niskih toplinskih potreba, tj. grijanja visoko toplinski učinkovitih zgrada. U proizvodnju toplinske energije se uključuju *„power to heat“* rješenja kao dizalice topline, i električni kotlovi. Također se omogućuje krajnjim potrošačima sudjelovanje u proizvodnji topline (solarni kolektori). Uvode se i napredne tehnologije pametne regulacije i integracije svih sektora (engl. *Smart system*) [49]

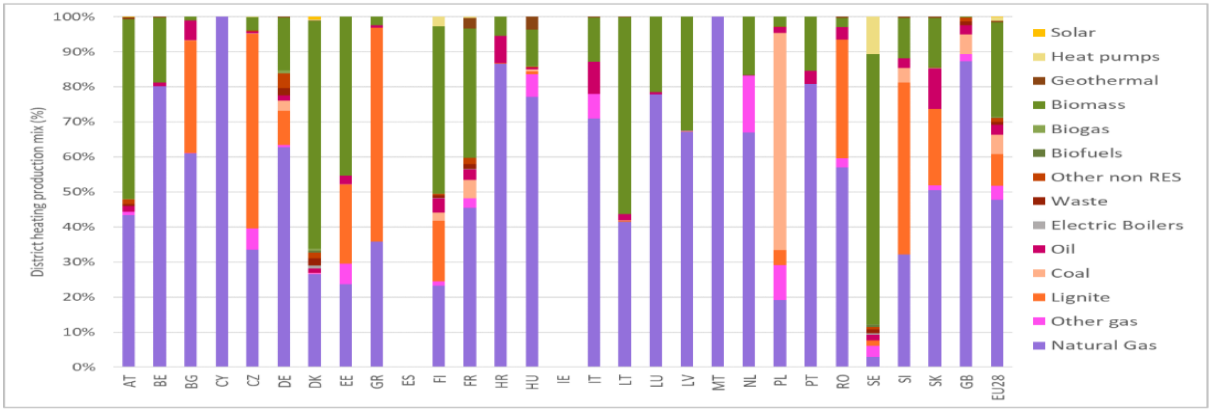


Slika 12. Generacijski pregled CTS-ova [15]

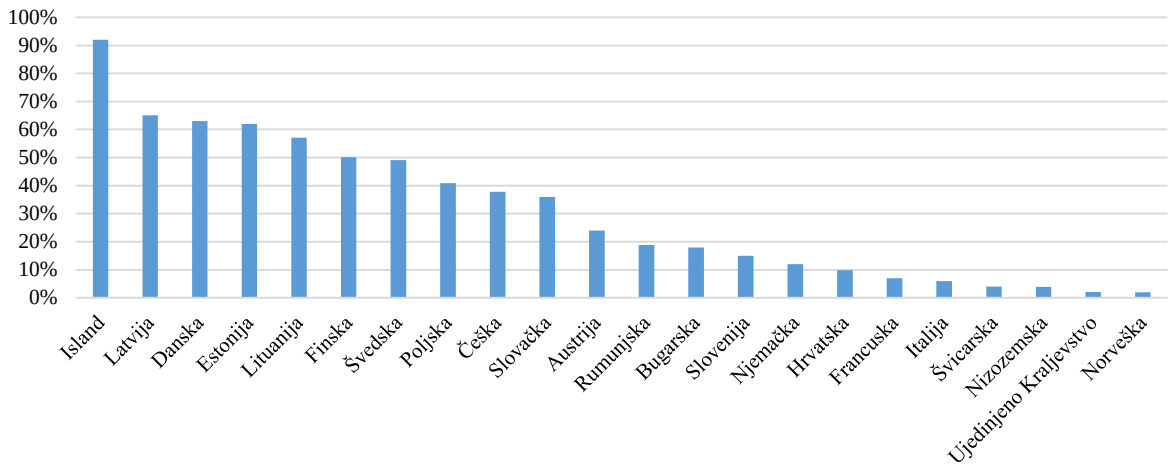
2.6.3. Centralizirani toplinski sustavi u EU

U Europskoj Uniji 40% ukupne potrošnje energije i 36% emisija CO_2 odlazi na sektor grijanja i hlađenja prostora [15]. CTS u opskrbi toplinom ukupnih potreba sudjeluje s udjelom od 9%

Slika 13. daje prikaz raspodijele goriva ili tehnologija u proizvodnji topline u CTS-ovima po državama u EU. Najvišim udjelom je zastupljen prirodni plin s 48%, te biomasa sa 27%. Sljedeće najzastupljenije gorivo je lignit sa 9%. CTS je bio povijesno zastupljeniji u Skandinavskim zemljama i zemljama bivšeg SSSR-a, dok se u zapadno-europskim zemljama tek u novije vrijeme počinje značajnije ulagati u CTS. Slika 14. prikazuje zastupljenost CTS-a u opskrbi toplinske energije. Po udjelu CTS-a vodi Island s udjelom preko 90% zahvaljujući brojnim termalnim izvorima. [15] Prosječne cijene toplinske energije znatno variraju diljem Europe, a kreću se od 4 €/GJ u Ujedinjenom Kraljevstvu do 20 €/GJ u Italiji. [33]



Slika 13. Zastupljenost različitih goriva u CTS-u [15]



Slika 14. Udio CTS-a u proizvodnji toplinske energije [33]

2.6.4. Centralizirani toplinski sustavi u Hrvatskoj

U sektoru toplinarstva na području Hrvatske je instalirano 1.800 MW raspoložive toplinske snage u 110 sustava koji godišnje isporučuju 9.678 TJ (2013. g.) toplinske energije krajnjim kupcima. Ukupna duljina mreže u jednom smjeru iznosi 410 km i pokriva oko 155.000 kupaca što čini 10% ukupnih potreba za toplinskom energijom. Većina toplinske energije oko 60% se isporučuje stambenom sektoru, 22% industriji (većim djelom u obliku tehnološke pare) i 18% uslužnom sektoru.

Tablica 2. prikazuje osnovne podatke o CTS-ovima u Hrvatskoj. CTS se nalazi u 19 gradova i općina. Nalaze se u gradu Zagrebu, Karlovcu, Sisku, Slavonskom Brodu, Virovitici, Splitu, Varaždinu, Rijeci, Požegi, Vinkovcima, Ivanić Gradu, Ogulinu, Zaprešiću, Velikoj Gorici, Osijeku, Vukovaru, Topuskom i Pokupskom.

Tablica 2. Pregled CTS-ova u Hrvatskoj [13]

Tvrtka	Grad	Broj potrošača	Grijana površina kućanstava	Grijana površina ostalih potrošača	Isporučena toplinska energija	Duljina distribuc. mreže	Gorivo **
		-	m^2	m^2	MWh	km	-
HEP Toplinarstvo d.o.o.*	Sisak	4.133	230.024	n/p	61.507	10	PP
	Osijek	11.692	602.063	n/p	180.702	56	PP, LU, LUEL
	Zagreb***	108.347	5.623.363	-	1.869.200	285	PP, LU, LUEL
Brod plin d.o.o.	Slavonski Brod	3.769	176.353	22.719	38.774	6	PP, LU
Plin VTC d.o.o.	Virovitica	483	23.517	6.613	3.430	1	PP
Hvidra d.o.o.	Split	908	62.864	1.711	2.204	1	LU, LUEL
Energo d.o.o.	Rijeka	10.010	537.776	42.908	73.639	16	PP, LU, LUEL
Grijanje Varaždin d.o.o.	Varaždin	1.860	99.791	4.102	16.180	2	PP
Tekija d.o.o.	Požega	417	19.839	-	2.378	1	PP
GTG Vinkovci d.o.o.	Vinkovci	1.698	86.352	2.845	8.919	2	PP, LU, LUEL
Tehnostan d.o.o.	Vukovar	3.712	186.271	19.236	19.128	7	PP, LUEL
Toplana d.o.o.	Karlovac	8.094	407.447	102.078	66.281	21	PP, LU, LUEL
Termalna voda d.o.o.	Topusko	191	8.980	14.837	-	2	GEO
Ivakop d.o.o.	Ivanić Grad	3	-	6.451	772	1	PP
SKG d.o.o.	Ogulin	192	7.503	4.187	8.545	1	LU, LUEL
UKUPNO		**155.509**	**8.072.143**	**227.687**	**2.351.659**	**412**	

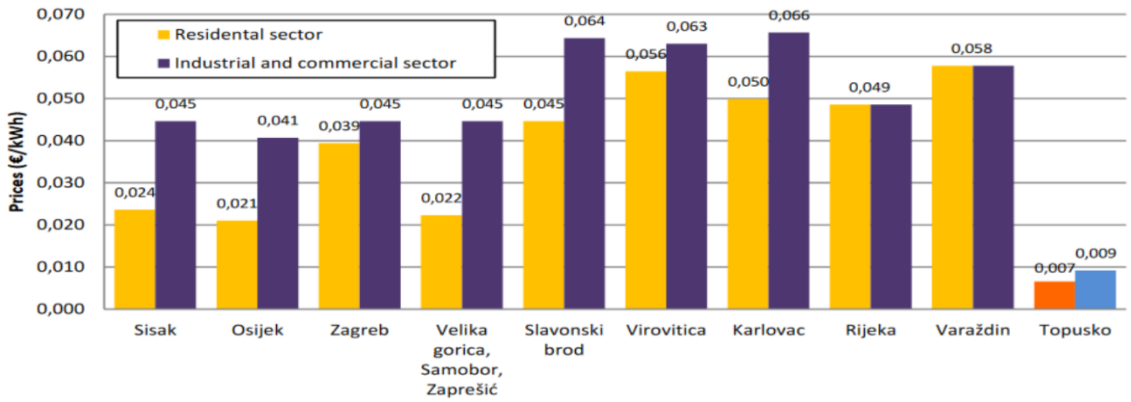
** Uključuje i isporuku tehnološke pare*

*** PP-prirodni plin, LU-loživo ulje, LUEL-ekstralako loživo ulje, GEO-geotermalna*

**** HEP Toplinarstvo Zagreb uključuje Veliku Goricu, Zaprešić i Samobor*

Najveći CTS se nalazi na području Grada Zagreba u koji toplinsku energiju isporučuju dva kogeneracijska postrojenja: TE-TO i EL-TO Zagreb. Sustavi u Sisku i Osijeku su također bazirani na toplini iz termoenergetskih postrojenja, dok se ostali s iznimkom Pokupskog baziraju na centraliziranim kotlovnicama.

Cijena toplinske energije koju prikazuje Slika 15. se kreče između 0,007 €/kWh u Topuskom do 0,058 €/kWh u Varaždinu. Trošak priključka je najniži u Velikoj Gorici s 2,014 €/kW/mjesec, a najviši u Karlovcu s 3,151 €/kW/mjesec



Slika 15. Cijena toplinske energije u CTS-ovima u Hrvatskoj [30]

3. OPIS ZADATKA

U sklopu ovog rada je potrebno odabrati lokaciju za izgradnju geotermalne elektrane ili CTS-a baziranog na geotermalnoj energiji, izraditi idejno rješenje i napraviti tehno-ekonomsku analizu.

U procesu odabira potencijalnih lokacija su postavljeni uvjeti:

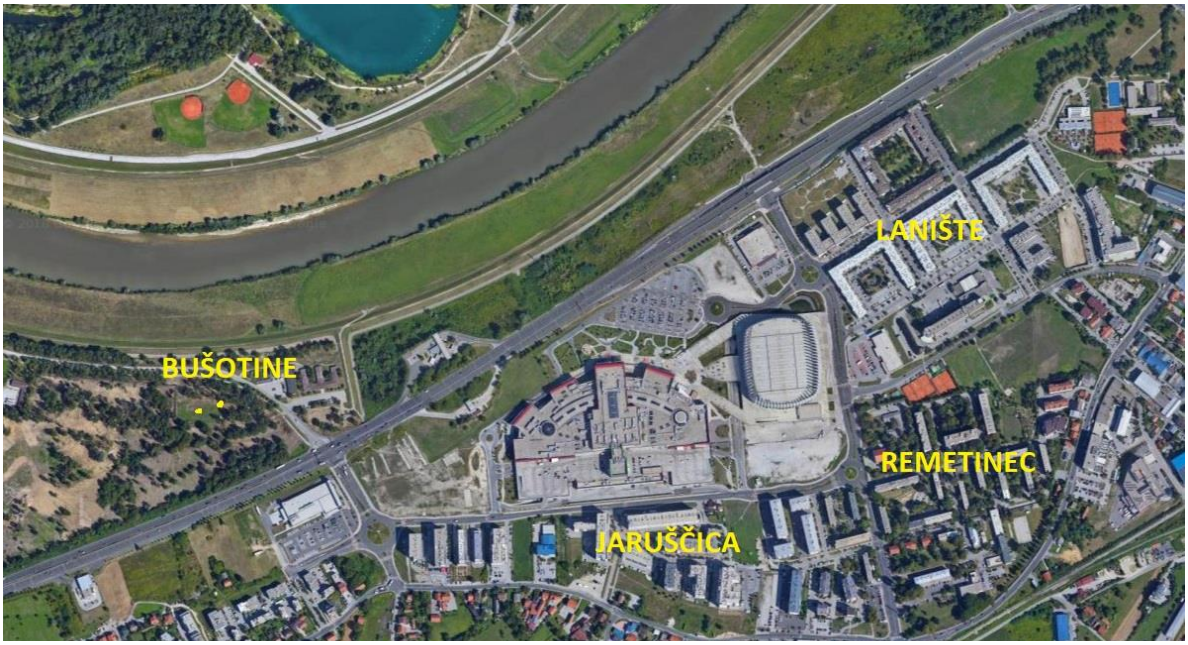
- poznati osnovni podaci o nalazištima (protok i temperatura)
- dovoljno visoka temperatura i protok (min 70°C i 20 l/s)
- blizina naseljenog mjesta

Odabrane su dvije lokacije koje zadovoljavaju navedene uvjete:

Sveučilišna bolnica Zagreb - Lanište

U jugozapadnom djelu grada Zagreba se nalaze bušotine termalnom vodom prvotno namijenjene opskrbi toplinskom energijom nikad dovršene Sveučilišne bolnice Zagreb. Trenutno se koriste u svrhu grijanja prostora skladišta u okolici bolnice čime se iskorištava tek manji dio njenog kapaciteta.

Ovim radom se predlaže iskorištavanje tog izvora u svrhu opskrbe toplinskom energijom gradskih naselja Lanište, Remetinec i Jaruščica. Navedena naselja trenutno nisu uključena u sustav daljinskog grijanja pa se također razmatra i izgradnja novog CTS-a. Svi objekti u navedenim naseljima koriste zasebne sustave za opskrbu toplinskom energijom pa se implementacijom centraliziranog sustava grijanja baziranog na geotermalnoj energiji mogu postići znatne uštede energije i smanjenja emisija stakleničkih plinova.



Slika 16. Prikaz lokacije bušotina i naselja s potencijalom uvođenja CTS-a

Zbog relativno niske temperature termalne vode od 82°C ukazuje se potreba za dodatnim izvorom toplinske energije za što se u ovom radu razmatra nekoliko varijanta: dizalica topline, električni grijač, kotao na prirodni plin i kotao na biomasu.

Plan je koristiti bušotinu KBNZ-1B kao proizvodnu, a KBNZ-2A i KBNZ-3-alfa kao utisne.

Tablica 3. Pregled karakteristika geotermalnih bušotina na području grada Zagreba [11]

Bušotina	Kratica	Lokacija	Protok (l/s)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Namjena
Mladost-1	Mla-1	Mladost	3,1	70,0	Nije u funkciji
Mladost-2	Mla-2	Mladost	74,0	64,0	Utisna
Mladost-3	Mla-3	Mladost	80,0	80,0	Proizvodna
KBNZ-1	KBNZ-1	Blato	-	-	Likvidirana
KBNZ-1A	KBNZ-1A	Blato	6,9	68,0	Utisna
KBNZ-1B	KBNZ-1B	Blato	88,0	82,0	Proizvodna
KBNZ-1C	KBNZ-1C	Blato	-	-	Likvidirana
KBNZ-2	KBNZ-2	Blato	0,6	51,0	Mjerna
KBNZ-2A	KBNZ-2A	Blato	25,0	64,0	Nije u funkciji
KBNZ-3	KBNZ-3	Blato	-	-	Likvidirana
KBNZ-3B	KBNZ-3B	Blato	0,6	27,0	Nije u funkciji
KBNZ-3 alfa	KBNZ-3 alfa	Blato	25,6	57,0	Nije u funkciji
Stupnik-1	Stu-1	Lučko	8,1	57,0	Nije u funkciji
Lučanka-1	Luč-1	Lučko	5,6	55,0	Proizvodna
Jarun-1	Jrn-1	Jarun	0,8	38,0	Nije u funkciji
Sava-1	Sava-1	Savski nasip	5,0	58,0	Mjerna

Rečica

Bušotine Ka-2 i Ka-3 se nalaze 8 km sjevero-istočno od grada Karlovca i u blizini naselja Rečica i Luka Pokupska. Slika 17. prikazuje lokaciju bušotina u odnosu na navedena naselja. U ovom sustavu je izmjerena temperatura termalne vode od 140 °C i s protokom od 50 l/s. Navedene bušotine sežu do dubine od 3.200 m te 4.150 m. Napravljene su kao i većina geotermalnih bušotina u Hrvatskoj u sklopu istraživanja u potrazi za ugljikovodicima, koja su se pokazala neuspješnim zbog čega su bušotine bile začepljene betonskim čepovima do 2001. kad se počelo s mjerenjima termalnog potencijala. [2]

Povoljni parametri termalne vode opravdavaju investiciju u nisko-temperaturni ORC, a blizina naselja, izgradnju novog ili opskrbu toplinom postojećeg CTS-a. Također je moguće kao što prikazuje Slika 25. korištenje niskotemperaturne otpadne topline u kupalištima ili u agrikulturne svrhe.

Slika 17. Prikaz lokacije bušotina [2],[31]

Tablica 4. Podaci o lokacijama

Lokacija	Protok [l/s]	Temperatura [°C]
Lanište (Sveučilišna bolnica Zagreb)	88	92
Rečica	50	140

4. METODA

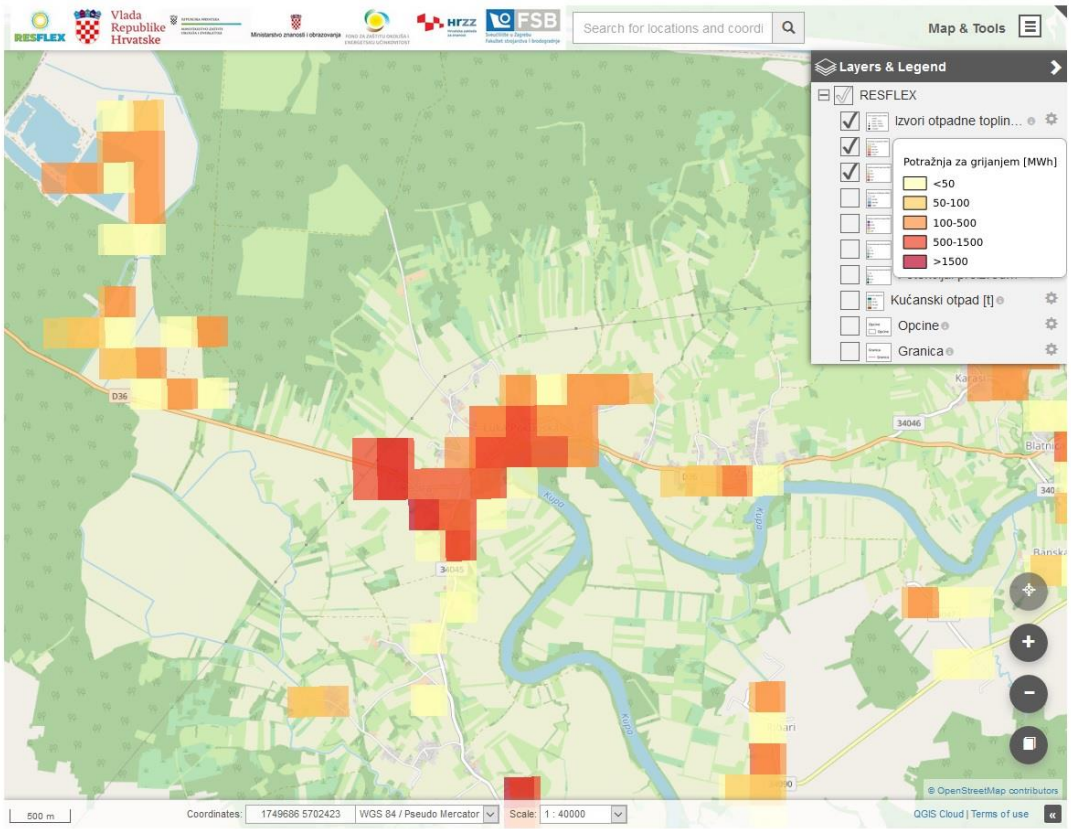
4.1. Opis tehničkog proračuna

U ovom poglavlju se prikazuje postupak tehničkog proračuna i daju potrebni podaci.

4.1.1. Proračun centraliziranog toplinskog sustava

4.1.1.1. Ukupne potrebe za toplinskom energijom

Podaci o ogrjevnim potrebama i potrebama za potrošnu toplu vodu na godišnjoj razini u [MWh/god] su dobiveni korištenjem alata GIS Karta RESFLEX projekta [7]. U navedenom alatu se na kartografskom prikazu prikazuju podaci o toplinskim potrebama svedeni na rezoluciju 250 X 250 m. Moguće je zasebno prikazati potražnju za grijanjem PTV-om i hlađenjem.



Slika 18. GIS karta [7]

4.1.1.2. Određivanje satnog opterećenja sustava

Za potrebe dimenzioniranja mreže i potrebne snage odlučeno je daljnju analizu provoditi na satnoj razini. Satna razina daje detaljnije rezultate jer se u analizu mogu uključiti i vršna opterećenja koja ne bi dolazila do izražaja na dnevnoj razini. Za određivanje satne raspodijele se koriste podaci o temperaturama iz Meteonorma [17]. Ti podaci su dani na satnoj razini pa je time omogućen izračun satnih vrijednosti toplinskog opterećenja.

Za određivanje satnog opterećenja sustava je korištena metoda stupanj-sat. Poznati su podaci za toplinske potrebe na godišnjoj razini i prosječne temperature zraka za svaki od 8.760 sati godišnje. Određuje se satna temperaturna razlika s pretpostavljenom temperaturom prostora od 21 °C. Tražena toplinska energija u pojedinom satu se dobiva na temelju satnih temperaturnih razlika. Temperaturna razlika za promatrani sat se podijeli sa sumom svih satnih razlika te se sve zajedno pomnoži ukupnim godišnjim opterećenjem.

U proračun se uvode pretpostavke:

1) CTS ulazi u stanje pripravnosti 15. rujna, i radi najkasnije do 15. svibnja,
2) CTS ne radi u slučaju vanjske temperature zraka više od 15 °C
3) CTS radi od 6:00 do 23:00
4) U slučaju vanjske temperature niže od -15 °C izvan 6:00 i 23:00 se CTS uključuje

$$Q_t = \frac{SS \cdot Q_{god}}{\sum_1^{8760} SS} \quad \textbf{(1)}$$

Gdje je:

Q_t – satno toplinsko opterećenje [MWh]

Q_{god} – ukupna godišnja potražnja za toplinskom energijom

SS – stupanj sat [°C] je definiran kao razlika projektne i vanjske temperature. Za projektnu temperaturu je uzeto 21°C, a vanjska je prosječna temperatura svakog sata u godini [17].

$$SS = T_{projektna} - T_{vanjska} \quad \textbf{(2)}$$

4.1.1.3. Određivanje satnog opterećenja potrošnje potrošne tople vode

U svrhu određivanja dnevne satne raspodjele potražnje za toplom vodom je korištena tipična raspodjela potrošnje PTV-a [4]. Satno opterećenje je potom određeno prema izrazu:

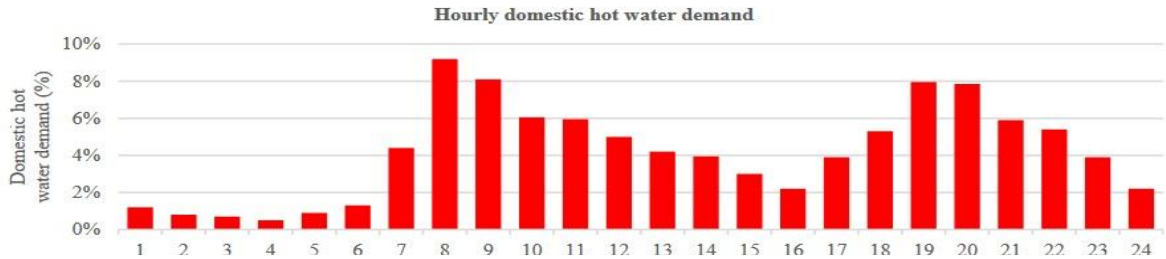
$$Q_{PTVsat} = \frac{Q_{PTVgod} \cdot \mu}{365 \cdot 100} \quad \textbf{(3)}$$

Gdje je:

Q_{PTVsat} – satna toplinska potražnja potrošne tople vode [MWh]

μ – faktor opterećenja [-] Slika 19

Q_{PTVgod} – ukupna godišnja potražnja za potrošnom toplom vodom [MWh]



Slika 19. Dnevna raspodjela potrošnje PTV-a [4]

4.1.1.4. Dimenzioniranje distribucijske mreže

Regulacija snage CTS-a se vrši promjenom polazne temperature i masenog protoka u sustavu. Da bi se hidraulički gubici što više smanjili je potrebno pravilno dimenzionirati mrežu. U pravilu se promjer cijevi prilagođava vršnom opterećenju tako da brzina strujanja ostane između 0.5 i 5 m/s, a Reynoldsov broj između 10^5 i 10^6. [43]

Dimenzije cijevi su određene prema katalogu proizvođača ISOPLUS za dvostruke pred-izolirane cijevi. [23]

Jednadžba (4) daje vezu između dostavljene energije u mrežu i masenog protoka. Na temelju tražene snage P i uz zadanu polaznu i pretpostavljenu povratnu temperaturu se računa maseni protok u pojedinim dijelovima mreže. Tablica 5. zatim daje podatke o dimenziji cijevi na osnovu izračunatog protoka.

$$P = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T \tag{4}$$

Gdje je:

- P – dostavljena toplinska energija u mrežu [kW]
- m_w – maseni protok vode u CTS-u [kg/s]
- $\Delta T = T_{polaz} - T_{povrat}$ – razlika temperature povrata i polaza u CTS-u [K]

Tablica 5. Katalog dvostrukih predizoliranih cijevi proizvođača „ISOPLUS“ [23]

Type	Volume Flow V´ in m³/h		Flow Speed w in m/s		Transmittable Capacity P in kW at spread					
					20 K		30 K		40 K	
	from	to	from	to	from	to	from	to	from	to
DN 20	0,703	1,547	0,50	1,10	16	36	25	54	33	72
DN 25	1,148	2,526	0,50	1,10	27	59	40	88	53	118
DN 32	2,348	4,695	0,60	1,20	55	109	82	164	109	218
DN 40	3,151	6,303	0,60	1,20	73	147	110	220	147	293
DN 50	5,879	11,757	0,70	1,40	137	273	205	410	273	547
DN 65	9,781	19,563	0,70	1,40	228	455	341	683	455	910
DN 80	15,395	30,791	0,80	1,60	358	716	537	1.074	716	1.432
DN 100	25,945	51,891	0,80	1,60	604	1.207	905	1.811	1.207	2.414
DN 125	49,639	89,350	1,00	1,80	1.155	2.078	1.732	3.118	2.309	4.157
DN 150	87,185	152,573	1,20	2,10	2.028	3.549	3.042	5.324	4.056	7.098
DN 200	174,732	299,541	1,40	2,40	4.064	6.968	6.097	10.451	8.129	13.935

4.1.2. Proračun dizalice topline

Za proračun faktora grijanja COP dizalice topline je korišten izraz:

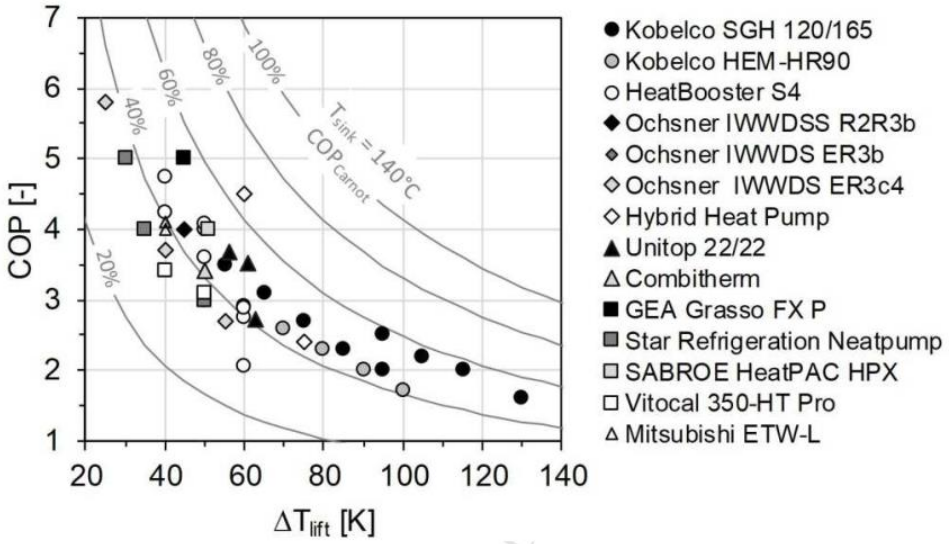
$$COP = \frac{T_{polaz}}{T_{polaz} - T_{izvor}} \cdot \varepsilon \tag{5}$$

Gdje je:

- COP – Koeficijent učinkovitosti dizalice topline (engl. *Coefficient of performance*) [-]
- T_{polaz} – temperatura polaza u CTS-u [K]
- T_{izvor} – temperatura toplinskog izvora [K]
- $\boldsymbol{\varepsilon}$ – iskustveni faktor (Carnotova efikasnost) = 0,38

Vrijednost faktora Carnotove efikasnosti je određena pregledom eksperimentalnih rezultata dizalica topline kod rada u sličnim uvjetima kao što prikazuje Slika 20. [6]

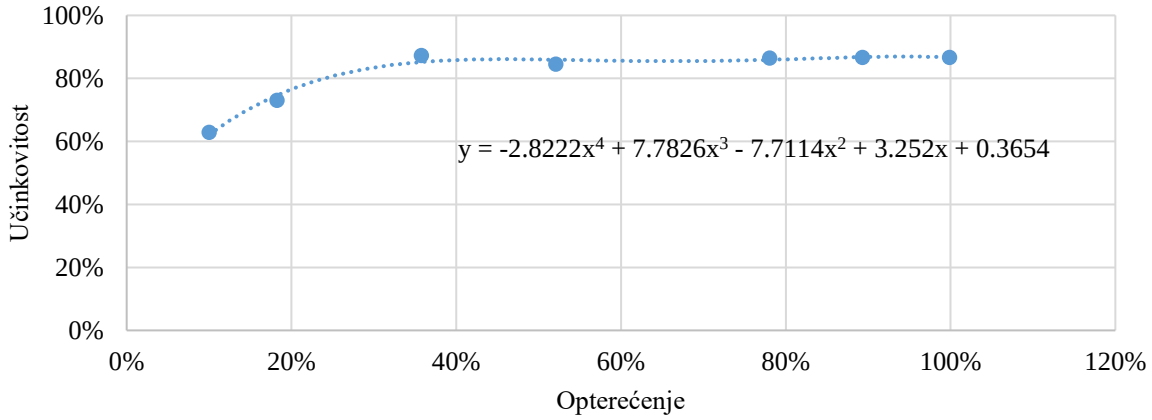
Zbog tehničkih ograničenja minimalne temperaturne razlike temperature izvora i ponora u radu dizalice topline, nije moguće dostavljati točno traženu temperaturu vode, nego je potrebno podizati temperaturu vode iznad tražene temperature polaska u CTS-u. Pregledom eksperimentalnih rezultata visoko-temperaturnih dizalica topline [6] se dolazi do zaključka o kretanju minimalne temperaturne razlike između 15 i 30 K. Iz tog razloga je određena minimalna temperatura na koju dizalica topline dostavlja zagrijanu vodu od 100 °C osim u slučaju kad je tražena temperatura polaza viša. [50]



Slika 20. Prikaz područja rada i COP-ova nekih dizalica topline [6]

4.1.3. Kotao na biomasu

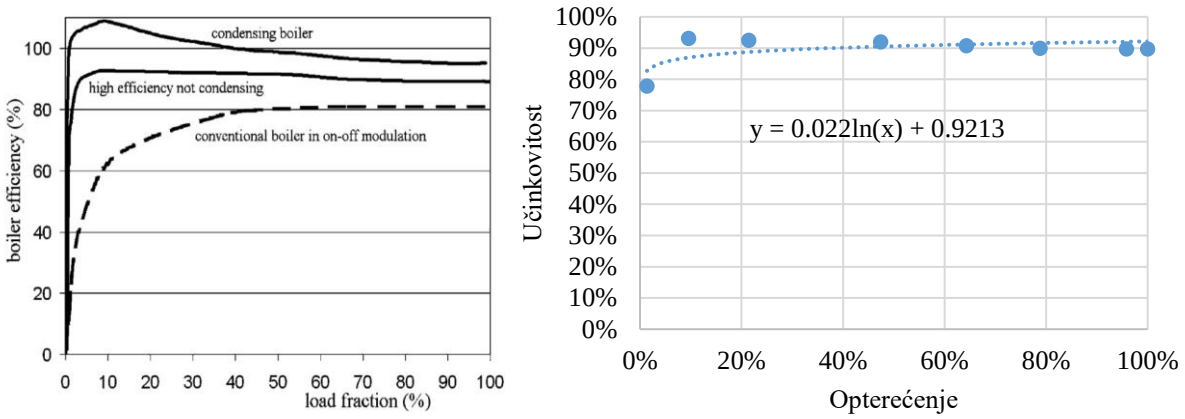
Slika 21. prikazuje utjecaj opterećenja na učinkovitost kotla na biomasu. Vidljivo je da je učinkovitost konstantna iznad 40 % opterećenja. Ispod 40 % počinje padati, a kotao ne može zbog tehničkih ograničenja raditi ispod 20 %.



Slika 21. Veza opterećenja i učinkovitosti kotla na biomasu [18]

4.1.4. Kotao na prirodni plin

Slika 22. prikazuje ovisnost učinkovitosti o opterećenju kotla na prirodni plin. Za potrebe ovog rada je korištena krivulja koja opisuje visokoučinkoviti nekondenzirajući kotao. Ne koristi se kondenzirajući kotao zbog potrebe za radom na visokim temperaturama gdje nije moguće koristiti toplinu kondenzacije vlage iz dimnih plinova. Postavlja se minimalno opterećenje od 5 % nazivne snage.



Slika 22. Ovisnost učinkovitosti kotla na prirodni plin o opterećenju [36]

4.1.5. Proračun ORC-a

S obzirom na visoku temperaturu izvora postoji mogućnost izgradnje binarnog ORC postrojenja. Binarno ORC postrojenje je odabrano zbog vrlo visoke fleksibilnosti u radu pod djelomičnim opterećenjem koje se javlja uslijed istovremenog zadovoljavanja toplinskih potreba u CTS-u. Binarno ORC postrojenje je također odabrano zbog visoke učinkovitosti u usporedbi s ostalim rješenjima u relativno niskom temperaturnom režimu rada.

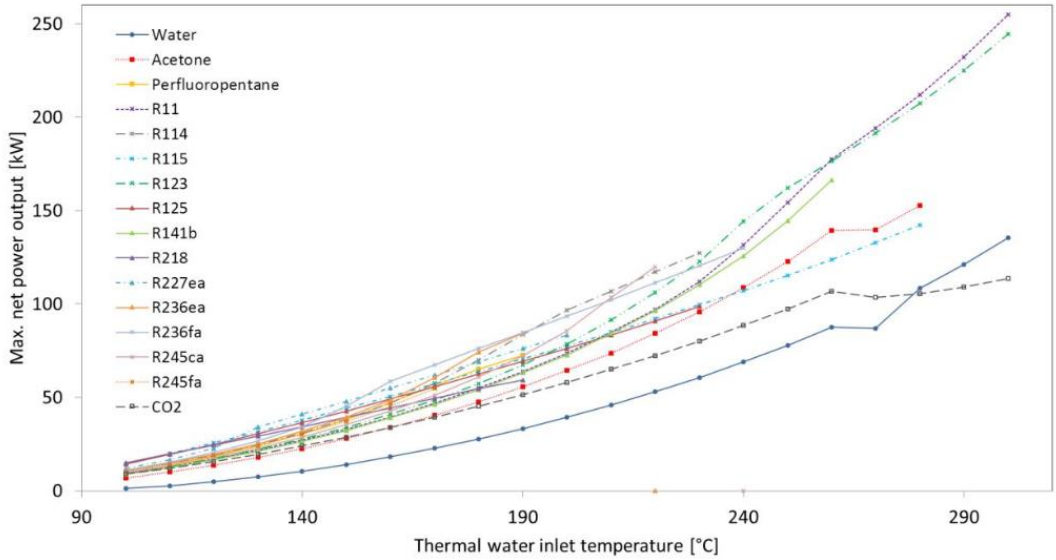
Snaga ORC-a je određena vezom temperature termalne vode i njenim protokom. Za određivanje snage postrojenja se koristili su se rezultati eksperimenta koje prikazuje Slika 23, Slika prikazuje ovisnost ostvarive snage postrojenja u ovisnosti o radnom mediju te temperaturi termalne vode. Dobiva se iznos specifične snage izražene u kW po kilogramu u sekundi termalne vode. Za promatrani slučaj je temperatura termalne vode 140 °C pa se odabire radni medij R227ea s najvišom specifičnom snagom iščitanim iz dijagrama što iznosi 40 kW/kg. Potrebno je istaknuti da je prikazani iznos snage, neto iznos što uključuje i svu snagu utrošenu na rad uređaja unutar samog postrojenja i na utisnoj bušotini. Uz usvajanje navedenih pretpostavki nastaje jednadžba (6) za izračun električne snage ORC postrojenja.

$$P_{el} = P_0 \cdot Q_{mvodaORC} \qquad \textbf{(6)}$$

Gdje je:

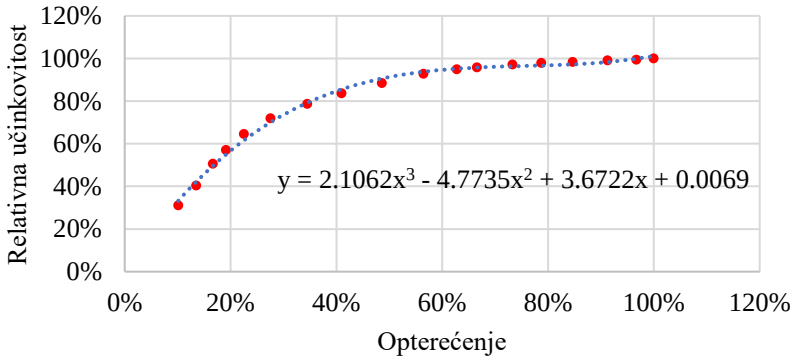
- P_{el} – nazivna električna snaga [kW]
- $Q_{mvodaORC}$ – maseni protok vode kroz izmjenjivač topline [kg/s]

- P_0 – specifična snaga dobivena po kilogramu termalne vode – 40 kW/kg [5].



Slika 23. Veza između temperature toplinskog izvora i snage [5]

Zbog učestalog rada u djelomičnom opterećenju je potrebno usvojiti utjecaj smanjenog opterećenja na učinkovitost postrojenja, a time i na proizvedenu električnu energiju. Slika 24. prikazuje podatke proizvođača opreme za ORC postrojenja Turboden o pogonu u djelomičnom opterećenju. Iz navedenih podataka je vidljivo da sustav zadržava relativnu učinkovitost iznad 90% sve do 50% nazivnog opterećenja.



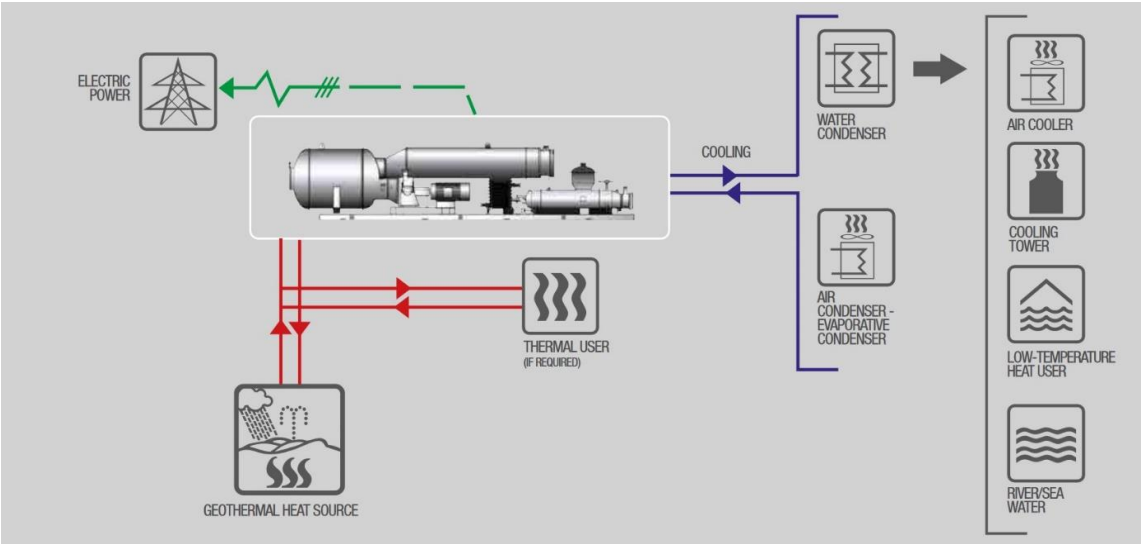
Slika 24. Utjecaj djelomičnog opterećenja na relativnu učinkovitost ORC-a [26]

4.1.6. Kombinirana proizvodnja električne i toplinske energije

Zbog jednostavnosti proračuna je odabrano tehničko rješenje paralelne proizvodnje električne i toplinske energije što prikazuje Slika 23. i Jednadžba (7). Postrojenje radi na način da se struja termalne vode dijeli na dva dijela od kojih jedan odlazi u sustav izmjenjivača topline u ORC postrojenju, a drugi u toplinsku podstanicu gdje predaje toplinu u CTS. Regulacija se vrši tako da se prvo zadovoljavaju toplinske potrebe u CTS-u, a ostatak odlazi u ORC.

$$Q_{mw} = Q_{mwORC} + Q_{mwCTS} \quad \textbf{(7)}$$

- Q_{mw} – ukupni dostupni maseni protok termalne vode
- Q_{mwORC} – maseni protok termalne vode koji odlazi u sustav izmjenjivača topline ORC postrojenja
- Q_{mwCTS} – maseni protok termalne vode koji odlazi u sustav izmjenjivača topline za CTS



Slika 25. Shema postrojenja [26]

4.1.7. Izračun smanjenja emisija CO_2

Za proračun smanjenja emisija se koristila vrijednost specifične emisije CO_2 kod izgaranja prirodnog plina. Uvodi se pretpostavka da se sve toplinske potrebe zadovoljavaju izgaranjem prirodnog plina i da je učinkovitost ugrađenih kotlova na prirodni plin 90 %.

$$m_{CO2} = \frac{E_{CH4} \cdot Q_{mCH4}}{0{,}9} - El_{spec} \cdot E_{el} \qquad \textbf{(8)}$$

Gdje je:

- m_{CO2} – smanjenje emisija CO_2 [kg]
- E_{CH4} – smanjenje upotrebe prirodnog plina [kWh]
- Q_{mCH4} – specifična emisija CO_2 kod izgaranja prirodnog plina = 0,18 kg/kWh [47]
- El_{spec} – specifična emisija proizvodnje električne energije u Hrvatskoj (2016. godine) = 0,21 kg/kWh [48]
- E_{el} – ukupna potrošnja električne energije [kWh]

4.2. Opis tehno - ekonomske analize

U ovom poglavlju se opisuje postupak izrade tehno – ekonomske analize daju potrebni podaci.

4.2.1. Cijena električne energije

Električna energija se prodaje na CROPEX burzi električne energije. Za prodanu električnu energiju se isplaćuje tržišna cijena, a dodatno se isplaćuje premija. Pretpostavlja se da se postrojenje nalazi u sustavu poticaja.

U Hrvatskoj se poticanje proizvodnje električne energije provodi putem tržišne premije. Zbog nedostatka pravilnika o iznosima referentnih cijena za poticanje OIE putem tržišne premije, je donijeta odluka korištenja cijene u iznosu 85 % važeće cijene poticanja putem fiksne tarife [25].

Jednadžba **(9)**. opisuje princip tržišne premije.

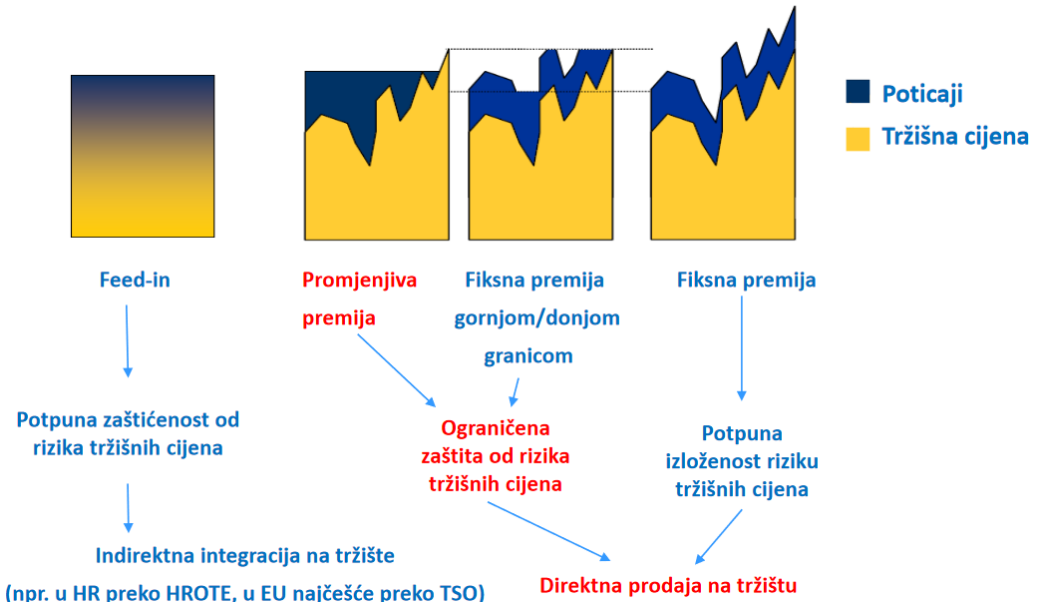
$$TP_i = RV - TC_i \tag{9}$$

Gdje je:

- TP_i - tržišna premija u određenom obračunskom razdoblju [kn/kWh]
- TC_i - tržišna cijena električne energije u određenom obračunskom razdoblju [kn/kWh]
- RV - referentna vrijednost električne energije = 1,02 [kn/kWh] – Postupak određivanja opisuje jednadžba (10)

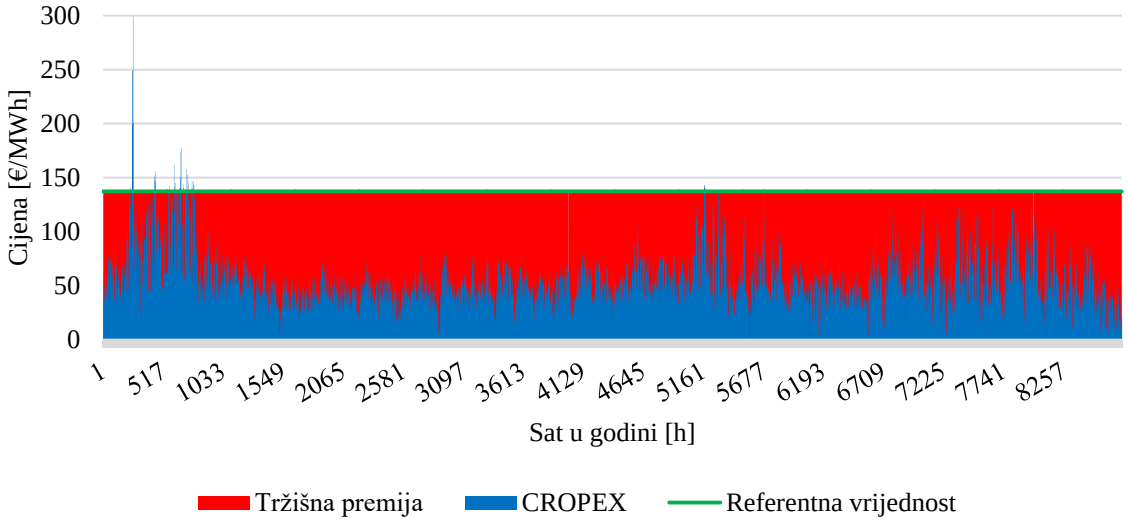
$$RV = 0{,}85 \cdot PC_{geo} \tag{10}$$

- PC_{geo} – poticajna cijena električne energije iz geotermalnih postrojenja = 1,2 kn/kWh [25]



Slika 26. Prikaz modela poticanja OIE [24]

Slika 26. prikazuje različite modele poticanja OIE. U Hrvatskoj se koristi model s promjenjivom premijom. Proizvođaču električne energije je osigurana minimalna zarada na osnovu proizvedene energije. Bazni dio zarade čini sama prodaja električne energije na CROPEX burzi, a ostatak do iznosa referentne vrijednosti čini tržišna premija.

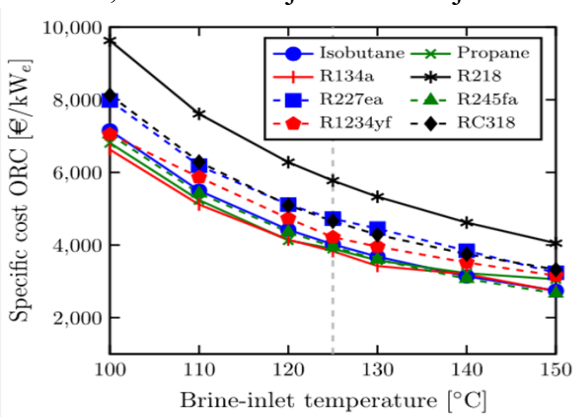


Slika 27. Kretanje cijena električne energije

Slika 27. prikazuje odnos iznosa tržišne cijene električne energije, tržišne premije i referentne cijene električne energije. Prema uredbi o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija [42], ugovor o isplati tržišne premije se potpisuje na 12 godina.

4.2.2. Cijena ORC postrojenja

Slika 28. prikazuje specifičnu cijenu investicije izgradnje zrakom hlađenog ORC postrojenja. Može se iščitati cijena od 4.000 eura po instaliranom kilovatu za ulaznu temperaturu termalne vode od 140 °C. Zbog znatno niže cijene vodom hlađenog postrojenja je razmatrana mogućnost korištenja obližnje rijeke Korane u tu svrhu, ali se od toga odustalo zbog njenog čestog presušivanja i niskog vodostaja. U analizi nisu promatrane investicije u izradu potrebnih bušotina jer su iste već izrađene, ali nisu stavljene u funkciju.



Slika 28. Specifična cijena zrakom hlađenog ORC-a [9]

4.2.3. Cijena CTS-a

Za procjenu troškova izgradnje CTS-a se koristila baza podataka Danske energetske agencije [10] u kojoj su dane cijene izgradnje infrastrukture ovisno o količini transportirane energije, duljini mreže i stupnju urbaniziranosti naselja. Tablica 6. daje pregled podataka o CTS-u iz navedene baze podataka.

Tablica 6. Podaci o pojedinim dijelovima CTS-a [10]

Trošak pojedinih dijelova		
Transmisijski cjevovod	25	€/MW/m
Razvodna mreža (grad)	150	€/MWh/god
Razvodna mreža (ruralno područje)	750	€/MWh/god
Glavna toplinska podstanica	100.000	€/MW
Individualne toplinske podstanice	265.000	€/MW
Pumpna stanica	90.000	€/MW
Dizalica topline	660.000	€/MW
Kotao s električnim grijačem	50.000 do 140.000	€/MW
Kotao na prirodni plin	60.000	€/MW
Toplinski gubitci		
Transmisijski cjevovod	3	%
Razvodna mreža – gradsko područje	5	%
Razvodna mreža – ruralno područje	15	%
Glavna toplinska podstanica	5	%
Individualne toplinske podstanice	5	%
Ostali gubitci	2	%

4.2.4. Mjere isplativosti CTS-a

Kao mjera isplativosti centraliziranog toplinskog sustava, se često koriste veličine linearna gustoća toplinske energije i prostorna gustoća toplinske energije.

4.2.4.1. Linearna gustoća toplinske energije

Omjer je godišnje količine toplinske energije distribuirane u toplinsku mrežu i duljine svih cijevi u toplinskoj mreži. Cilj je imati što viši iznos linearne gustoće toplinske energije. Granica isplativosti varira za svaki sustav i ovisi o temperaturnom režimu, cijeni toplinske energije, gubicima u mreži. Za usporedbu se može uzeti granica isplativosti u Austriji od 900kWh/m/god, dok u Danskoj iznosi tek 200 kWh/m/god uslijed nisko-temperaturnog režima. [45]

$$Q_{lin} = \frac{Q_{god}}{l_{mreže}} \tag{11}$$

Gdje je:

- Q_{lin} – linearna gustoća toplinske energije [kWh/m]
- Q_{god} – godišnja potražnja za toplinskom energijom [kWh/god]

- $l_{mreže}$ – duljina cijele mreže [m]

4.2.5. Naknada za korištenje termalnog izvora

Prema [38], na korištenje termalnog izvora se plaća naknada u iznosu 3% tržišne vrijednosti pridobivenog resursa. U ovom radu se naknada za iskorištavanje termalne računala pomoću prodajne cijene toplinske energije.

$$C = E_{heat} \cdot \omega \cdot 0{,}03 \tag{12}$$

Gdje je:

- C – godišnja naknada za korištenje izvora [kn]
- E_{heat} – ukupna godišnja iskorištena toplinska energija iz izvora [kWh]
- ω – prodajna cijena toplinske energije [kn/kWh]

4.2.6. Troškovi održavanja i osoblja

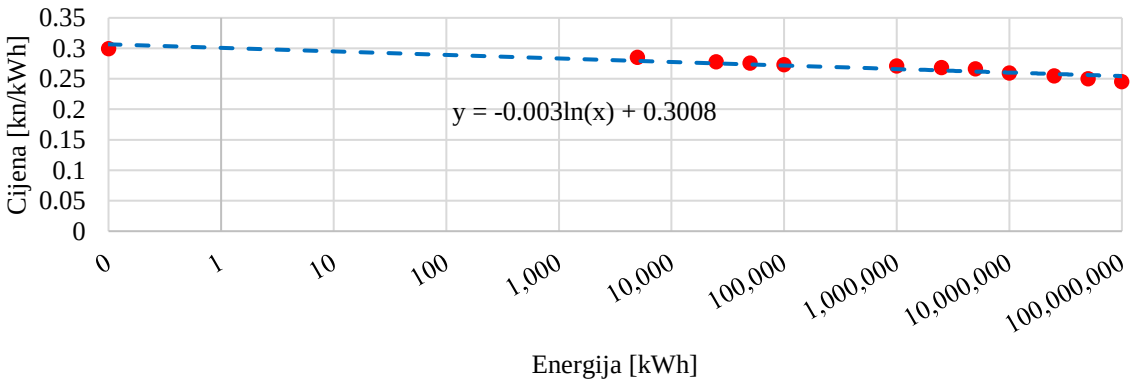
Troškovi održavanja i osoblja su određivani pomoću „Technology data“ baze podataka [10] za one dijelove postrojenja za koje postoje podaci. Za dijelove za koje ne postoje podaci je za godišnje troškove uzeti iznos od 1% investicije, a za remont nakon 10 godina 5% ukupne investicije.

4.2.7. Troškovi električne energije

Električna energija se u slučajevima gdje nema vlastite proizvodnje kupuje od HEP Elektre. Koristi se tarifni model „bijeli“ za poduzetništvo pod kategorijom „srednji napon“ [39].

4.2.8. Trošak prirodnog plina

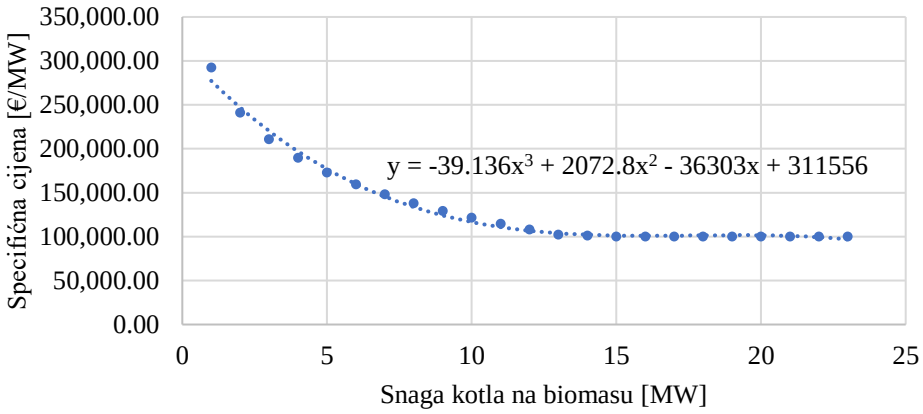
Prirodni plin se dobavlja od Gradske plinare Zagreb [40]. Slika 29. prikazuje korištene cijene plina u ovisnosti o nabavi izraženo u kWh. Za različite varijante nekih scenarija se koriste različite količine plina pa je potrebo dati vezu između količine i cijene.



Slika 29. Cijena prirodnog plina u ovisnosti o količini izraženo u [kWh] [41]

4.2.9. Kotao na biomasu

Investicijski trošak svake tehnologije za proizvodnju električne ili toplinske energije uvelike ovisi o njenoj nazivnoj snazi. Slika 30. prikazuje specifični trošak kotla na biomasu. Za izradu navedene slike je korištena jednadžba krivulje iz [43] te ekstrapolirana na cijelo radno područje. Prema [44], se uzima cijena drvne sječke u iznosu od 25 €/MWh.



Slika 30. Specifična investicija za kotao na biomasu [43]

4.2.10. Ostali podaci

Tablica 7. daje prikaz stalih podataka potrebnih za tehno - ekonomsku analizu.

Tablica 7. Ostali potrebni podaci

Naziv	Iznos	Jedinica
Diskontna stopa	6	%
Udio kredita	85	%
Vrijeme otplate kredita	15	Godina
Kamatna stopa	4	%
Porez na dobit	20	%
Trajanje projekta	15	Godina

5. ANALIZA SCENARIJA

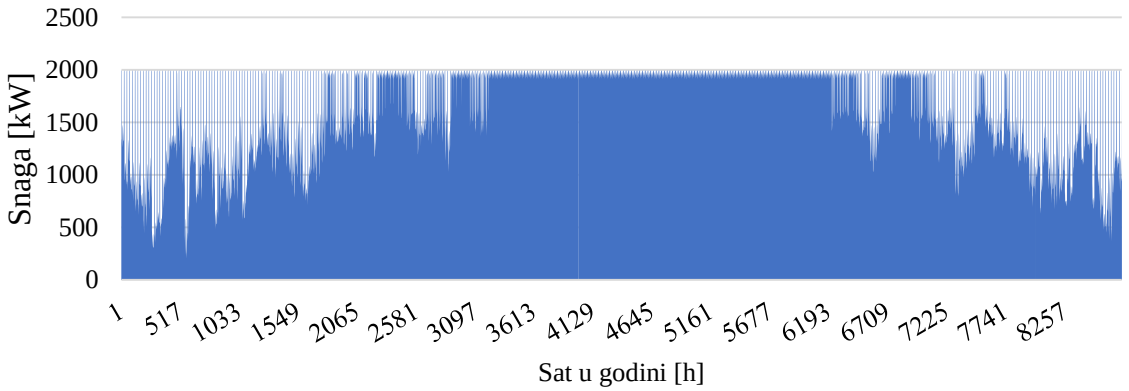
Tablica 8. sadrži popis scenarija obrađenih u sklopu ovog rada. Prva 4 scenarija se nalaze u blizini Karlovca na termalnom nalazištu „Rečica“, dok se preostala 4 nalaze u gradskoj četvrti „Lanište“ Grada Zagreba. 7 scenarija uključuje opskrbu CTS-a, 3 proizvodnju električne energije, a 2 uključuju kombinaciju proizvodnje električne i toplinske energije.

Tablica 8. Popis scenarija

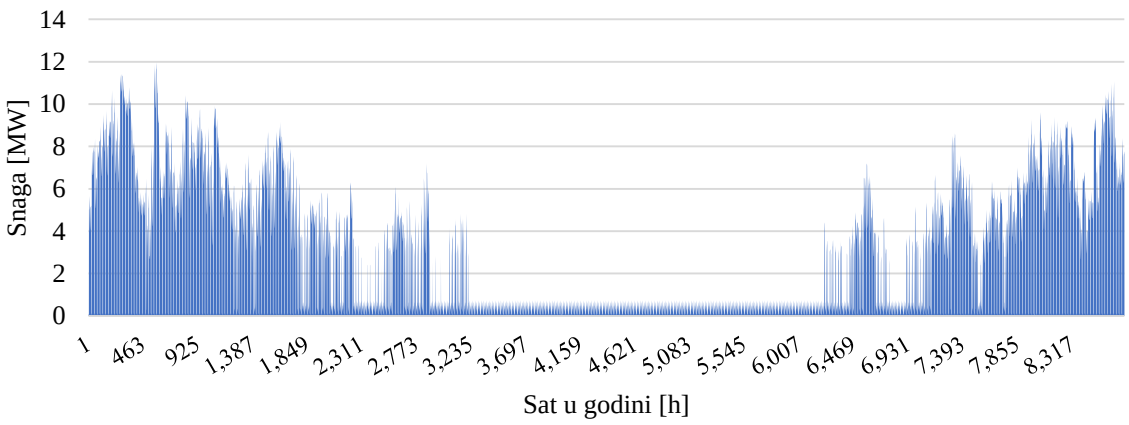
Broj scenarija	Lokacija	Vrsta sustava	Dodatno	Temperatura bušotine	Maseni protok [kg/s]	Godišnja potražnja za toplinskom energijom [MWh]	Vršno opterećenje [MW]
1	Rečica	ORC + CTS	-	140	50	22.130,3	11,95
2	Rečica (Karlovac)	ORC + CTS	-	140	50	55.871,1	11,43 (29,63)
3	Rečica (Karlovac)	CTS	-	140	50	55.871,1	15,125 (29,63)
4	Rečica	ORC	-	140	50	-	-
5	Lanište	CTS	DT	82	88	42.932,63	23,18
6	Lanište	CTS	DT+ kotao s električnim grijačem	82	88	42.932,63	23,18
7	Lanište	CTS	DT+ kotao na prirodni plin	82	88	42.932,63	23,18
8	Lanište	CTS	DT+ kotao na biomasu	82	88	42.932,63	23,18

5.1. Scenarij 1. ORC + CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska

Scenarij 1 obrađuje slučaj u kojem se na lokaciji Rečica izgrađuje geotermalno elektro-energetsko postrojenje binarnog ORC tipa i izgrađuje novi CTS u obližnjem naseljima Rečica i Luka Pokupska. CTS se napaja iz 3.600 m udaljenog geotermalnog izvora na lokaciji elektroenergetskog postrojenja. S obzirom na visoku temperaturu termalne vode, nije potreban dodatni izvor toplinske energije. Jednadžba (6) daje iznos nazivne snage ORC-a s pretpostavkom minimalnog toplinskog opterećenja sustava u iznosu od 1.996 kW. Ukupno se godišnje proizvodi 14,86 GWh električne energije, a postrojenje radi s faktorom opterećenja 85%. Godišnju raspodjelu proizvodnje električne energije prikazuje Slika 31. Slika 32. prikazuje rad CTS-a. Ukupna potražnja iznosi 16,14 GWh, ali je zbog izraženih gubitaka prijenosa i distribucije od 27 % kao što prikazuje Tablica 9., potrebno u CTS dostavljati 20,6 GWh.



Slika 31. Rad ORC-a



Slika 32. Rad CTS-a

Slika 33. prikazuje plan distribucijske mreže CTS-a Rečica. Na slici su označene dimenzije cijevi prema ISOPLUS katalogu pred-izoliranih cijevi za CTS. Postupak izračuna potrebnih dimenzija cijevi je prikazan u podnaslovu Dimenzioniranje distribucijske mreže. Proizvedena električna energija se prodaje na tržištu, a postrojenje se nalazi u sustavu poticanja obnovljivih izvora energije. Poticanje se provodi putem tržišne premije. Tablica 9. prikazuje podatke o scenariju 1 i rezultate proračuna.

Tablica 9. Podaci o scenariju1. ORC + CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska

Veličina	Iznos	Jedinica
Dostupan protok	50	l/s
Temperatura	140	°C
Toplinske potrebe	16.138	MWh/god.
Dostavljena toplinska energija u mrežu	20.603	MWh/god.
Vršno opterećenje	11,95	MW
Gubitci u transmisiji	3	%
Gubitci u distribuciji	15	%
Gubitci u toplinskim podstanicama	5	%

Gubitci u glavnoj toplinskoj podstanici	5	%
Ostali gubitci	2	%
Ukupni toplinski gubitci	27,08	%
Nazivna snaga ORC postrojenja	1.996	kW
Faktor opterećenja ORC postrojenja	84,98	%
Proizvedena električna energija	14.859	MWh/god.
Utrošena energija za pogon pumpa	5	%
Gubitci u transformaciji električne energije	1	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	3.011,27	tona/god.
Ušteda emisija CO2 u proizvodnji el. e.	3.120,39	tona/god.

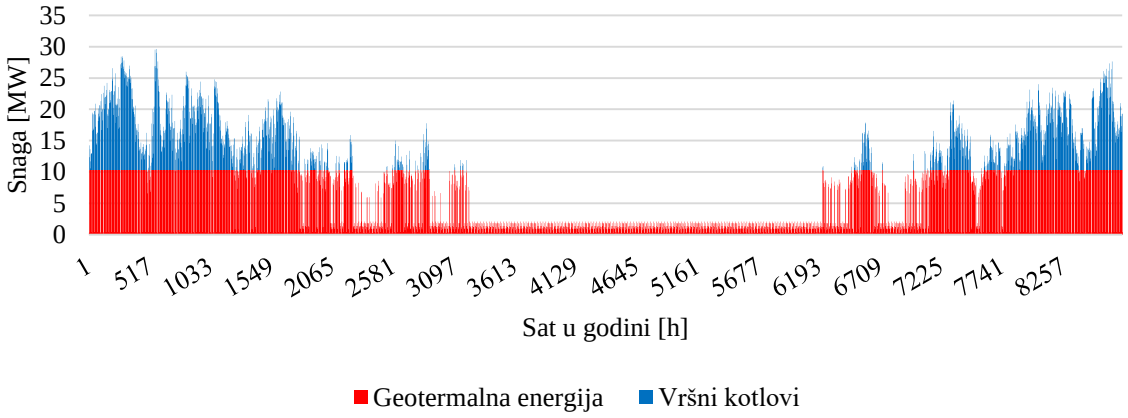
Slika 33. CTS Rečica

5.2. Scenarij 2. ORC + spoj na CTS Grada Karlovca

Slično kao i u prijašnjem scenariju, izgrađuje se ORC postrojenje, a toplinskom energijom se u ovom slučaju opskrbljuje grad Karlovac. Potrebno izgraditi spojni toplovod duljine oko 12.000 m te spoj na CTS. U tom slučaju kotlovnice na prirodni plin i loživo ulje mijenjaju režim rada i poprimaju ulogu pokrivanja vršnog opterećenja. Izrađeno je više varijanta ovog scenarija za različite otkupne cijene toplinske energije i različite maksimalne vrijednosti toplinske energije dostavljane u CTS. Također je postavljeno ograničenje maksimalnog iznosa toplinske energije dostavljane u CTS u iznosu od 10,32 MW s ciljem da se zbog zadovoljavanja toplinskih potreba ni u jednom trenutku ORC ne mora gasiti ili prelaziti u režim rada ispod 25 % nazivne snage. Ovo ograničenje se postavlja zbog naglog pada učinkovitosti ORC-a kod niskih opterećenja i

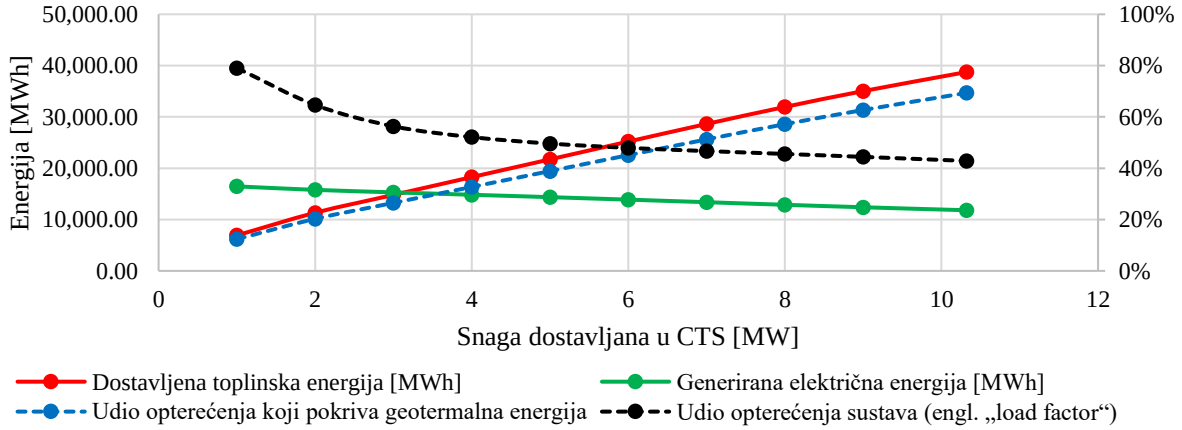
izbjegavanja naglih promjena toplinskih opterećenja dijelova postrojenja što skraćuje životni vijek postrojenja. Za zadovoljavanje navedene maksimalne snage od 10,32 MW je potrebno u samom postrojenju zbog gubitaka izdvajati za CTS 11,43 MW.

Slika 34. prikazuje satnu raspodjelu godišnjeg opterećenja CTS-a u gradu Karlovcu [13]. Raspodjela je dobivena primjenom stupanj sat metode opisane u poglavlju 4.1.1.2. i raspodjele potrošnje PTV-a opisane u poglavlju 4.1.1.3. U istoj slici je prikazana raspodjela proizvodnje toplinske energije za slučaj maksimalnog udjela geotermalne energije. Crvenom bojom označeno područje prikazuje dio toplinskih potreba koje pokriva geotermalna energija, a plavom bojom dio koji pokrivaju kotlovi u Toplani Karlovac. Za slučaj najviše snage prikazan na slici se geotermalnom energijom pokriva 67 % ukupnih potreba u CTS-u.



Slika 34. CTS - Karlovac

Slika 35. prikazuje podatke o različitim verzijama scenarija 2 ovisno o toplinskoj snazi. Povećanje snage vrlo blisko prati udio opterećenja pokriven iz geotermalne energije. Vidljivo je polagano razdvajanje linija povećanjem snage. Uzrok tome je povećanje toplinskih gubitaka. Proizvodnja električne energije prikazuje tek slabu osjetljivost na povećanje toplinske snage. Razlog tome je visoka učinkovitost proizvodnje toplinske energije s oko 90 % do isporuke u CTS u usporedbi s 10 do 15 % za električnu energiju. Zbog visoke učinkovitosti proizvodnje toplinske energije je potrebno odvajati tek manji dio protoka termalne vode za povećanje toplinske snage u odnosu za koliko je potrebno promijeniti protok za promijenu električne snage za isti iznos.



Slika 35. Međuovisnost generiranja električne i toplinske energije

Ista slika također prikazuje vezu opterećenja sustava sa nazivnom snagom. Vidljivo je da je stupanj opterećenja najveći kod niske snage te pada povećanjem snage. Razlog tome je pokrivanje baznog opterećenja i velik broj sati u radu na maksimalnoj snazi kod niske instalirane snage dok se povećanjem snage udio opterećenja sustava smanjuje. Promijena snage nema utjecaj na maksimalnu snagu ORC postrojenja. Razlog tome je što je maksimalna snaga postrojenja određena minimalnim toplinskim opterećenjem CTS-a koje je za svaki slučaj jednako. Za izgradnju spojnog voda se ovisno o nazivnoj snazi koriste dvostruke predizolirane cijevi dimenzija DN 40 do DN 125. (prema poglavlju 4.1.1.4.)

Tablica 10. Podaci o scenariju 2. ORC + spoj na CTS Grada Karlovca

Veličina	Iznos		Jedinica
	2	10,32	MW
Toplinske potrebe	55.871,01		MWh/god.
Vršno opterećenje	29,63		MW
Dostavljena toplinska energija u mrežu	11.328,15	38.753,16	MWh/god.
Gubitci u transmisiji	3		%
Gubitci u glavnoj toplinskoj podstanici	5		%
Ostali gubitci	2		%
Ukupni toplinski gubitci	9,7		%
Nazivna snaga ORC postrojenja	1.984,82	1.984,82	kW
Faktor opterećenja ORC postrojenja	90,82	67,96	%
Proizvedena električna energija	15.790,6	11.816,17	MWh/god.
Utrošena energija za pogon pumpa (5% toplinske energije)	566,4	1.937,66	MWh/god.
Gubitci u transformaciji električne energije	1		%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	2.265,63	7.750,63	tona/god.
Ušteda emisija CO2 u proizvodnji el. e.	3.316	2.481,4	tona/god.

5.3. Scenarij 3. Spoj na CTS Grada Karlovca

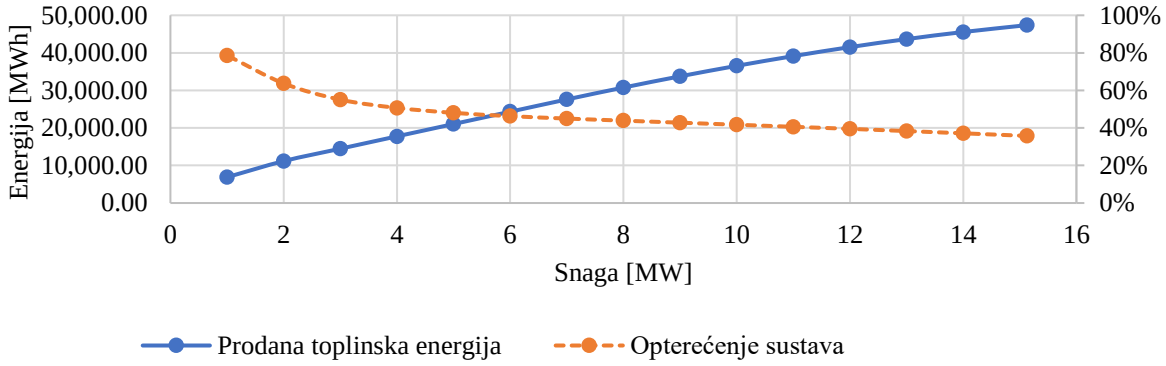
Scenarij 3 također razmatra opskrbu grada Karlovca toplinskom energijom, ali u ovom slučaju se ne gradi ORC postrojenje pa je moguće svu generiranu energiju predavati u CTS. Jednadžba (13) prikazuje izračun maksimalne dostupne toplinske snage. Za ovaj slučaj ona iznosi 15,125 MW što je 51% vršnog opterećenja CTS-a u iznosu od 29,63 MW (Tablica 8).

$$P_{th} = Q_m \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta_{th} \tag{13}$$

Gdje je:

- P_{th} – toplinska snaga [MW] – 15,125 MW
- Q_m – dostupni maseni protok [kg/s] – 50 kg/s

- ΔT – promjena temperature termalne vode [K] – pretpostavka pada temperature sa 140 na 60 °C. ΔT= 80 K
- η_{th}- toplinska učinkovitost sustava [%] - 90,307 % - Tablica 11



Slika 36. Veza nazivne snage sustava i faktora opterećenja

Slika 36. prikazuje vezu između nazivne snage sustava i faktora opterećenja. Isto kao u prethodnom scenariju se najviši faktor opterećenja postiže za najniže snage, a to je prvenstveno pokrivanje potrošnje PTV-a. Za izgradnju spojnog voda se ovisno o nazivnoj snazi koriste dvostruke predizolirane cijevi dimenzija DN 40 do DN 150. (prema poglavlju 4.1.1.4.)

Tablica 11. Podaci o scenariju 3. Spoj na CTS Grada Karlovca

Veličina	Iznos		Jedinica
Snaga sustava	2	15,125	MW
Toplinske potrebe	55.871,01		MWh/god.
Dostavljena toplinska energija u mrežu	11.166,1	48.381,9	
Gubitci u transmisiji	3		%
Gubitci na toplinskim podstanicama	5		%
Gubitci na glavnoj toplinskoj podstanici	5		%
Ostali gubitci	2		%
Ukupni toplinski gubitci	9,7		%
Utrošena energija za pogon pumpa (5% toplinske energije)	558,31	2.419,09	MWh/god.
Faktor opterećenja sustava	63,73	35,76	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	2.115,98	9.168,37	tona/god.

5.4. Scenarij 4. Izgradnja ORC postrojenja

Scenarij 4 je sličan ostalim scenarijima koji uključuju izgradnju ORC postrojenja. Jedina je razlika što ovdje postrojenje radi uvijek na maksimalnom opterećenju. Pretpostavljeni je faktor opterećenja od 95 %.

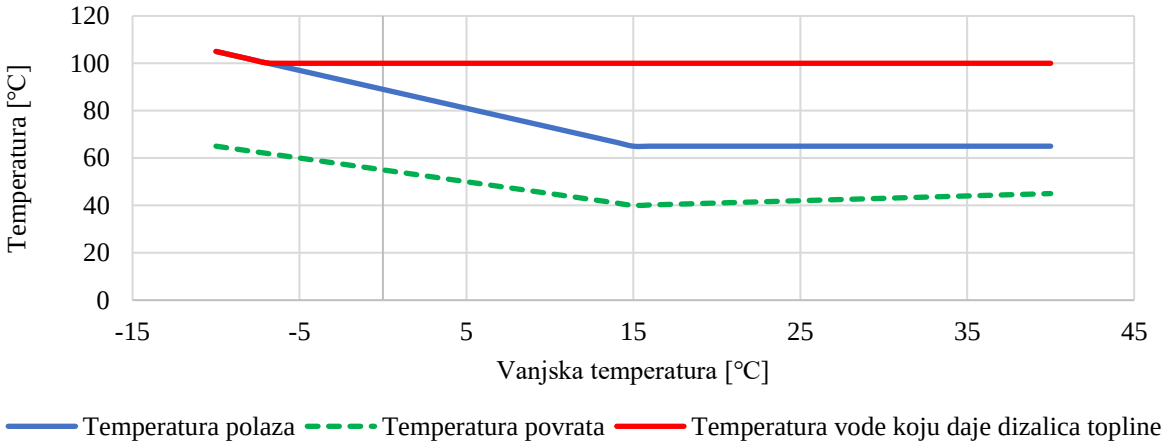
Tablica 12. Podaci o scenariju 4. izgradnja ORC postrojenja

Veličina	Iznos	Jedinica
Snaga ORC-a	2	MW

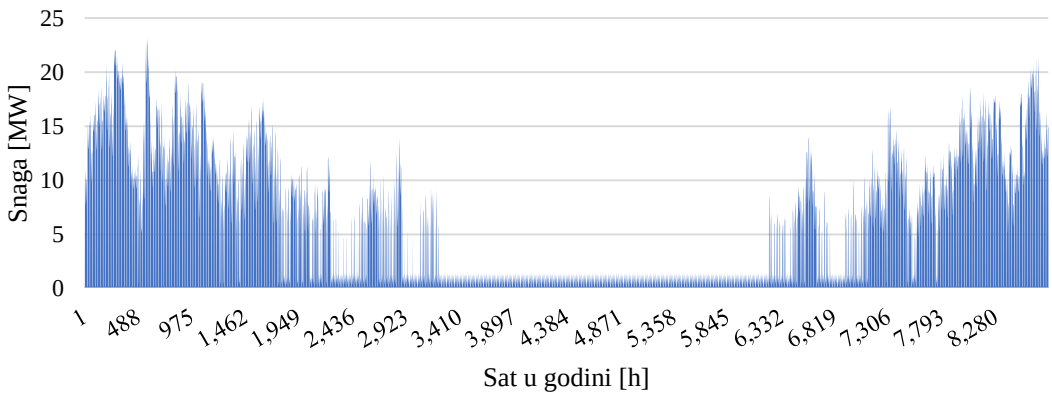
Faktor opterećenja	95	%
Gubitci transformacije	1	%
Generirana električna energija godišnje	16.477,56	MWh/god.
Ušteda emisija CO2 u proizvodnji el. e.	3.460,3	tona/god.

5.5. Scenarij 5. Izgradnja novog CTS-a baziranog na geotermalnoj dizalici topline

Ovaj scenarij uključuje korištenje termalnih izvora na lokaciji Lanište. Temperatura termalne vode na tom izvoru je 82 °C što je kao što prikazuje Slika 38. ispod tražene temperature u sustavu. Iz tog razloga je potrebno koristiti dodatan izvor topline. U svrhu ovog scenarija je razmatrana primjena geotermalne dizalice topline. Dizalica topline treba kako je objašnjeno u poglavlju 4.1.2. zbog tehničkih ograničenja proizvoditi vodu više temperature, nego je traženo u sustavu. Ovaj problem se rješava tako da se prije dizalice topline uvodi obilazni vod putem kojeg se preusmjerava dio ukupnog protoka, a ostatak prolazi kroz izmjenjivač topline dizalice topline gdje se grije na 100 °C. Zatim se obje struje ponovno miješaju i ostvaruje se tražena temperatura. U ovom radu nije razmatrano, ali prijedlog rješenja ovog problema s radom dizalice topline na nepotrebno visokim temperaturama je uvođenje izmjenjivača topline koji bi se koristio za pokrivanje potreba kad je tražena temperatura vode ispod temperature termalne vode. Problem s tim rješenjem je potreba za velikom površinom izmjenjivača topline zbog malih temperaturnih razlika.

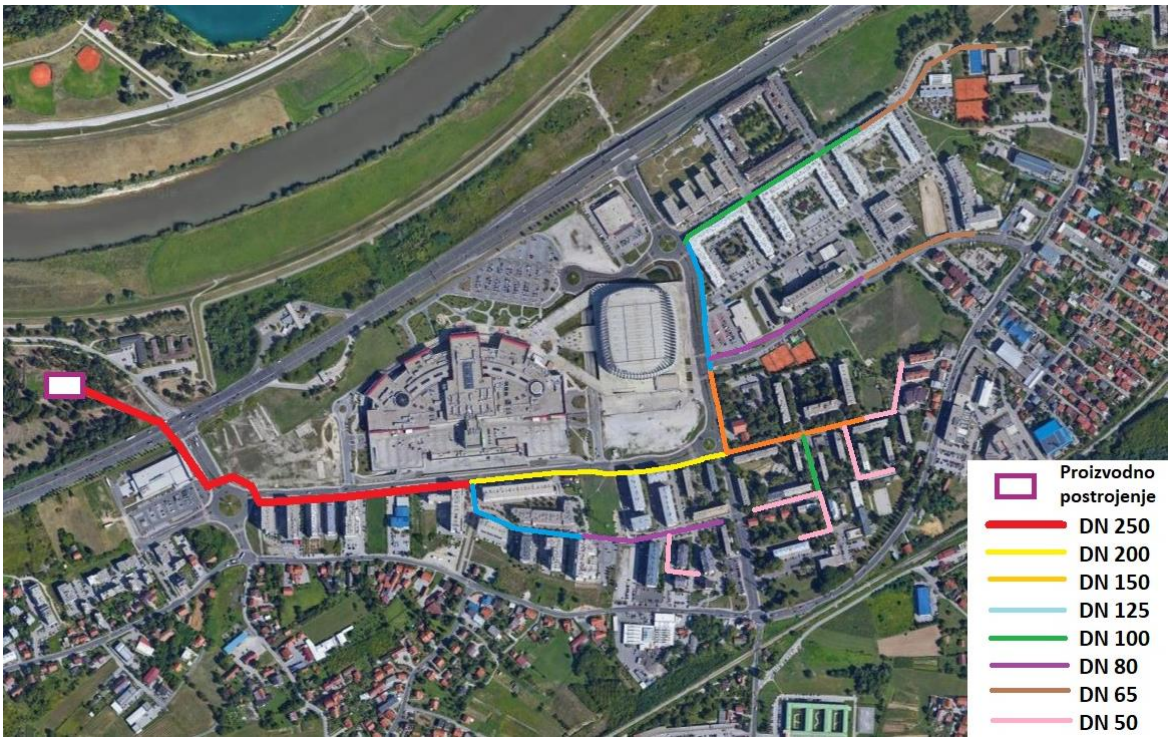


Slika 38. Temperature u sustavu



Slika 37. Rad dizalice topline

Slika 39. prikazuje plan CTS-a u naseljima Lanište, Jaruščica i Remetinec. Dimenzije cijevi su određivane prema postupku opisanom u poglavlju 4.1.1.4. Dimenzioniranje distribucijske mreže. U ovom slučaju se zbog visokih toplinskih potreba nije moglo cijelu mrežu napraviti s dvostrukim cijevima, nego je dio mreže oznake cijevi DN 250 izrađen iz jednostrukih cijevi. Za dimenzije jednostrukih predizoliranih cijevi se koristio katalog proizvođača „Set“ [37].



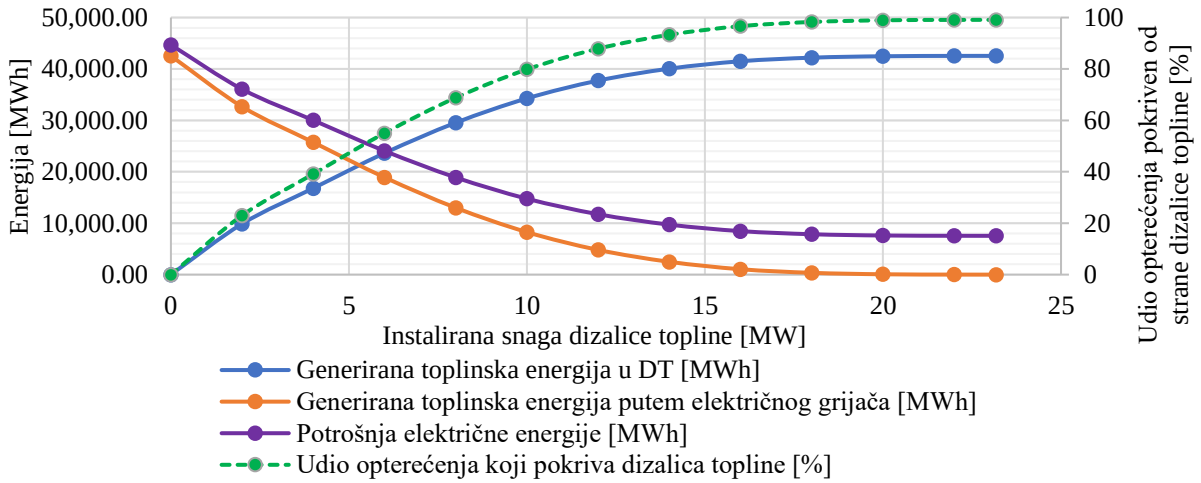
Slika 39. CTS Lanište

Tablica 13. Podaci o scenariju 5. Izgradnja novog CTS-a baziranog na geotermalnoj dizalici topline

Veličina	Iznos	Jedinica
Dostupan protok	88	kg/s
Temperatura	82	°C
Toplinske potrebe	37.584,3	MWh/god.
Dostavljena toplinska energija u mrežu	42.932,6	MWh/god.
Vršno opterećenje	23,18	MW
Gubitci u transmisiji	3	%
Gubitci u distribuciji	5	%
Gubitci u toplinskim podstanicama	5	%
Ukupni toplinski gubitci	12,5	%
Faktor opterećenja sustava	21,14	%
Utrošena električna energija	7.549,5	MWh/god.
COP	Od 6,55 do 7,88	-
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.931,47	tona/god.

5.6. Scenarij 6. Kombinacija DT i kotla s električnim grijačem

Scenarij 5 obrađuje mogućnosti optimizacije CTS-a obrađenog u scenariju 4. U scenariju 4 su zamjetne visoke oscilacije u potraživanim toplinskim potrebama i visoka vršna opterećenja koja nameću potrebu za ugradnjom sustava dizalica topline nazivne snage višestruko veće od prosječnih potreba. Stoga se nameće rješenje instalacije drugog izvora topline koji pokriva vršna opterećenja. U ovom scenariju se razmatra primjena kotla s električnim grijačem. Razmatra se nekoliko kombinacija instalirane snage dizalice topline i električnog kotla. Slika 40. prikazuje rad kombinacije DT i kotla s električnim grijačem. Također je u istoj slici prikazana potrošnja električne energije te udio DT u ukupnoj opskrbi toplinskom energijom.



Slika 40. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla s električnim grijačem

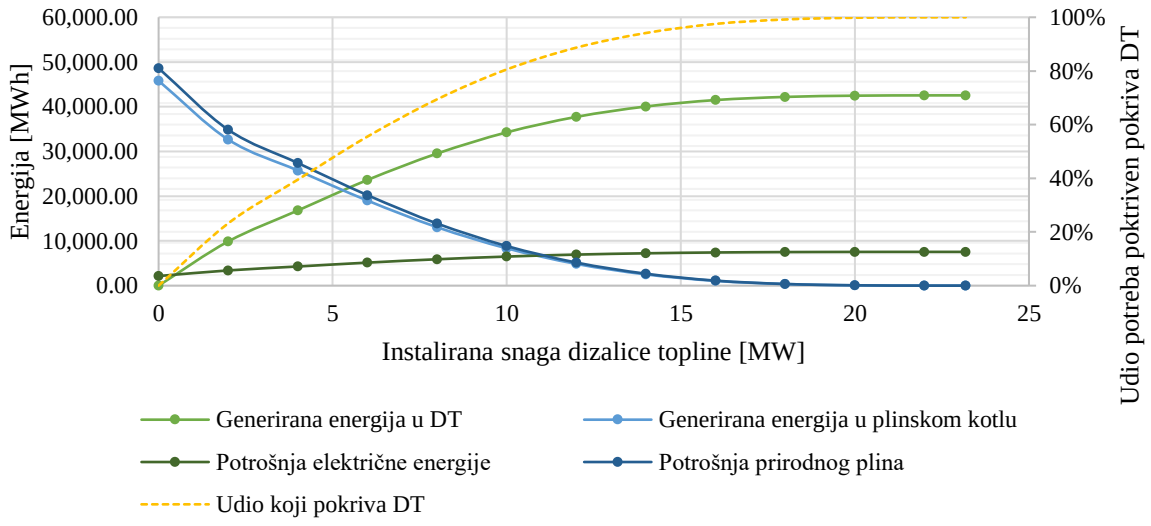
Vidljivo je da se zbog izraženih vršnih opterećenja instalirana snaga DT može smanjiti s 23,18 MW sve do 12 MW uz zadržavanje udjela u proizvodnji toplinske energije oko 90% te uz tek neznatno višu potrošnju električne energije.

Tablica 14. Podaci o scenariju 6. DT + kotao s električnim grijačem

Veličina	Iznos		Jedinica
Udio dizalice topline u kapacitetu	100	0	%
Utrošena električna energija	7.549,5	44.688,2	MWh
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.931,47	-1.867,7	tona

5.7. Scenarij 7. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin

Scenarij 6 je sličan scenariju 5. U ovom scenariju se umjesto vršnog električnog kotla ugrađuje kotao na prirodni plin. Slika 41. prikazuje međuovisnosti između generirane energije u DT i kotlu te potrošnje električne energije, odnosno prirodnog plina. Zamjetan je vrlo slab utjecaj snage DT na potrošnju električne energije u području visokih instaliranih snaga DT. Objašnjenje leži u činjenici da su potrebe za snagom iznad 15 MW vrlo rijetke pa se povećanjem snage DT snižava njen faktor opterećenja.



Slika 41. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla na prirodni plin

Tablica 15. Podaci o scenariju 7. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin

Veličina	Iznos		Jedinica
Udio dizalice topline u kapacitetu	0	100	%
Utrošena električna energija	2.146,6	7.549,5	MWh
Utrošeni prirodni plin	48.613,4	0	MWh
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	-1.684,2	5.931,5	tona

5.8. Scenarij 8. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu

U scenariju 7 se obrađuje korištenje dizalice topline za bazno opterećenje i kotla na biomasu za vršna opterećenja. Koristi se kotao na drvnu sječku. Za proračun potrošnje biomase izražene u MWh se koristi jednadžba (14).

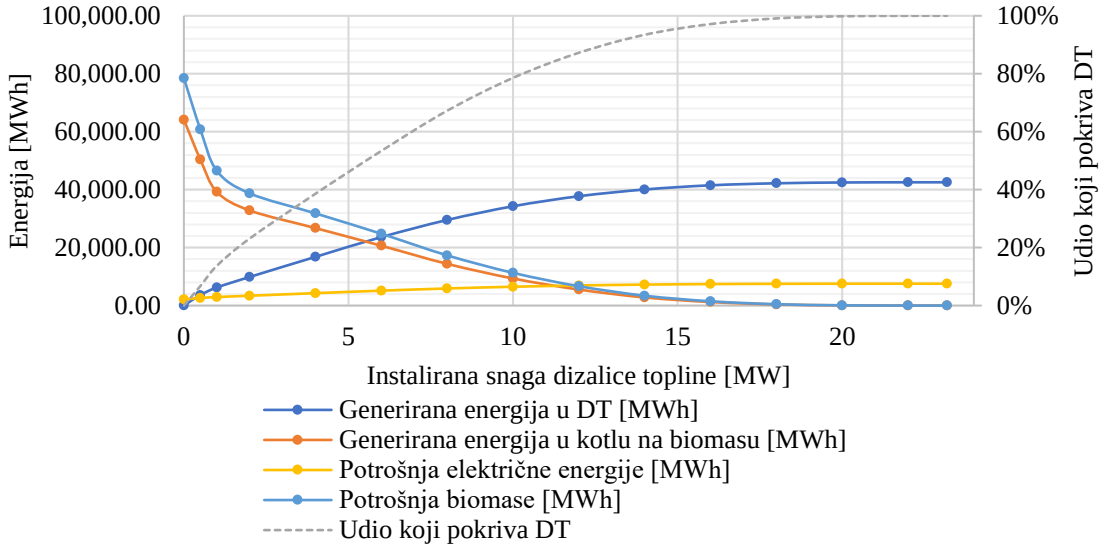
$$E_{biouk} = \frac{E_{biopotr}}{\eta_{kotao}} \tag{14}$$

Gdje je:

- E_{biouk} – ukupna potrebna energija koju je potrebno dostaviti [MWh]
- $E_{biopotr}$ – energija koju kotao na biomasu treba dostaviti u CTS [MWh]
- η_{kotao} – učinkovitost kotla na biomasu Slika 21.

Slika 42. prikazuje međuovisnost međuovisnost između generirane toplinske energije putem dizalice topline te kotla na biomasu sa potrošnjom električne energije i biomase. Vidljiv je mali utjecaj smanjenja snage DT sa snage vršnog opterećenja do 15 MW na promijene potrošnje električne energije te biomase. Razlog tome je što su tražene snage iznad 10-15 MW uglavnom

vršna opterećenja i kao takva nemaju veliki utjecaj na sveukupnu potrošnju energenta jer se radi o malom broju radnih sati. U području niskih snaga DT se vidi naglo povećanje generirane energije u kotlu na biomasu i potrošnji biomase. Ovo se objašnjava kombinacijom dvije pojave. Prestanak rada DT u baznom opterećenju u ulozi pokrivanja samo PTV te ograničenje rada kotla na biomasu iznad 20 % nazivnog kapaciteta, tj. kotao u ovom slučaju mora raditi na višoj snazi, nego što je potrebno.



Slika 42. Odnos generirane energije iz različitih izvora i potrošnje energenta za slučaj DT i kotla na biomasu

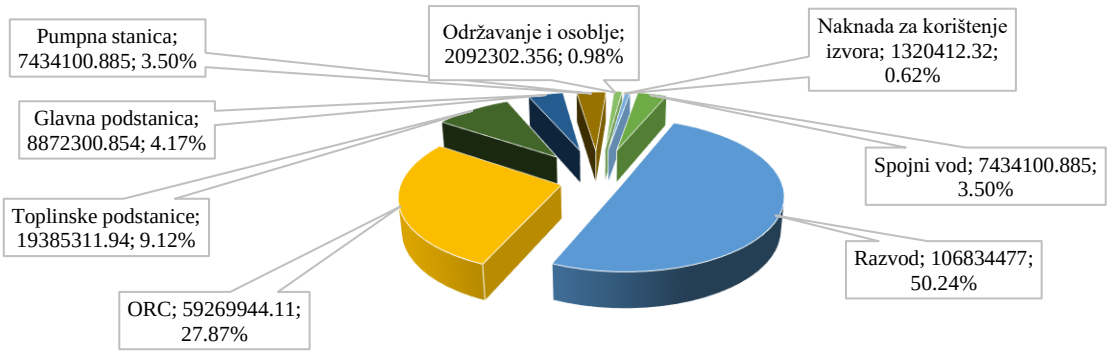
Tablica 16. Podaci o scenariju 8. Kombinacija geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu

Veličina	Iznos		Jedinica
Udio dizalice topline u kapacitetu	0	100	%
Utrošena električna energija	2.146,6	7.549,5	MWh
Utrošena biomasa	78.476,71	0	MWh
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	7.066,1	5.931,5	tona

6. REZULTATI TEHNO – EKONOMSKE ANALIZE

6.1. Scenarij 1 – Geotermalni ORC i CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska

Slika 43. prikazuje strukturu troškova za slučaj izgradnje geotermalnog ORC-a i novog CTS-a u naseljima Rečica i Luka Pokupska. Najveći udio investicije u iznosu od 50,24 % čini izgradnja distribucijske mreže u naselju. Uzrok visokoj cijeni distribucijske mreže je visoka razgranatost i niska gustoća naseljenosti naselja. ORC postrojenje iznosi 27,87 %, a razvod 9,27 %. Ostatak troškova otpada na spojni vod između postrojenja i naselja, toplinska podstanica na lokaciji postrojenja i pumpna stanica. Linearna gustoća toplinske energije iznosi 2.082 kWh/m što je više od minimalnih 900 kWh potrebnih da projekt bude isplativ prema [45].



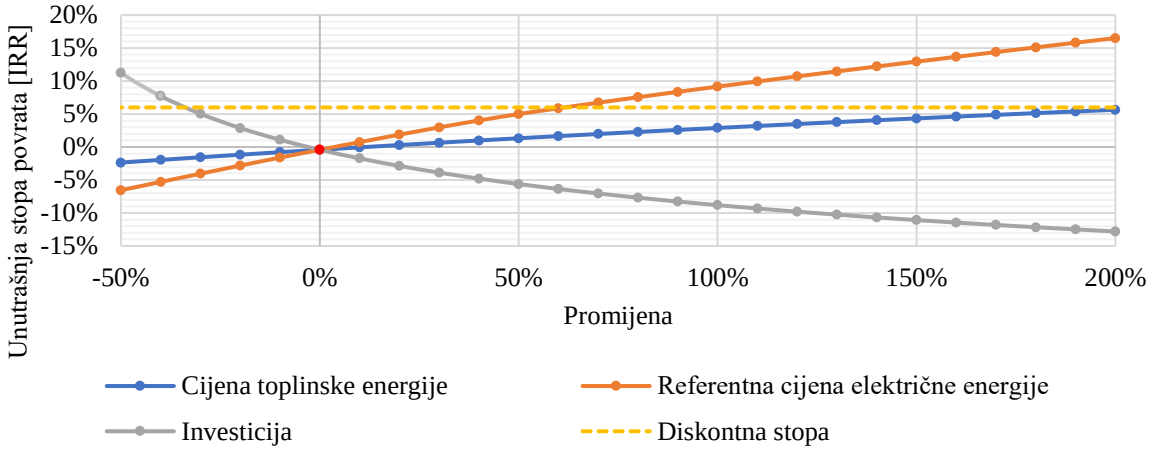
Slika 43. Struktura troškova

Tablica 17. Rezultati tehno ekonomske analize za referentni slučaj ORC + CTS

Veličina	Iznos	Jedinica
Duljina cjevovoda	7.752	m
Linearna gustoća toplinske energije	2.082	kWh/m
Ukupna investicija	154.830.374,4	kn
Godišnja zarada od prodaje električne energije (status povlaštenog proizvođača)	14.741.481,15	kn
Referentna cijena električne energije	1,02	kn/kWh
Godišnja zarada od prodaje električne energije (tržišne cijene)	5.119.017,63	kn
Godišnja zarada od prodaje toplinske energije (za cijenu od 0.3 kn/kWh)	5.294.329.77	kn
IRR (za cijenu toplinske energije od 0.3 kn/kWh)	-4,18	%
NPV (za cijenu toplinske energije od 0.3 kn/kWh)	-70.642.702,59	kn
Rok povrata investicije	16,15	godina
Potrebna nepovratna sredstva	34	%
Potrebna cijena toplinske energije	0,9	kn/kWh
Potrebna referentna cijena električne energije	1,632	kn/kWh

Slika 44. prikazuje analizu osjetljivosti na promjenu ulaznih podataka cijene toplinske energije, referentne vrijednosti električne energije i cijene investicije. Utjecaj prodajne cijene toplinske energije ima najmanji intenzitet. Projekt je isplativ unutar perioda od 15 godina tek uz povećanje referentne cijene električne energije za 60% ili toplinske za 200%. Za povećanje

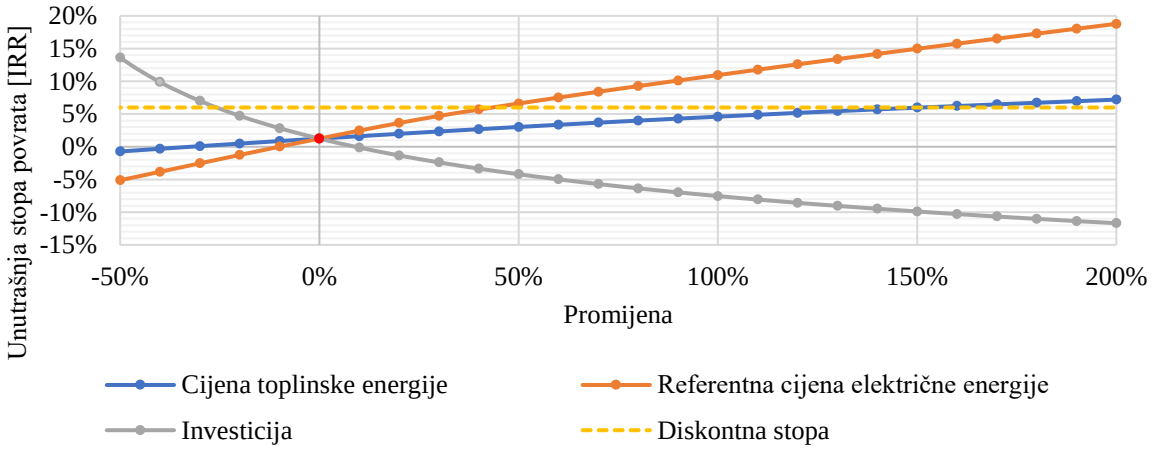
profitabilnosti projekta se također mogu koristiti i nepovratna sredstva u iznosu od 34 % ukupne investicije.



Slika 44. Analiza osjetljivosti

6.1.1. Varijacija scenarija 1. Kupci sami financiraju toplinske podstanice

U ovom scenariju kupci sami financiraju toplinske podstanice pa se može ponuditi niža cijena toplinske energije, nego u referentnom scenariju te je potreban manji udio nepovratnih sredstva. Slika 45. prikazuje rezultate analize osjetljivosti. Vidljivo je da je u ovom slučaju potrebna 40 % viša referentna vrijednost električne energije što je 20 % manje od referentnog scenarija. Povećanjem cijene toplinske energije za 150 % se dolazi na NPV=0. Također je moguće tražiti nepovratna sredstva u iznosu 26 % ukupne investicije.



Slika 45. Analiza osjetljivosti

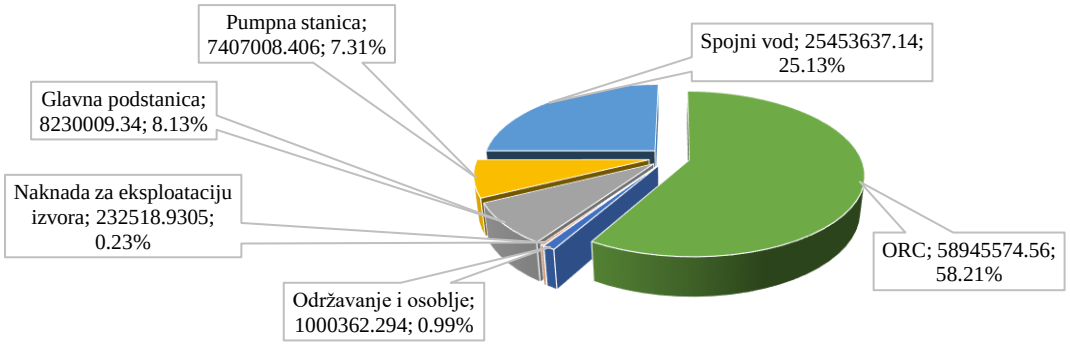
Tablica 18. Rezultati tehno - ekonomske analize za referentne vrijednosti varijante scenarija 1. kupci sami financiraju toplinske podstanice

Veličina	Iznos	Jedinica
IRR (za cijenu toplinske energije od 0.3 kn/kWh)	1,24	%
NPV (za cijenu toplinske energije od 0.3 kn/kWh)	-48.922.291,79	kn

Rok povrata investicije	12,5	godina
Potrebna nepovratna sredstva	26	%

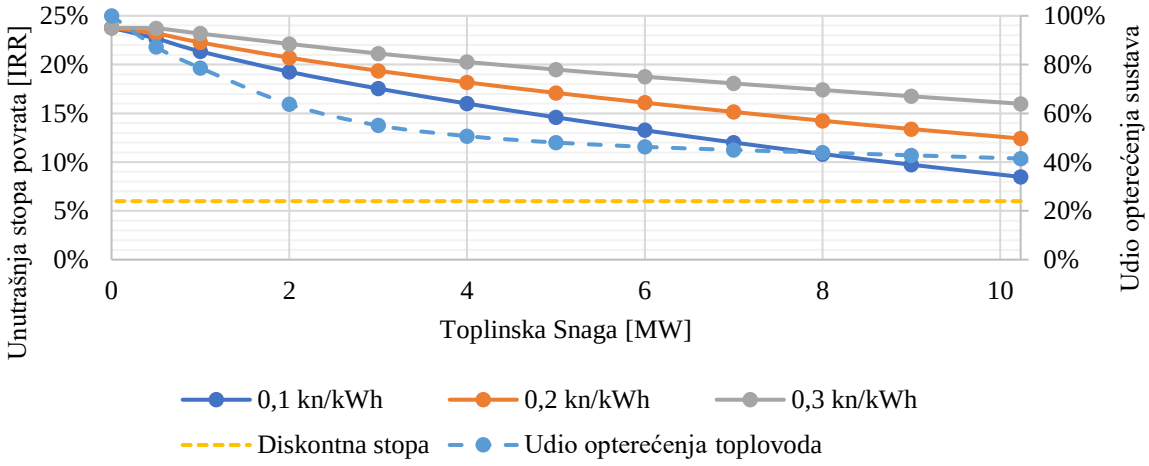
6.2. Scenarij 2 - Geotermalni ORC i priključak na CTS grada Karlovca

Struktura troškova i prihoda za ovaj scenarij je slična prethodnome. Glavna je razlika u nedostatku troška izgradnje distribucijske mreže i toplinskih podstanica. Slika 46. prikazuje strukturu troškova za scenarij 2. Vidljivo je da dominantan udio otpada na ORC postrojenje dok tek manji dio na komponente u CTS-u. razlog tome je što se koristi već postojeći CTS.



Slika 46. Struktura troškova za slučaj najviše snage (10,32 MW)

U CTS-u u gradu Karlovcu je cijena toplinske energije 0,37 kn/kWh. S obzirom za dotrajalost opreme u Toplani Karlovac i sve više troškove održavanja iste, u interesu proizvođača toplinske energije je smanjiti broj radnih sati. To se može ostvariti dobavljanjem dijela toplinske energije iz drugog postrojenja. Izgradnjom spojnog toplovoda između geotermalne elektrane Rečica i grada Karlovca se upravo to i ostvaruje. Toplana Karlovac za generiranje toplinske energije koristi prirodni plin i teško loživo ulje. Potrebno je ponuditi otkupnu cijenu toplinske energije manjeg iznosa, nego je cijena proizvodnje iz navedenih goriva.



Slika 47. Utjecaj prodajne cijene toplinske energije i snage na IRR

Slika 47. prikazuje utjecaj prodajne cijene toplinske energije i snage na IRR. Vidljivo je da je IRR iznad vrijednosti diskontne stope čak i za cijenu od 0,1 kn/kWh i povećava se smanjenjem snage. Razlog ovome je u tome što se kod niskih toplinskih opterećenja proizvodi više električne energije čija prodajna cijena je znatno viša od prodajne cijene toplinske energije.

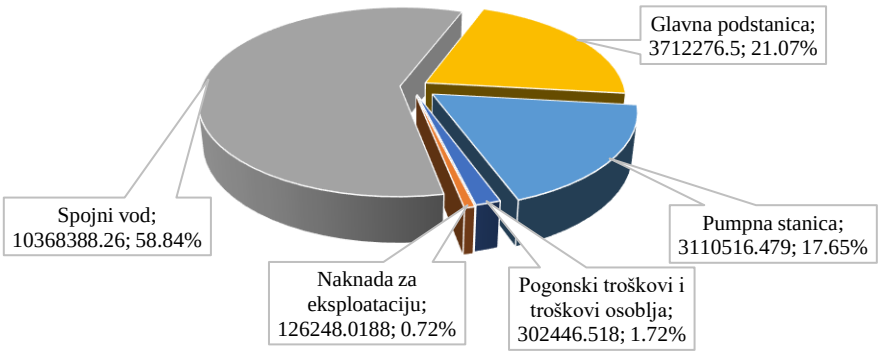
Drugi razlog porasta IRR-a smanjenjem snage je povećanje stupnja opterećenja kod niskih snaga jer tada maksimalna snaga odgovara opterećenju samo za proizvodnju PTV što čini bazni dio opterečenja. To je ujedno i najpovoljniji režim rada sa strane Toplane Karlovac. Također, velika je razlika i u investiciji u infrastrukturu ovisno o toplinskog snazi.

Tablica 19. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 2. Geotermalni ORC i priključak na CTS grada Karlovca

Naziv	Iznos		Jedinica
Nazivna snaga	2	10,32	MW
Ukupna investicija	66.908.879,77	100.036.229,4	kn
Trošak remonta svakih 10 godina	6.690.887,98	10.003.622,94	kn
Godišnja zarada od prodaje električne energije (status povlaštenog proizvođača)	15.964.831,26	11.937.807,02	kn
Godišnja zarada od prodaje električne energije (tržišne cijene)	5.964.221,83	4.233.713,86	kn
Godišnja zarada od prodaje toplinske energije (za cijenu od 0.2 kn/kWh)	2.046.022,48	6.999.362,35	kn
IRR	20,71	12,36	%
NPV	66.520.707,75	40.651.535,67	kn
Rok povratka investicije	4,35	6,26	godina

6.3. Scenarij 3 - Geotermalni CTS s priključkom na grad Karlovac

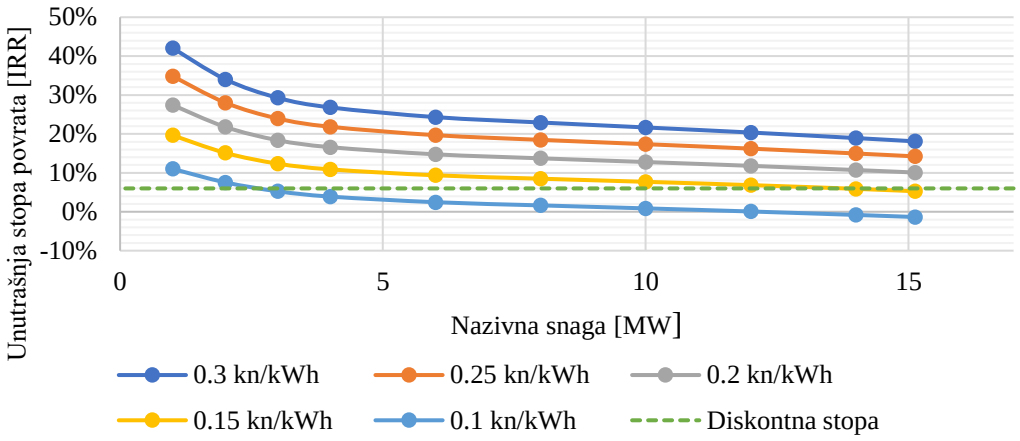
U ovom slučaju su investicijski troškovi znatno manji jer ne uključuju izgradnju ORC postrojenja. Slika 48. prikazuje strukturu troškova, a Tablica 20. rezultate proračuna za ovaj scenarij.



Slika 48. Struktura troškova

Tablica 20. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 3. Geotermalni CTS s priključkom na grad Karlovac

Veličina	Iznos		Jedinica
Nazivna snaga sustava	2	15,125	MW
Ukupna investicija	6.876.472,5	52.003.323,26	kn
Godišnja zarada od prodaje toplinske energije (za cijenu od 0.2 kn/kWh)	2.016.753,83	8,557,777.54	kn
IRR	21,8067	10,08	%
NPV	8,276,163.64	14.229.076,72	%
Rok povratka investicije	4,3	7,34	Godina

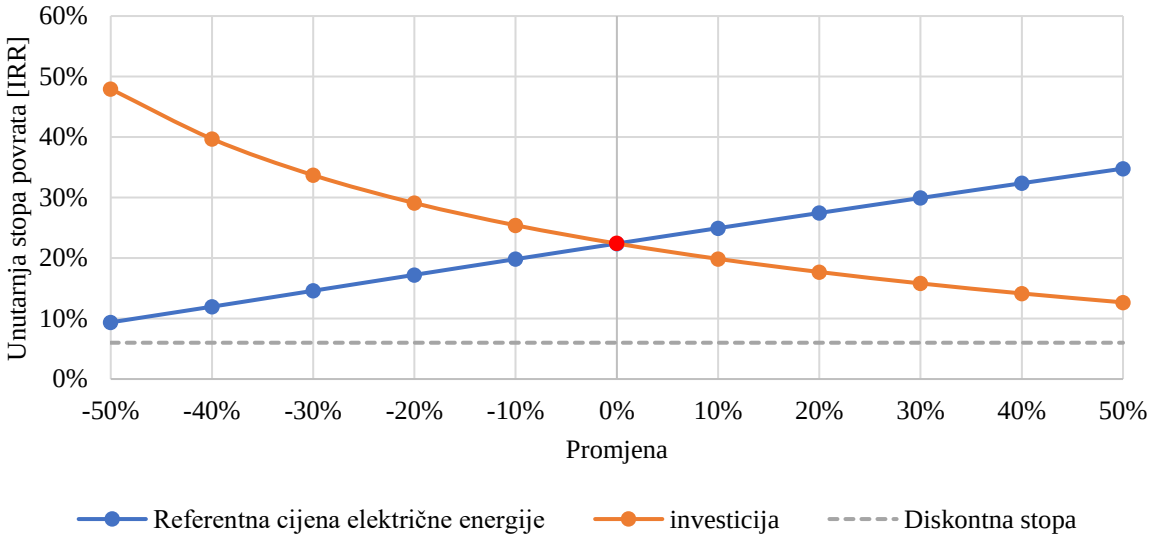


Slika 49. Utjecaj prodajne cijene i nazivne snage na IRR

Slika 49. prikazuje ovisnost IRR-a o cijeni toplinske energije i snage. Uočljiva je tendencija pada IRR-a s porastom snage. Razlog ovome leži u faktoru opterećenja postrojenja koji je najviši za najmanju snagu i smanjuje se povećanjem snage. Vidljivo je da je moguće uz zadovoljavajuću profitabilnost prodavati toplinsku energiju čak i po cijeni od 0,15 kn/kWh na gotovo cijelom radnom području.

6.4. Scenarij 4. Geotermalni ORC na lokaciji Rečica

Slika 50. prikazuje utjecaj promjena referentne cijene električne energije i investicije na unutarnju stopu povrata. Vidljivo je da se čak i za smanjenje referentne vrijednosti električne energije za 50 % zadržava IRR veći od diskontne stope. Razlog ovome je relativno mala vrijednost investicije u usporedbi s očekivanom vrijednosti kod gradnje novog geotermalnog postrojenja. Razlikuje se u tome što se iz proračuna izostavlja investicija u bušotine i istraživanja jer su iste već izrađene. [46]



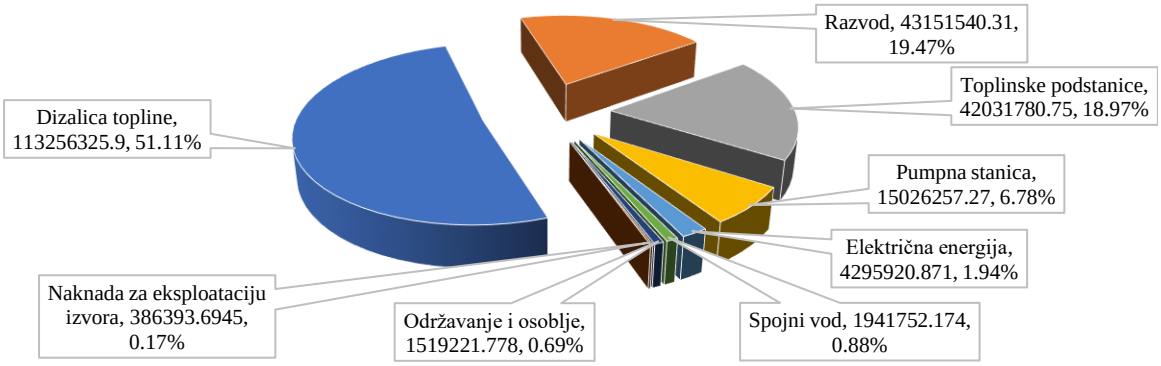
Slika 50. Analiza osjetljivosti za scenarij izgradnje ORC postrojenja

Tablica 21. Rezultati tehno – ekonomske analize za scenarij 4. Geotermalni ORC na lokaciji Rečica

Naziv	Iznos	Jedinica
Nazivna snaga ORC postrojenja	2	MW
Ukupna investicija	59.396.424	kn
Trošak remonta svakih 10 godina	5.939.642,4	kn
Godišnja zarada od prodaje električne energije (status povlaštenog proizvođača)	16.828.947,72	kn
Godišnja zarada od prodaje električne energije (tržišne cijene)	6.353.048,43	kn
IRR	22,3953	%
NPV	65.849.098,72	kn
Rok povratka investicije	4,08	godina

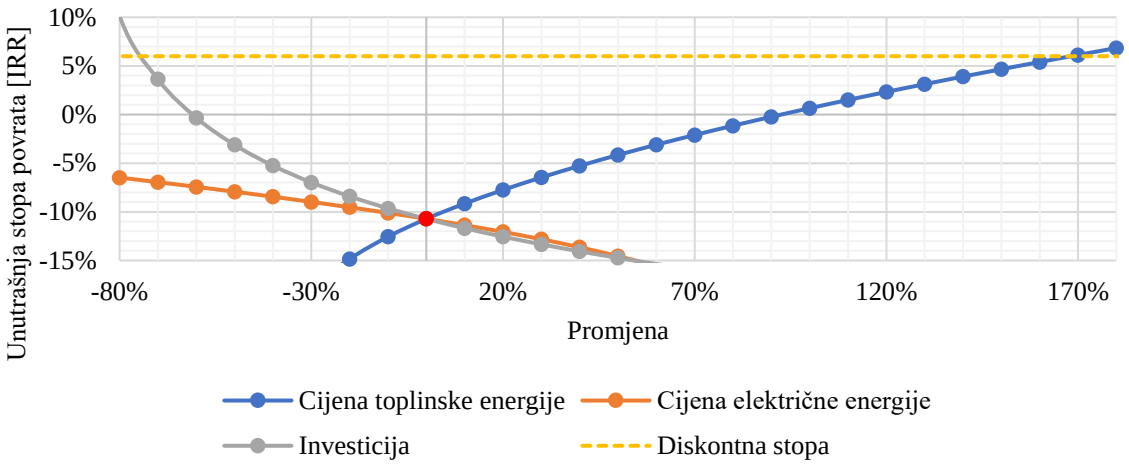
6.5. Scenarij 5 - Novi CTS baziran na geotermalnoj toplinskoj dizalici topline

Scenarij 4 obrađuje mogućnost izgradnje CTS-a i opskrbe naselja toplinskom energijom putem geotermalne dizalice topline. Slika 51. prikazuje strukturu troškova za ovaj slučaj. Vidljiv je visoki udio dizalice topline u investiciji. Razlog tome je što je u ovom slučaju potrebno svu toplinsku energiju dobavljati putem dizalice topline uključujući i vršna opterećenja koja višestruko nadmašuju prosječna opterećenja, pa je potrebna visoka instalirana snaga koja se koristi mali broj sati godišnje.



Slika 51. Struktura troškova (DT = 23,18 MW)

Slika 52. prikazuje analizu osjetljivosti. Vidljivo je da tek povećanjem cijene za 170 % što odgovara 0,81 kn/kWh projekt postaje profitabilan. Za usporedbu, cijena toplinske energije za kućanstvo u gradu Zagrebu iznosi 0,17 kn/kWh. Time se dolazi do činjenice da je cijena od 0,8 kn/kWh skoro 5 puta viša od postojeće cijene u CTS-u grada Zagreba pa postoji mala vjerojatnost priključenja kupaca. Za referentnu cijenu je uzeta vrijednost od 0,3 kn/kWh kao usporediva cijena s kotlom na prirodni plin. Cijenu od 0,3 kn/kWh je moguće održati profitabilnom unutar 15 godina uz nepovratna sredstva EU fondova u iznosu od 74,36 %. Linearna gustoća toplinske energije iznosi 9.710 kWh/m što je više od minimalnih 900 kWh/m. [45]

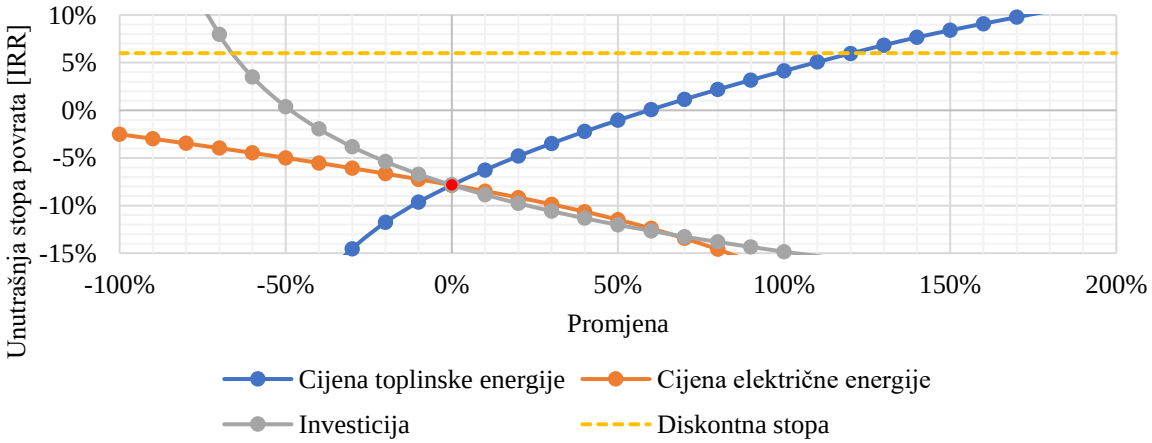


Slika 52. Analiza osjetljivosti za slučaj primjene geotermalne dizalice topline

Tablica 22. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj samo dizalice topline

Naziv	Iznos	Jedinica
Duljina cjevovoda	3870	m
Linearna gustoća toplinske energije	9.710	kWh/m
Ukupna investicija	215.407.656,45	kn
Godišnja zarada od prodaje toplinske energije (za cijenu od 0.3 kn/kWh)	12.154.694,28	kn
IRR	-10,72	%
NPV	-164.040.280,88	kn
Vrijeme povrata investicije	45,74	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	74,36	%
Potrebna cijena toplinske energije	0,81	kn/kWh
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.931,47	tona/god.

6.5.1. Varijacija scenarija 5. – Kupci sami financiraju ugradnju toplinskih stanica



Slika 53. Analiza osjetljivosti – bez toplinskih podstanica

Ova varijanta je identična s osnovnom verzijom scenarija 5. Jedina je razlika u modelu financiranja toplinskih stanica. Razmatra se mogućnost da krajnji kupci toplinske energije sami

financiraju ugradnju toplinskih stanica. Time se otvara mogućnost ponude niže cijene toplinske energije

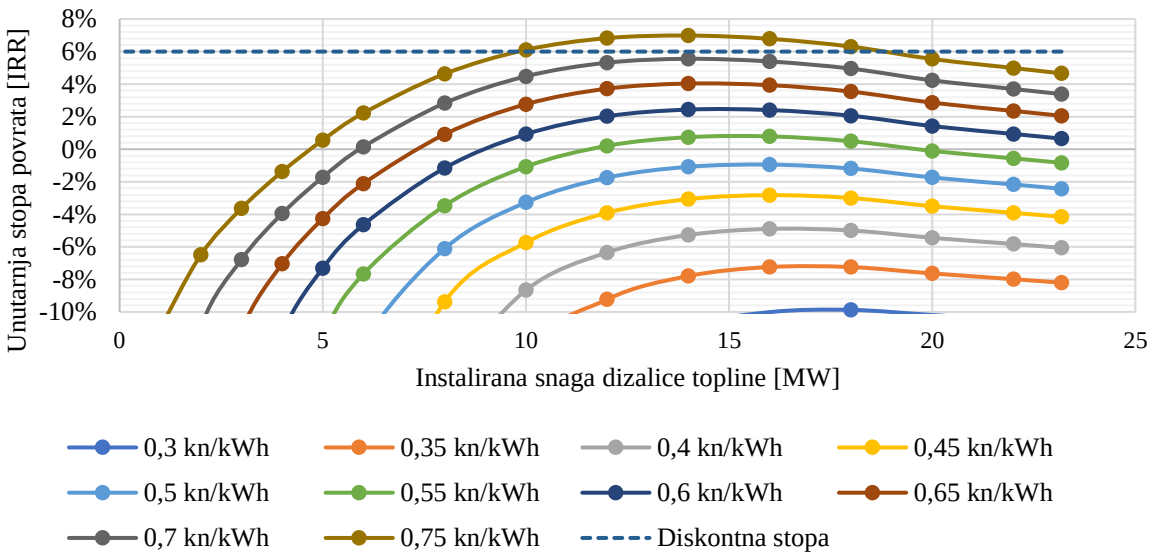
Slika 53. prikazuje utjecaj cijene toplinske energije na IRR, a Tablica 23. rezultate tehno-ekonomske analize. Iz slike je vidljivo je da je za ovaj slučaj potrebna cijena toplinske energije viša za 120 % od referentne cijene što odgovara 0,66 kn/kWh što je oko 0,15 kn niže od osnovne varijante.

Tablica 23. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj samo dizalice topline (bez toplinskih podstanica)

Veličina	Iznos	Jedinica
Ukupna investicija	173.375.876,02	kn
IRR	-7,851	%
NPV	-117.317.865,05	kn
Vrijeme povrata investicije	33,29	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	66,1	%
Potrebna cijena toplinske energije	0,66	kn/kWh
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.931,47	tona/god.

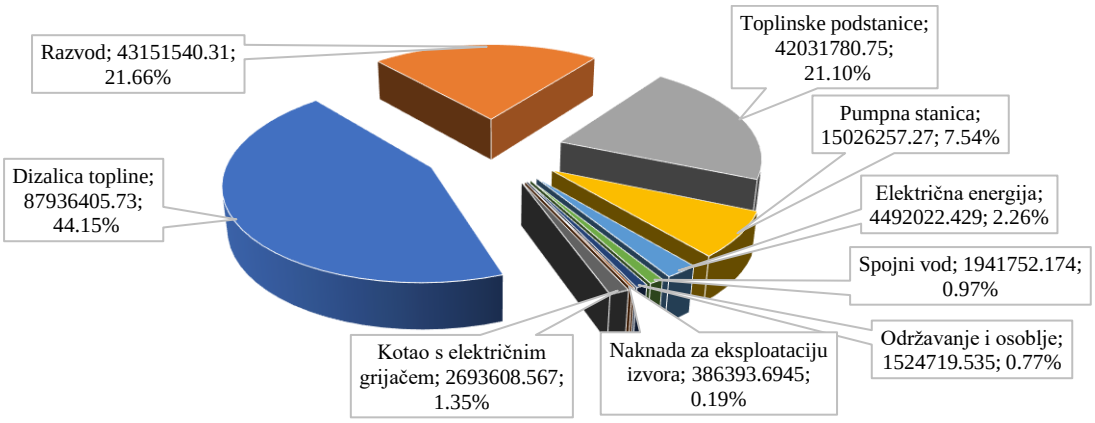
6.6. Scenarij 6 - Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s električnim grijačem

Scenarij 6 je modificirani scenarij 5. Razlikuje se u tome što se za pokrivanje vršnih opterećenja uvodi električni grijač kao jeftinija zamjena dizalice topline. Isprobane se različite kombinacije instalirane snage dizalice topline i električnog grijača. Dizalica topline ima visoku specifičnu cijenu, ali se investicija u dizalicu topline isplati za slučaj da ona ima visok stupanj opterećenja, tj. radi na nazivnoj snazi veliki broj sati godišnje. Električni grijač je zbog niske specifične cijene isplativ čak i za visoke instalirane snage, ali samo u slučaju rada mali broj sati na visokom opterećenju zbog visokih operativnih troškova električne energije. Slika 53. prikazuje utjecaj instalirane snage dizalice topline i cijene toplinske energije na IRR.



Slika 54. Utjecaj instalirane snage dizalice topline na IRR

Vidljivo je da se najpovoljnija kombinacija instalirane snage DT i električnog grijača nalazi za snagu DT između 10 i 16 MW, a grijača između 7,2 i 13,2 MW. Kod visokih snaga dizalice topline tj. kod snage električnog grijača ispod 5 MW dolazi do nagle promijene oblika krivulje



Slika 55. Struktura investicije za referentni slučaj (DT = 18 MW)

IRR-a. Razlog tome je povećanje specifične investicije električnog grijača kod snage ispod 5 MW prema [10]. Strukturu troškova investicije za slučaj navedene snage DT i električnog grijača prikazuje Slika 55.

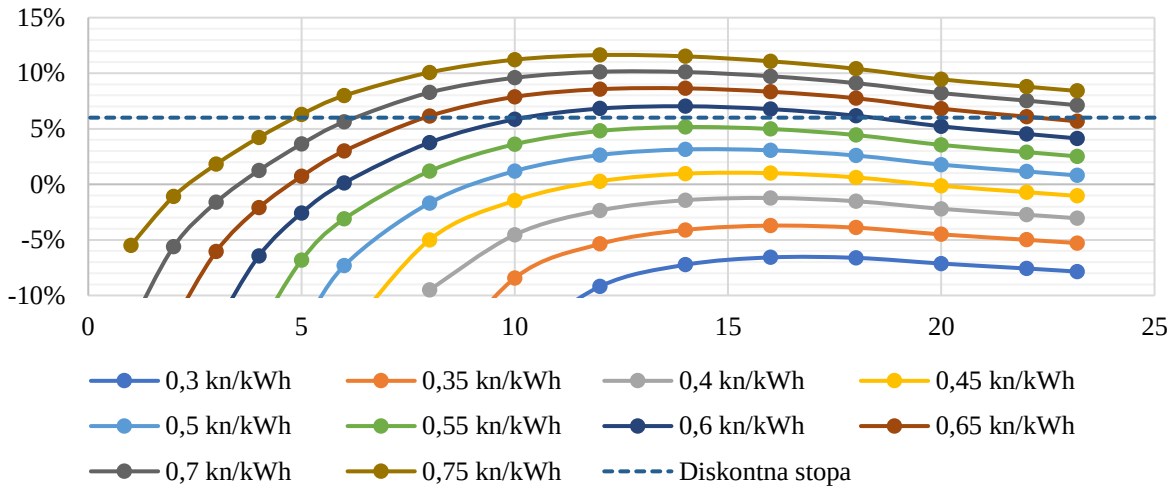
Ovaj scenarij daje bolje rezultate od prethodnog, ali još uvijek je minimalna cijena toplinske energije između 0,7 i 0,75 kn/kWh. Da bi projekt u zadanom razdoblju od 15 godina bio zadovoljavajuće isplativ za cijenu toplinske energije od 0,3 kn/kWh, potrebno je kod referentnog scenarija od snage dizalice topline 18 MW i cijene toplinske energije 0,3 kn/kWh uložiti nepovratna EU sredstva u iznosu od 72,2 % ukupne investicije.

Tablica 24. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + ELGR

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij s maksimalnim udjelom DT	
Cijena toplinske energije	0,3	0,75	0,75	kn/kWh
Instalirana snaga DT	18	14	18	MW
Ukupna investicija	192.781.344,80	175.318.796,14	192.781.344,8	kn
IRR	-9.8726	6,985	6,306	%
NPV	-142.541.476,98	11.060.676,85	3.726.211,21	kn
Rok povrata	41,94	8,8	9,14	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	72,2	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.868,03	5.475,6	5.868,03	tona/god

6.6.1. Varijacija scenarija 6 - Kupci sami financiraju ugradnju toplinskih stanica

Koriste se isti podaci s razlikom što se u investicijske troškove ne uključuje investicija u toplinske stanice. Slika 56. prikazuje odnos snage dizalice topline i prodajne cijene toplinske energije na IRR. U ovom slučaju zadovoljavajuće profitabilna toplinske energije se nalazi između 0,55 i 0,6 kn/kWh.



Slika 56. Utjecaj snage DT i cijene toplinske energije na IRR

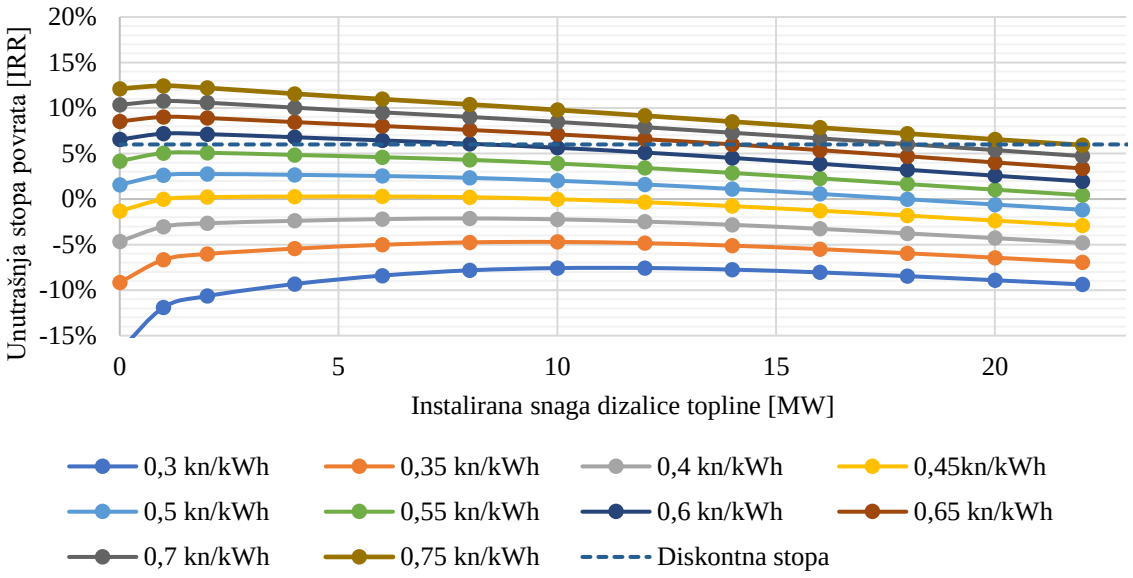
Tablica 25. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + ELGR (bez toplinskih podstanica)

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij (maksimalni udio DT)	
Cijena toplinske energije	0,3	0,6	0,6	kn/kWh
Instalirana snaga DT	16	14	18	MW
Ukupna investicija	142.018.289,72	133.287.015,39	150.749.564,05	Kn
IRR	-6,5773	7,022	6,174	%
NPV	-90.290.663,50	8.766.070,61	1.662.578,75	Kn
Vrijeme povrata investicije	29,47	8,84	9,26	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	62,1	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.739,8	5.475,6	5.868,03	tona/god

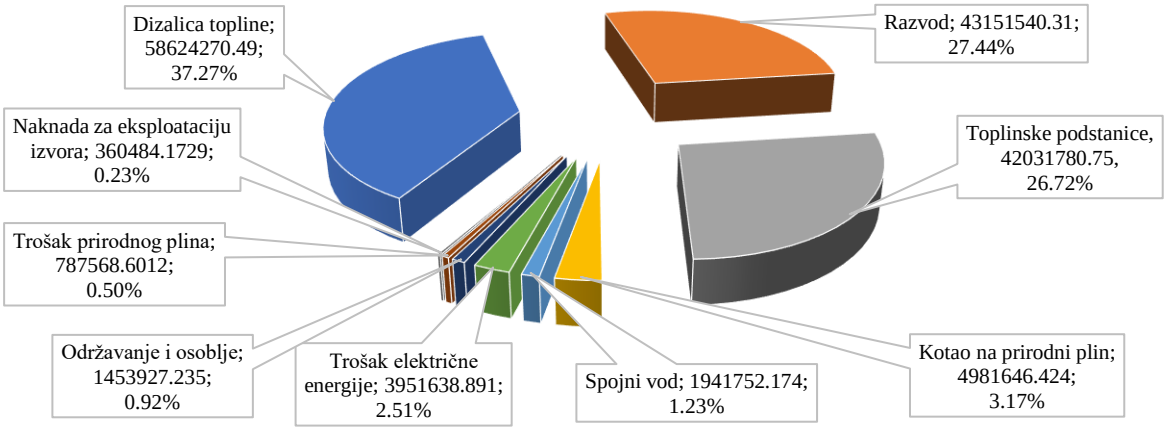
6.7. Scenarij 7 - Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s kotlom na prirodni plin

Slika 57. prikazuje utjecaj instalirane snage dizalice topline i kotla na prirodni plin te cijene toplinske energije na IRR. Iz slike je vidljivo da IRR za različite cijene toplinske energije poprima maksimalnu vrijednost kod različite vrijednosti instalirane snage DT. Za slučaj niskih

cijene toplinske energije se maksimum nalazi u području oko 10 MW instalirane snage DT te se povećanjem cijene kreće prema nižim snagama DT. Objašnjenje ove pojave leži u investicijskim podacima i varijabilnim troškovima pojedine tehnologije. Tako investicijski troškovi dizalice topline i kotla na prirodni plin prema [10] iznose 660.000 €/MW odnosno 60.000 €/MW. Uzevši u obzir ove cijene se dolazi do zaključka da DT mora raditi veliki broj sati na visokom opterećenju da bi bila isplativa. Ovo objašnjava najpovoljniju snagu DT oko 10 MW. Pomicanje maksimalnih vrijednosti ulijevo kod visoke cijene toplinske energije se



Slika 57. Odaziv IRR na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na PP



Slika 58. Struktura troškova za referentni slučaj (DT = 12 MW)

objašnjava visokim pogonskim troškovima kotla na prirodni plin. U tom slučaju postaje isplativije imati DT koja radi u baznom režimu, a kotao uz niske investicijske troškove, a visoke pogonske postaje isplativ jer se zbog visoke cijene toplinske energije mogu opravdati visoki pogonski troškovi.

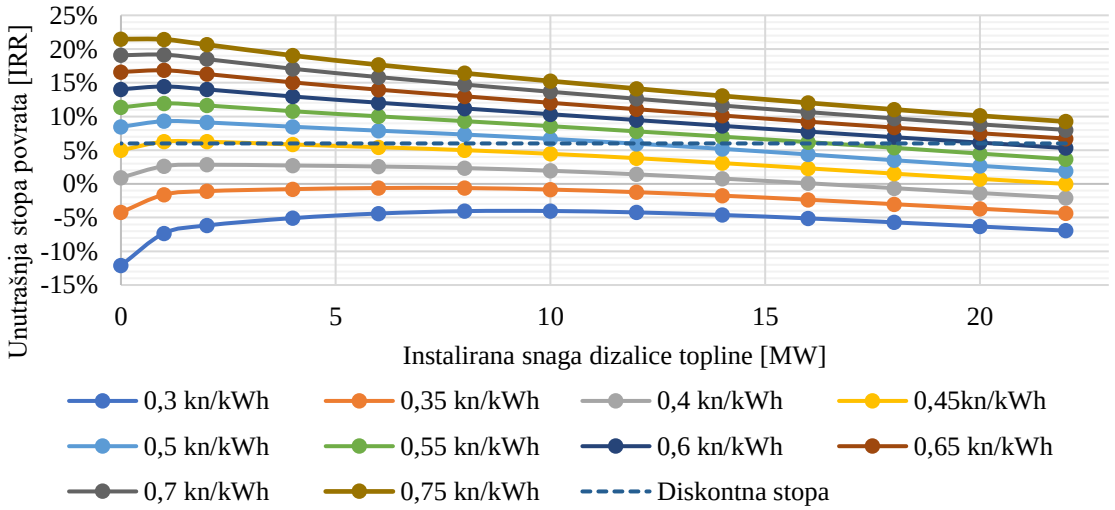
U ovom scenariju je najniža cijena toplinske energije za koju se dobiva dovoljno visoka unutrašnja stopa povrata je između 0,55 i 0,6 kn/kWh što je niže u odnosu na prijašnje scenarije, ali ipak bitno više od cijene u CTS-u grada Zagreba. Za održavanje IRR iznad 6% kod cijene energije 0,3 kn/kWh je potrebno uložiti 64,92 % bespovratnih sredstva.

Tablica 26. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na PP

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij s maksimalnim udjelom DT	
Cijena toplinske energije	0,3	0,6	0,6	kn/kWh
Instalirana snaga DT	12	1	8	MW
Ukupna investicija	165.757.247,41	116.918.537,78	147.997.716,64	kn
IRR	-7,561	9,025	6,1	%
NPV	-110.608.143,6	9.323.746,15	933.870,8	kn
Rok povrata	32,32	8,85	9,32	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	64,92	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.131,8	-244,46	3.778,85	tona/god.

6.7.1. Varijacija scenarija 7. – Kupci sami financiraju toplinske stanice

Ovaj scenarij ima sve iste ulazne i izlazne podatke kao osnovna verzija scenarija 7. Jedina je razlika u modelu financiranja toplinskih podstanica. U ovom slučaju sav trošak toplinskih podstanica preuzimaju kupci. Rezultat je mogućnost ponude niže cijene toplinske energije. Cijena je niža za 0,1 kn/kWh i nalazi se oko 0,45 kn/kWh u usporedbi s 0,5 do 0,55 kn/kWh u osnovnom scenariju.



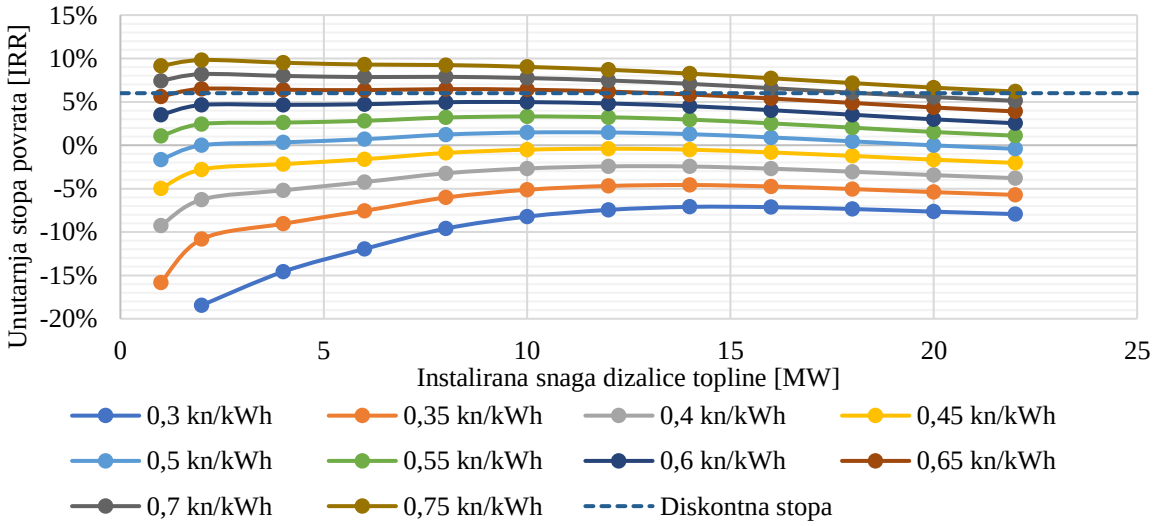
Slika 59. Odaziv IRR na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na PP

Tablica 27. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na PP (bez toplinskih podstanica)

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij s maksimalnim udjelom DT	
Cijena toplinske energije	0,3	0,45	0,45	kn/kWh
Instalirana snaga DT	10	1	2	MW
Ukupna investicija	105.965.935,89	74.886.757,03	79.326.639,72	kn
IRR	-4,0213	6,279	6,275	%
NPV	-57.375.269,74	1.367.735,46	1.419.620,99	kn
Rok povrata	22,84	9,4	9,4	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	52,8	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	4.557,64	-244,46	528,84	tona/god.

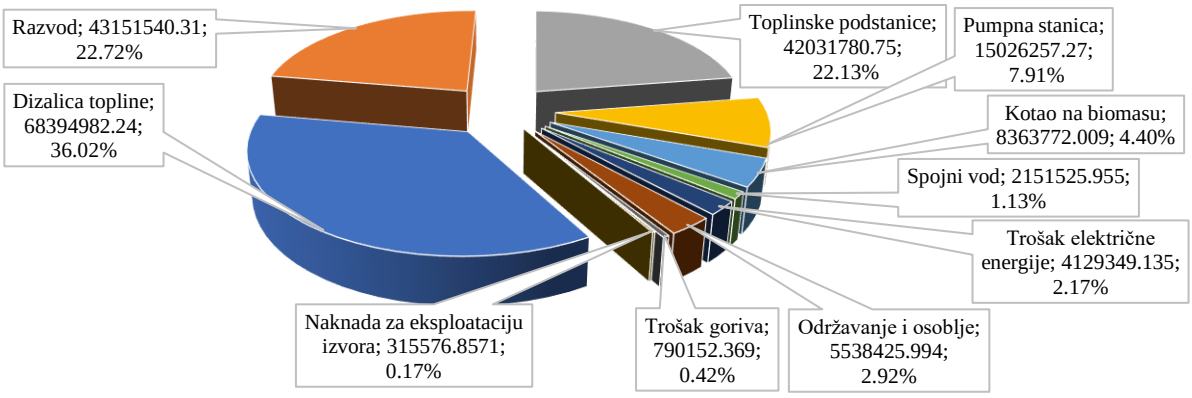
6.8. *Scenarij 8 – Geotermalna dizalica topline u kombinaciji s kotlom na biomasu*

Slika 60. prikazuje utjecaj različitih kombinacija instalirane snage DT i kotla na biomasu na unutrašnju stopu povrata. Iz slike je kao i kod kombinacije s kotlom na prirodni plin vidljiva jednaka pojava. U području nižih cijena toplinske energije je profitabilnije imati veći dio energije opskrbljivan putem dizalice topline, dok se za više cijene toplinske energije bolje isplati imati samo bazni dio (PTV) pokriven od strane dizalice topline. Kotao na biomasu također kao i na prirodni plin ima znatno niži investicijski trošak (Slika 30), a više pogonske troškove od dizalice topline. Ista slika objašnjava i blagu promjenu zakrivljenosti krivulja kod snage dizalice topline manje od 10 MW.



Slika 60. Odaziv IRR-a na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na biomasu

Potrebna prodajna cijena je u ovom slučaju nešto viša, nego kod kombinacije DT i kotla na PP, a kreće se između 0,6 i 0,65 kn/kWh. Slika 61. prikazuje strukturu troškova za ovaj scenarij, a Tablica 28. daje prikaz rezultata tehno-ekonomske analize.



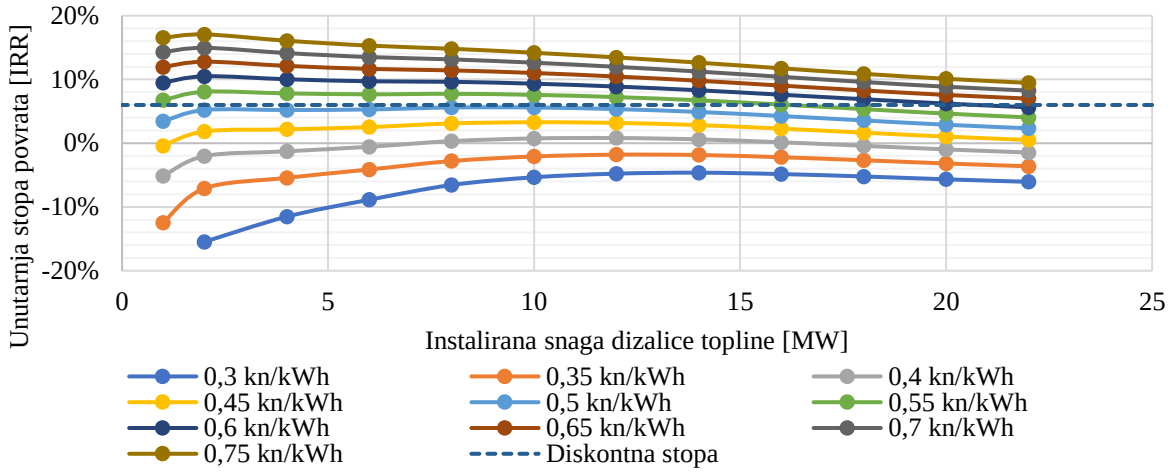
Slika 61. Struktura troškova za referentni scenarij (DT = 14 MW)

Tablica 28. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na biomasu

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij s maksimalnim udjelom DT	
Cijena toplinske energije	0,3	0,65	0,65	kn/kWh
Instalirana snaga DT	14	2	12	MW
Ukupna investicija	179.119.858,53	127.962.761,49	170.124.240,02	kn
IRR	-7,102	6,501	6,188	%
NPV	-117.928.904,35	4.130.467,34	2.037.446,68	kn
Vrijeme povrata investicije	31,79	9,24	9,36	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	65,84	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.997,99	6.802,65	6.059,85	tona/god.

6.8.1. Varijacija scenarija 8. – Kupci sami financiraju toplinske podstanice

Slika 62. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize za kombinaciju dizalice topline i kotla na biomasu uz financiranje ugradnje toplinskih podstanica od strane kupaca. Cijena toplinske energije se kreće ovisno o kombinaciji između 0,5 i 0,55 kn/kWh. Time se može ponuditi 0,1 do 0,15 kn niža cijena u usporedbi s osnovnim scenarijem.



Slika 62. Odaziv IRR-a na cijenu toplinske energije za različite kombinacije DT i kotla na biomasu (bez toplinskih podstanica)

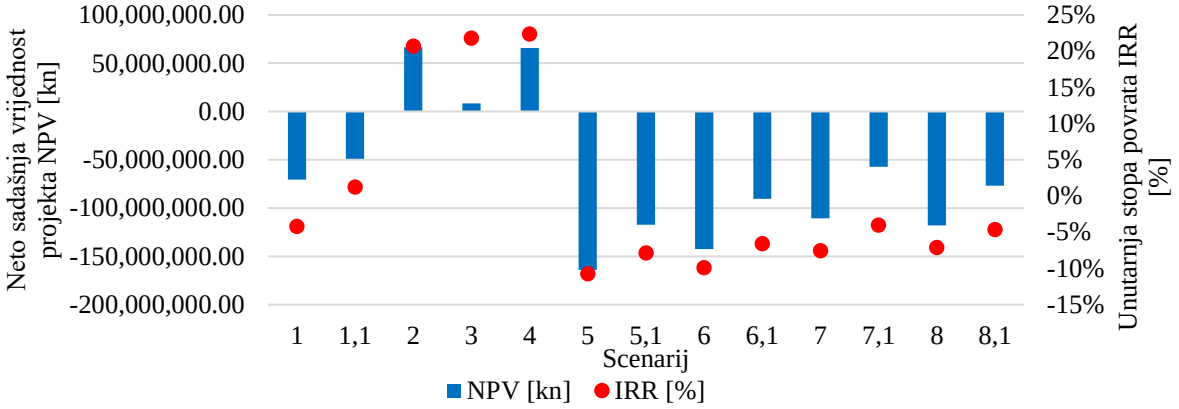
Tablica 29. Rezultati tehno ekonomske analize za slučaj DT + kotao na biomasu (bez toplinskih podstanica)

Veličina	Iznos			Jedinica
	Referentni scenarij	Optimalni scenarij	Optimalni scenarij s maksimalnim udjelom DT	
Cijena toplinske energije	0,3	0,55	0,55	kn/kWh
Instalirana snaga DT	14	2	14	MW
Ukupna investicija	137.088.077,78	85.930.980,74	137.088.077.78	kn
IRR	-4,621	8,076	6,729	%
NPV	-76.821.037,98	11.678.555,24	6.380.510,86	kn
Rok povrata investicije	23,85	8,322	8,974	Godina
Potreban udio nepovratnih sredstva za NPV=0	56,04	-	-	%
Ušteda emisija CO_2 u odnosu na korištenje zasebnih kotlova na prirodni plin	5.997,99	6.802,65	5.997,99	tona/god.

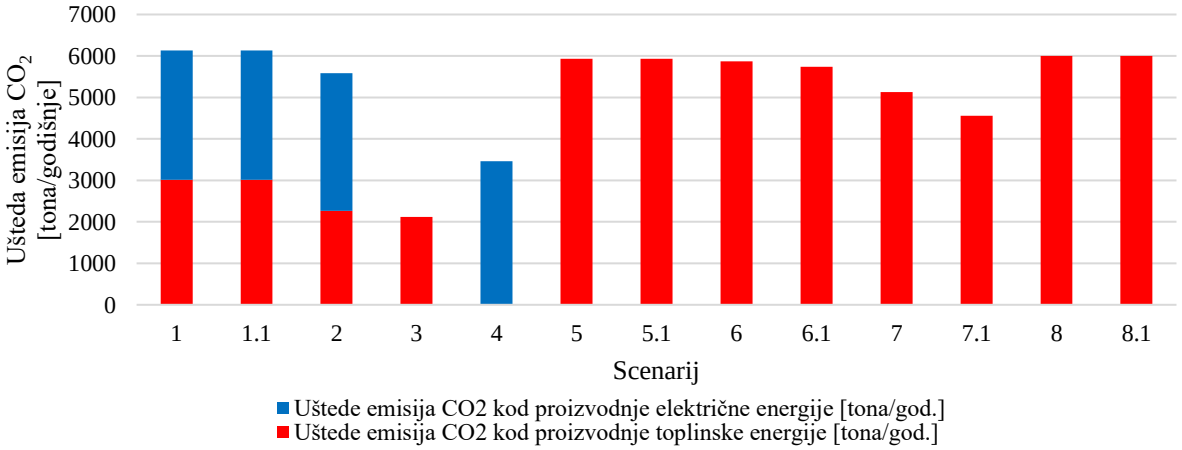
6.9. Usporedba rezultata tehno – ekonomske analize

Slika 63. prikazuje unutarnju stopu povrata i neto sadašnju vrijednost projekta za sve scenarije za slučaj optimalne varijante uz referentnu cijenu toplinske energije. Uštedu emisija CO_2 prikazuje Slika 64, a odnos referentnih i potrebnih cijena toplinske energije te udio nepovratnih sredstva prikazuje Slika 65. Svakom scenariju je dodijeljen broj putem kojeg je isti prikazan u navedenim dijagramima. Legendu s opisom scenarija sadrži Tablica 30. Vidljivo je da najbolje rezultate daju scenariji izgradnje ORC postrojenja, ORC i CTS prema Karlovcu te CTS prema gradu Karlovcu. Najbolje rezultate u smislu smanjenja emisija daje slučaj izgradnje ORC postrojenja i novog CTS-a u naseljima Rečica i Luka Pokupska. Potrebno je napomenuti da sveukupno najveće smanjenje emisija daje scenarij izgradnje ORC postrojenja i spoja na CTS

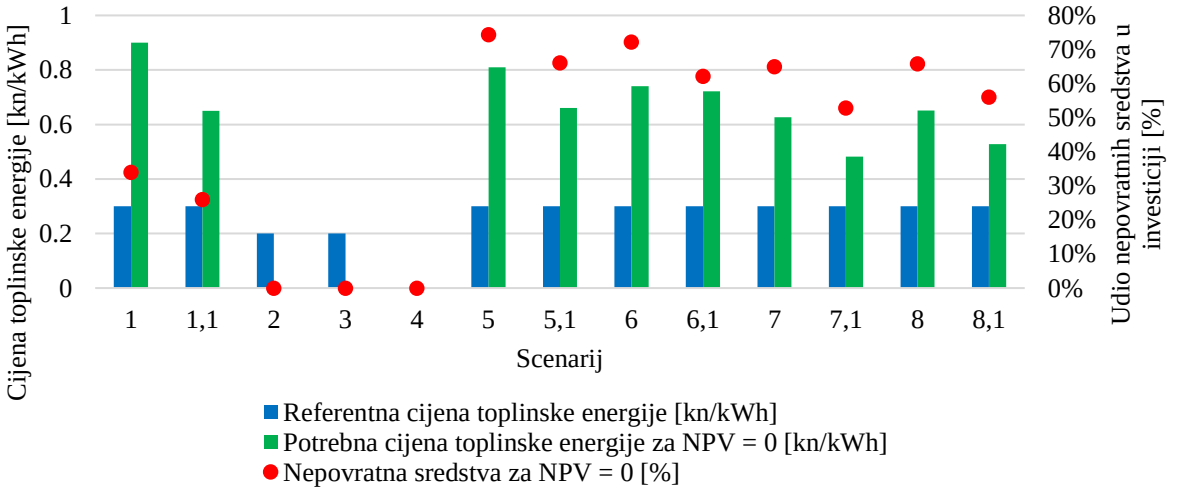
grada Karlovaca za nazivnu snagu toplovoda 10,32 MW s iznosom 10.232,03 tona godišnje. Taj scenarij nije ovdje prikazan jer s ekonomske strane nije najpovoljnija varijanta. Kod scenarija koji uključuju izgradnju CTS-a je potrebno ponuditi višestruko više cijene toplinske energije, ali postoji opasnost da kupci ne pristanu na te cijene te se ne spoje na CTS. To se može izbjeći korištenjem nepovratnih sredstva kao što prikazuje Slika 65.



Slika 63. Prikaz IRR-a i NPV-a



Slika 64. Prikaz uštede emisija CO_2 po pojedinim scenarijima



Slika 65. Prikaz referentnih cijena toplinske energije, potrebnih cijena te potreban udio nepovratnih sredstva

Tablica 30. Opis scenarija

Scenarij	Opis	Tehnologija i snaga
1	ORC + novi CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska	ORC 1.996 kW + CTS 11,95 MW
1.1	ORC + novi CTS u naseljima Rečica i Luka Pokupska (kupci financiraju toplinske podstanice)	ORC 1.996 kW + CTS 11,95 MW
2	ORC + spoj na CTS grada Karlovca	ORC 1.984,82 kW + CTS 2 MW
3	Izgradnja spojnog voda i opskrba CTS-a u gradu Karlovcu	CTS 2 MW
4	ORC postrojenje na lokaciji Rečica	ORC 2 MW
5	Novi CTS baziran na geotermalnoj dizalici topline na lokaciji Lanište	DT 23,18 MW
5,1	Novi CTS baziran na geotermalnoj dizalici topline na lokaciji Lanište (kupci financiraju toplinske podstanice)	DT 23,18 MW
6	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla s električnim grijačem na lokaciji Lanište	DT 18 MW + električni grijač 5,18 MW
6,1	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla s električnim grijačem na lokaciji Lanište (kupci financiraju toplinske podstanice)	DR 16 MW + električni grijač 7,18 MW
7	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin na lokaciji Lanište	DT 12 MW + kotao na prirodni plin 11,18 MW
7,1	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla na prirodni plin na lokaciji Lanište (kupci financiraju toplinske podstanice)	DT 10 MW + kotao na prirodni plin 13,18 MW
8	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu na lokaciji Lanište	DT 14 MW + kotao na biomasu 9,18 MW
8,1	Novi CTS baziran na kombinaciji geotermalne dizalice topline i kotla na biomasu na lokaciji Lanište (kupci financiraju toplinske podstanice)	DT 14 MW + kotao na biomasu 9,18 MW

7. ZAKLJUČAK

Korištenjem geotermalne energije u kombinaciji s CTS-om se mogu postići znatna smanjenja emisija CO_2. Kombinacija vrlo povoljnih poticajnih cijena električne energije iz geotermalnih postrojenja i veliki broj poznatih i potencijalnih geotermalnih nalazišta u hrvatskoj čini ovu tehnologiju vrlo primamljivom i sa investicijske strane.

U ovom radu su obrađene dvije lokacije i nekoliko varijanta rješenja primjene geotermalne energije u CTS-u. Najbolje rezultate daju scenariji na lokaciji Rečica. Projekt izgradnje ORC-a, ORC-a te spoja na grad Karlovac i projekt samo spoja na CTS grada Karlovca ostvaruju IRR iznad 20 % za optimalnu kombinaciju. Razlog visoke profitabilnosti ovih projekata je kombinacija visokih poticajnih cijena električne energije i činjenice da su bušotine već izrađene. Najbolje rezultate daje scenarij izgradnje binarnog ORC postrojenja na lokaciji Rečica sa IRR-om u iznosu 22,395 %. Najveći iznos IRR-a daje slučaj izgradnje spojnog voda do grada Karlovca sa IRR-om do vrijednosti od 27,45 % za cijenu 0,2 kn/kWh. Taj iznos se dobiva za slučaj snage 1 MW. Razlog iz kojeg ovaj podatak nije prikazan u Slika 63. je zbog činjenice da je ta snaga ispod snage potrebne za pokrivanje PTV pa samim time kotlovi na prirodni plin moraju svejedno raditi čime projekt gubi smisao. Projekti na lokaciji „Lanište“ nisu profitabilni unutar 15 godina s referentnom cijenom toplinske energije u iznosu 0,3 kn/kWh, ali mogu biti uz korištenje nepovratnih sredstva u iznosu od 52,8 do 74,36 % ovisno o scenariju. Tražena unutarnja stopa povrata se može postići i povećanjem cijene toplinske energije na 0,45 do 0,81 kn/kWh. što je znatno viša cijena od referentne cijene. U tom slučaju postoji opasnost da se kupci ne žele priključiti na CTS. Najbolje rezultate daje scenarij kombinacije dizalice topline i kotla na prirodni plin za slučaj da kupci sami financiraju toplinske stanice. Taj scenarij daje IRR u iznosu od -4,0213 %, a istovjetni scenarij s kombinacijom dizalice topline i kotla na biomasu daje nešto manji IRR u iznosu od -4,621 %. Slučaj primjene samo dizalice topline je najnepovoljniji te zahtjeva najveći iznos nepovratnih sredstva. Svi scenariji na lokaciji Lanište se također mogu poboljšati podjelom troškova izgradnje CTS-a s krajnjim kupcima tako da oni financiraju ugradnju toplinskih stanica.

LITERATURA

[1] Moya D., Aldásd C., Kaparaju P., Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications, 2018, poveznica: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304830 (pristupljeno 23.1.2019.)

[2] Geothermal Energy Utilisation Potential in Croatia, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2017. http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2017/07/Geothermal-Energy-Utilisation-Potential-in-Croatia-final-report.pdf (pristupljeno 28.1.2019.)

[3] Gupta H, Roy S, Geothermal Energy, An Alternative Resource for the 21st Century, 2007, https://www.sciencedirect.com/book/9780444528759/geothermal-energy (pristupljeno 15.10.2018.)

[4] Pavičević M., Novosel T., Pukšec T., Duić N., Hourly optimization and sizing of district heating systems considering building refurbishment, Case study for the city of Zagreb, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lucića 5, 10000, Zagreb, Croatia, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217311027 (pristupljeno 29.1.2019.)

[5] Herfurth S., Kuhn D., Wiemer H.- J, Performance Optimization of ORC Power Plants, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/26045.pdf (pristupljeno 23.1.2019.)

[6] Arpagaus C., Bless F., Uhlmann M., Schiffmann J., Bertsch S. S., High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, NTB University of Applied Sciences of Technology Buchs, Institute for Energy Systems, Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Switzerland, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218305759 (pristupljeno 25.1.2019.)

[7] Hrvatska energetska tranzicija, RESFLEX projekt, GIS karta, http://het.hr/gis-karta/ (pristupljeno 26.1.2019.)

[8] Vidak, Kitarević, Vuleta, Kedmenec, Šunjo, Abrashi, Plan razvoja centralnih toplinskih sustava na području grada Karlovca, Konačno izvješće, Zagreb, svibanj 2015., https://www.karlovac.hr/UserDocsImages/dokumenti/Clanci/I-07-0374_GRAKAR_Plan_razvoja_CTS_KI.pdf (pristupljeno 29.1.2019.)

[9] Walraven D., Laenen B., D'haeseleer W., Minimizing the levelized cost of electricity production from low- temperature geothermal heat sources with ORCs: Water or air cooled?, University of Leuven (KU Leuven) Energy Institute, 2015, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191401335X (pristupljeno 29.1.2019.)

[10] Technology data, Danska energetska agencija, https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data (pristupljeno 29.1.2019.)

[11] Analiza sektora toplinarstva i iskorištavanja potencijala geotermalnih izvora na području Urbane aglomeracije Zagreb, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, studeni 2017. https://www.zagreb.hr/UserDocsImages/arhiva/strategijsko_planiranje/ANALIZA%20SEKTORA%20TOPLINARSTVA-UAZ-Studija.pdf (pristupljeno 15.11.2018.)

[12] Dincer I., Ezzat F. M., Geothermal Energy Production, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, ON, Canada, 2018, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128095973003138 (pristupljeno 20.11.2018.)

[13] Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016.–2030., Ministarstvo gospodarstva, Studeni 2015., https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/croatia_report_eed_art_141update_hr.pdf (pristupljeno 23.11.2018.)

[14] Santos, Diez, Asensio, District Heating and Cooling Networks in the European Union, https://www.springer.com/gp/book/9783319579511 (pristupljeno 18.11.2018.)

[15] Izvještaj o CTS-u, Europska Komisija, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/s9_-_district_heating_-_final_report_0.pdf (pristupljeno 25.1.2019.)

[16] Web stranica proizvođača opreme Turboden, https://www.turboden.com/press/press-releases/2280/turboden-completed-the-commissioning-of-the-175-mwe-velika-ciglena-geothermal-plant (pristupljeno 13.11.2018.)

[17] Meteonorm https://meteonorm.com/ (pristupljeno 11.11.2018.)

[18] Mermoud F., Haroutunian A., Faessler J., Lachal B., Impact of load variations on wood boiler efficiency and emissions, https://www.unige.ch/sphn/Publications/ArchivesSciences/AdS%202004-2015/AdS%202015%20Vol%2068%20Fasc%201/027_038_Mermoud_68-1.pdf

[19] Međimurska energetska agencija, https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/6-geotermalna.pdf (pristupljeno 10.2.2019.)

[20] Geothermal energy use in europe, Beata Kępińska, University of Science and Technology, Kraków, https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-30-ann/UNU-GTP-30-40.pdf (pristupljeno 10.1.2019.)

[21] Sigfusson B., Uihelein A., Geothermal energy status report, 2015, http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC93338/jrc%20geothermal%20report_final.pdf (pristupljeno 9.11.2018.)

[22] Guzović, Majcen, Geotermalna elektrana na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak, http://repozitorij.fsb.hr/4504/1/Guzovic_Majcen_rad.pdf (pristupljeno 12.11.2018.)

[23] ISOPLUS katalog predizoliranih cijevi, http://www.isoplus-pipes.com/fileadmin/data/downloads/documents/germany/products/Doppelrohr-8-Seiten_ENGLISCH_Web.pdf (pristupljeno 17.11.2018.)

[24] Sustav tržišne premije, https://www.hgk.hr/documents/zakon-i-pravilnik-oieivuk-bioplin57c955f37ff7c.pdf (pristupljeno 15.1.2019.)

[25] Poticajne cijene za proizvodnju električne energije iz OIE, HROTE, https://files.hrote.hr/files/PDF/HR_OIE_2_Novi_TS.pdf (pristupljeno 6.2.2019.)

[26] Turboden ORC, Mitshubishi heavy industries, http://www.all-energy.co.uk/__novadocuments/228226?v=635943384058330000 (pristupljeno (13.11.2018.)

[27] Interaktivna karta o geotermalnim CTS-ovima, https://map.mbfsz.gov.hu/geo_DH/ (pristupljeno 18.11.2018.)

[28] Geothermal energy in Europe—recent market development and technology trends, B. Sanner, 2017, https://www.geoener.es/pdf/ponencias2017/00_Geothermal_energy_in_Europe_recent_market_development_and_technology_trends_BURKHARD_SANNER_fenercom-2017.pdf (pristupljeno 18.11.2018.)

[29] EGEC geothermal market report, 2017, https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-29048-chaleur-geothermie-reseau-installations-individuelles-egec-2016.pdf (pristupljeno 22.12.2018.)

[30] Duić N., Dović D., Krajačić G., Pukšec T., Novosel T., Izrada lokalnog plana za razvoj toplinskih sustava u općini Topusko, Kolovoz, 2016., http://stratego-project.eu/wp-content/uploads/2016/11/HR-Maping-local-heat-cooling-Topusko.pdf (pristupljeno 21.12.018.)

[31] Google karte, https://www.google.hr/maps/@45.5298469,15.6733073,14z

[32] Condensing boilers in practice, Bannister P., https://www.automaticheating.com.au/condensing-boilers-in-practice-dr-paul-bannister/ (pristupljeno 12.12.2018.)

[33] Santosa A. C., Asensioa E. R., Diez D. B., Blanes-Peiró J. J., District heating and cogeneration in the EU-28: Current situation, potential and proposed energy strategy for its generalisation, 2016, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301149 (pristupljeno 10.2.2019.)

[34] Koncentracija CO_2 u atmosferi, NASA, 2013, https://climate.nasa.gov/news/916/for-first-time-earths-single-day-co2-tops-400-ppm/ (pristupljeno 11.1.2019.)

[35] Ritchie H., Roser M., CO_2 and other Greenhouse Gas Emissions, 2017, https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions (pristupljeno 25.1.2019)

[36] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814000905 (pristupljeno 25.1.2019.)

[37] Katalog predizoliranih cijevi, Set, https://set.is/wp-content/uploads/2016/10/SET-District-heating-pipes-b%C3%A6kl.pdf (pristupljeno 31.1.2019.)

[38] Pravilnik o izračunu naknade za korištenje geotermalnih izvora, Vlada Republike Hrvatske, 5.3.2014., http://www.propisi.hr/print.php?id=9922 (pristupljeno 2.2.2019.)

[39] Cjenik usluge opskrbe električnom energijom, HEP-Elektra, http://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578 (pristupljeno 31.1.2019.)

[40] Cjenik usluge opskrbe gradskim plinom, Plinara Zagreb, http://www.gpz-opskrba.hr/zagreb-javna-usluga-opskrbe-plinom-cijene-plina-od-01-01-2018-do-31-12-2018/247 (pristupljeno 31.1.2019.)

[41] Podaci o tarifnim modelima, Gradska plinara Zagreb, http://www.plinara-zagreb.hr/izvjestaji-i-dokumenti/tarifne-stavke-za-distribuciju-plina/92 (pristupljeno 31.1.2019.)

[42] Uredba o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljvih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija, Vlada Republike Hrvatske (pristupljeno 20.1.2019.)

[43] Dorotić H., Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016, http://repozitorij.fsb.hr/6197/1/Doroti%C4%87_2016_diplomski.pdf (pristupljeno 20.12.2018.)

[44] Francescato V., Antonini E., Priručnik o gorivima iz drvne biomase, Sveučilište u Padovi, 2008, http://regea.org/wp-content/uploads/2018/05/Priru%C4%8Dnik-o-gorivima-iz-drvne-biomase-o%C5%BEujak-2012..pdf (pristupljeno 8.2.2019.)

[45] Rutz D., Doczekal C., Zweiler R., Hofmeister M., Laurberg Jensen L., Mali modularni obnovljivi centralizirani toplinski i rashladni sustavi – Priručnik, München, Njemačka, 2017, https://www.coolheating.eu/images/downloads/D4.1_Handbook_HR.pdf (pristupljeno 8.2.2019.)

[46] Lukawski M. Z., Anderson B. J., Augustine C., Capuano Jr.L. E., Beckers K. F., Livesay B., Tester J. W., Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling, 2014., https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410514000813 (pristupljeno 8.2.2019.)

[47] Specifični iznos oslobođenog CO_2 kod izgaranja pojedinih goriva, https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html (pristupljeno 9.2.2019.)

[48] Specifične emisije CO_2 u proizvodnji električne energije, European Environment Agency, https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22Croatia%22%3B%22European%20Union%20(current%20composition)%22%5D%7D%7D (pristupljeno 9.2.2019.)

[49] Gao L., Cui X., Ni J., Lei W., Huang T., Bai C., Yang J., Technologies in Smart District Heating System, Tianjin University, China, 12. 2017., https://ac.els-cdn.com/S1876610217363270/1-s2.0-S1876610217363270-main.pdf?_tid=26384ece-fa9b-4ac5-879b-e4a77cb74d8f&acdnat=1549731812_a4c4967b00444632ec858f7078c1aa6e (pristupljeno 8.2.2019.)

[50] Gasser L., Flück S., Kleingries M., Meier C., Bätschmann M., Wellig B., High efficiency heat pumps for low temperature lift applications, Lucerne University of Applied Sciences and Arts, Switzerland, 2017, http://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/O.1.4.5-High-efficiency-heat-pumps-for-low-temperature-lift-applications.pdf (pristupljeno 11.2.2019.)

PRILOZI

I. CD-R disc