

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Hrvoje Dorotić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Dorotić

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Hrvoje Dorotić** Mat. br.: 0035181430

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza implementacije centraliziranog sustava grijanja na biomasu na primjeru grada Ogulina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of the implementation of a biomass district heating system in the City of Ogulin**

Opis zadatka:

Visokoučinkovita kogeneracija i centralizirani sustavi grijanja i hlađenja imaju znatan potencijal za uštedu primarne energije koji je u velikoj mjeri neiskorišten u EU. Centralizirani toplinski sustavi imaju veliku važnost u kontekstu planiranja budućih energetske sustava jer omogućavaju fleksibilnije vođenje te veću implementaciju obnovljivih izvora energije, integracijom elektroenergetskog sustava i sektora toplinarstva, korištenjem dizalica topline i toplinskih spremnika. Prelazak na moderne sustave centraliziranog grijanja četvrte generacije, također omogućuje integraciju znatno veće količine otpadne topline i obnovljivih izvora toplinske energije poput solarne i geotermalne energije.

U sklopu ovog rada će se:

1. Napraviti pregled literature po pitanju primjene centraliziranih toplinskih sustava u EU i potencijalu njihove primjene u Republici Hrvatskoj, s naglaskom na primjenu biomase te integracije elektroenergetskog sustava i sektora toplinarstva uvođenjem četvrte generacije centraliziranih sustava grijanja i hlađenja;
2. Prikupiti, izračunati i mapirati potrebe za toplinskom energijom u gradu Ogulinu te na temelju tih podataka predložiti tri alternativne distribucije toplinske mreže;
3. Odrediti potreban kapacitet proizvodnih pogona centraliziranog sustava za zadovoljavanje potreba korisnika za predložene alternative distribucije;
4. Predložiti alternative proizvodnje toplinske energije za centralizirani sustav, uključujući kombinaciju biomase, solarne energiju te dizalica topline u kombinaciji s odgovarajućim toplinskim spremnikom;
5. Izraditi tehno-ekonomsku analizu predloženih alternativa.

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

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

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

Zahvaljujem se svojem mentoru, profesoru Nevenu Duiću na pruženoj prilici za izradu ovog diplomskog rada. Velika zahvala i asistentu Tomislavu Novoselu na stručnim savjetima i pomoći bez kojih izrada ovoga rada ne bi bila moguća. Također se zahvaljujem Matiji Pavičeviću koji mi je pomogao oko pitanja vezanih za optimizacijski kod.

Dodatne zahvale idu djelatnicima REGEA-e: Karlu Rajiću, koji mi je pomogao pri mapiranju potreba u gradu Ogulinu i Hrvoju Marasu, koji mi je svojim savjetima pružio pomoć u izradi tehno-ekonomske analize.

Zahvaljujem se i svojim prijateljima, kolegama, obitelji i djevojci Maji koji su mi davali podršku za vrijeme pisanja ovoga rada. Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima bez čije potpore i razumijevanja ne bih mogao ostvariti sve svoje ciljeve.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	X
1. UVOD	1
1.1. Pariški sporazum i odgovornost Europske unije	1
1.2. Korištenje CTS-a s ciljem povećanja energetske učinkovitosti	3
2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI.....	6
2.1. Definicija i karakteristike CTS-a.....	6
2.2. Razvoj CTS-a	7
2.3. Četvrta generacija CTS-a.....	10
2.4. CTS u EU.....	11
2.5. CTS u Hrvatskoj	12
3. OPIS ZADATKA I ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA	14
3.1. Opis zadatka	14
3.2. Analiza postojećeg stanja	14
4. MAPIRANJE POTREBA	16
4.1. Mapiranje potreba za toplinskom energijom	16
4.2. Izgradnja distribucijske mreže	18
5. MATEMATIČKI MODEL OPTIMIZACIJE	24
5.1. Opis optimizacije	24
5.2. Funkcija cilja	24
5.3. Modeliranje toplinskog spremnika	25
5.4. Modeliranje dizalice topline	27
5.5. Modeliranje kotla na biomasu	27
6. SCENARIJSKA ANALIZA	29
6.1. Opis podataka potrebnih za scenarijsku analizu	29
6.1.1. Satno toplinsko opterećenje	29
6.1.2. Određivanje minimalne i maksimalne snage kotla na biomasu	32
6.1.3. Određivanje maksimalne snage dizalice topline	32
6.1.4. Kapacitet toplinskog spremnika	33
6.1.5. Modeliranje proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora.....	33

6.2.	Opisi scenarija	39
6.2.1.	Scenarij 1 – kotao na biomasu u kombinaciji s toplinskim spremnikom.....	39
6.2.2.	Scenarij 2 – kotao na biomasu i dizalica topline u kombinaciji s toplinskim spremnikom.....	40
6.2.3.	Scenarij 3 – kotao na biomasu i dizalica topline u kombinaciji s toplinskim spremnikom i solarnim kolektorima	40
6.3.	Podaci vezani za cijene.....	43
6.3.1.	Cijena električne energije.....	43
6.3.2.	Cijena biomase	43
6.3.3.	Investicijska cijena toplinskog spremnika.....	44
6.4.	Podaci vezani za tehno-ekonomsku analizu	46
6.4.1.	Instalirana snaga kotla na biomasu.....	47
6.4.2.	Instalirana snaga dizalice topline, kapacitet toplinskog spremnika i solarnih kolektora.....	49
7.	REZULTATI.....	50
7.1.	Scenarij 1 – kotao na biomasu i toplinski spremnik.....	50
7.2.	Scenarij 2 – kotao na biomasu, dizalica topline i toplinski spremnik	54
7.3.	Scenarij 3 – kotao na biomasu uz dizalicu topline, solarne kolektore i toplinski spremnik.....	61
8.	ZAKLJUČAK	68
	ZAHVALA.....	70
	REFERENCE	71
	PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 1. Udio energenata za grijanje i hlađenje za EU 28 [15]	3
Slika 2. Udio energenata za grijanje i hlađenje, pojedinačno za članice EU 28 [15]	3
Slika 3. Energetska bilanca EU kroz tri faze potrošnje – primarna, finalna i korisna energija za 2010. [16]	4
Slika 4. Razvoj CTS-a kroz povijest, od 1. do 4. generacije [20]	9
Slika 5. Postotak populacije EU-28 koji koristi CTS [16]	11
Slika 6. Udio nositelja energije u CTS-u EU za 2012. [16]	12
Slika 7. Prikaz svih toplinarskih sustava u Republici Hrvatskoj [25]	13
Slika 8. Udio pojedinog energenta u sektoru zgradarstva [32]	15
Slika 9. Prikaz i smještaj objekata (plavo), postojećih kotlovnica (narančasti kvadrati) i lokacije za planiranu novu kotlovnicu (crveni krug).....	17
Slika 10. Verzija 1 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda	21
Slika 11. Verzija 2 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda	22
Slika 12. Verzija 3 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda	23
Slika 13. Srednje vanjske temperature u gradu Ogulinu, sezona grijanja [37]	30
Slika 14. Relativno toplinsko opterećenje.....	31
Slika 15. Ilustracija direktnog, difuznog i reflektiranog zračenja [42]	34
Slika 16. Pojašnjenje kutova vezanih za izračun direktnog zračenja na plohu pod određenim nagibom [42]	35
Slika 17. Azimut Sunca za grad Ogulin	36
Slika 18. Elevacija Sunca za grad Ogulin	36
Slika 19. Prikaz učinkovitosti kolektora (zeleno), toplinskih gubitaka (crveno) i optičkih gubitaka (plavo) s ovisnošću srednje temperaturne razlike radnog medija i zraka [30]	38
Slika 20. Satna distribucija specifične efektivne toplinske snage solarnog kolektora	39
Slika 21. Predložene zemljane površine za postavljanje solarnih kolektora	42
Slika 22. Cijene električne energije [47]	43
Slika 23. Aproksimacija specifičnih cijena sezonskog toplinskog spremnika.....	45
Slika 24. Aproksimacija specifičnih cijena dnevnog toplinskog spremnika.....	45
Slika 25. Aproksimacija nazivnog promjera u ovisnosti o toplinskom učinku.....	48
Slika 26. Aproksimacija gubitaka u distribucijskoj mreži ovisno o nazivnom promjeru	48
Slika 27. Specifična cijena kotla na biomasu	49
Slika 28. Satna raspodjela kotla na biomasu, distribucijska verzija 1, Scenarij 1.....	52
Slika 29. Dobavna snaga kotla za distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1, raspored prema snazi i broju sati.....	52
Slika 30. Napunjenost spremnika za distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1	52
Slika 31. Udio pojedinog dijela CTS – a u ukupnoj investiciji za Distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1	53
Slika 32. Analiza osjetljivost za Verziju 1 distribucijskog sustava Scenarija 1	53
Slika 33. Odnos instalirane snage i kapaciteta toplinskog spremnika za Scenarij 2.....	55
Slika 34. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 120% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	56
Slika 35. Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 120% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	56
Slika 36. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 85% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	57

Slika 37. . Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 85% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	57
Slika 38. Relativna cijena i IRR u odnosu na omjer instalirane snage i vršnog toplinskog opterećenja, Scenarij 2	58
Slika 39. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 90% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	59
Slika 40. Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 90% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja.....	59
Slika 41. Udio pojedinog dijela CTS u ukupnoj investiciji i godišnjim troškovima	60
Slika 42. Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 Kombinaciju 2	60
Slika 43. Prikaz rada kotla i dizalice topline za Scenarij 3, Kombinaciju 1	63
Slika 44. Prikaz rada spremnika topline za Scenarij 3, Kombinaciju 1	63
Slika 45. Prikaz rada kotla i dizalice topline za Scenarij 3, Kombinaciju 4	64
Slika 46. Prikaz rada spremnika topline za Scenarij 3, Kombinaciju 4	64
Slika 47. Raspodjela investicijskih troškova i godišnjih troškova, Scenarij 3, Kombinacija 1	66
Slika 48. Analiza osjetljivosti, Scenarij 3, Kombinacija 1	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Potrošnja toplinske energije u zgradarstvu [32]	15
Tablica 2. Podaci o CTS-u grada Ogulina [24]	15
Tablica 3. Podaci o potrošačima budućeg CTS – a grada Ogulina	16
Tablica 4. Podaci korišteni za proračun nazivnog promjera toplovoda i priključaka [34]	19
Tablica 5. Ukupan broj i raspored priključaka prema nazivnim promjerima DN.....	19
Tablica 6. Podaci o verzijama distribucijskog sustava.....	20
Tablica 7. Podaci o duljini distribucijskih mreža	20
Tablica 8. Maksimalno i minimalno toplinsko opterećenje po verzijama distribucijskog sustava	31
Tablica 9. Optimalni kut nagiba i azimuta za kolektor postavljen u Ogulinu	33
Tablica 10. Okvirne vrijednosti za različite vrste solarnih kolektora [30].....	37
Tablica 11. Parametri korišteni pri računanju satne distribucije korisne toplinske snage solarnog kolektora	38
Tablica 12. Opisi scenarija	39
Tablica 13. Scenarij 1 – minimalna i maksimalna dostavna snaga kotla	40
Tablica 14. Verzije Scenarija 2	40
Tablica 15. Verzije Scenarija 3 – različiti udjeli proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora.....	41
Tablica 16. Podaci o dostupnim površinama za postavljanje solarnih kolektora.....	43
Tablica 17. Zbirni podaci o cijenama energenata [35, 47, 48]	44
Tablica 18. Cijene i parametri potrebni za tehno-ekonomsku analizu	46
Tablica 19. Podaci vezani za kredit.....	47
Tablica 20. Prikaz distribucijskih gubitaka, [34]	47
Tablica 21. Toplinski gubici u distribuciji	48
Tablica 22. Specifične investicijske cijene za dizalice topline i solarne kolektore.....	49
Tablica 23. Rezultati optimizacije za Scenarij 1	50
Tablica 24. Rezultati tehno-ekonomske analize za Scenarij 1	51
Tablica 25. Ulazni parametri snage postrojenja za Scenarij 2	54
Tablica 26. Rezultati optimizacije veličine spremnika za Scenarij 1	54
Tablica 27. Rezultati tehno-ekonomske analize, Scenarij 2.....	58
Tablica 28. Ulazni podaci potrebni za optimizaciju rada sustava za Scenarij 3	61
Tablica 29. Potrebne površine krovova i zemljišta za svaku od kombinacija Scenarija 3	62
Tablica 30. Rezultati tehno-ekonomske analize, Scenarij 3.....	65

POPIS KRATICA

Naziv kratice	Puni naziv
BDP	Bruto društveni prihod
CCS	Sustavi hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida
CHP	Kogeneracija
CMA	Sastajanje članica Pariškog sporazuma
CO ₂	Ugljikov dioksid
COP	Konferencija stranaka
CP	Ciklopentan
CTS	Centralizirani toplinski sustavi
DT	Dizalica topline
EEX	Europska burza električne energije
ETC	Solarni kolektori s vakumskom cijevi
EU	Europska unija
FPC	Solarni pločasti kolektori
GIS	Geografski informacijski sustav
HBOR	Hrvatska banka za obnovu i razvoj
HEP	Hrvatska elektroprivreda
INDC	Planirani nacionalno utvrđeni doprinosi
IRR	Unutarnja stopa povrata
NO _x	Dušikovi oksidi
NPV	Neto sadašnja vrijednost
NZEB	Zgrade skoro nulte emisije
OIE	Obnovljivi izvori energije
ORC	Organski Rankinov ciklus
PEHD	Polietilen visoke gustoće
PP	Period povrata
PTV	Potrošna topla voda
PUR	Poliuretan
REGEA	Regionalna energetska agencija
SDH	Solarni centralizirani toplinski sustavi
SEAP	Akcijski plan energetske održivog razvitka

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
\dot{m}_{voda}	kg/s	Masni protok vode
A_{kol}	m ²	Korisna površina kolektora
A_{krov}	m ²	Ukupna površina krovova objekata
$A_{zemljište}$	m ²	Ukupna površina zemljišta
$G_{dif,\beta}$	W/m ²	Difuzno zračenje za kut nagiba β
G_{dif}	W/m ²	Difuzno horizontalno zračenje
$G_{dir,\beta}$	W/m ²	Direktno zračenje za kut nagiba β
G_{dir}	W/m ²	Direktno horizontalno zračenje
G_{distr}	MW	Gubici distribucijskog sustava
$G_{glob,\beta}$	W/m ²	Globalno zračenje za kut nagiba β
G_{glob}	W/m ²	Globalno horizontalno zračenje
$G_{ref,\beta}$	W/m ²	Reflektirano zračenje za kut nagiba β
$I_{spremnik}$	€	Investicijski trošak u toplinski spremnik
P_{kol}	W	Ukupna efektivna toplinska snaga kolektora
P_{topl}	W	Toplinski učinak
Q_{max_ulaz}	MWh	Maksimalna moguća energija pohranjena u toplinski spremnik u jednom vremenskom trenutku
$Q_{DT,max}$	MW	Instalirana snaga DT
$Q_{DT}(t)$	MWh	Proizvodnja toplinske energije iz dizalice topline u vremenskom trenutku t
Q_{god}	MWh	Godišnja potrošnja toplinske energije
$Q_{kotao,max}$	MW	Maksimalna dostavna snaga kotla
$Q_{kotao,min}$	MW	Minimalna dostavna toplinska snaga kotla
$Q_{kotao}(t)$	MWh	Proizvodnja toplinske energije iz kotla u vremenskom trenutku t
$Q_{potr,max}$	MWh	Maksimalno toplinsko opterećenje
$Q_{potr,min}$	MWh	Minimalno toplinsko opterećenje
$Q_{potr.}(T_{vanjska}, t)$	MWh	Potražnja za toplinskom energijom u trenutku t
$Q_{ulaz}(t)$	MWh	Proizvodnja toplinske energije iz svih u vremenskom trenutku t
$Q_{ulaz}(t)$	MWh	Ukupna proizvodnja toplinske energije u trenutku t
R_d	-	Omjer difuznog zračenja na nagnutu površinu i difuznog zračenja na horizontalnu površinu
$S_{kolektor}$	MWh	kapacitet spremnika potreban da se pohrani toplinska energija koju proizvedu solarni kolektori u periodu od 1.5. do 1.10

S_{max}	MWh	Maksimalna napunjenost spremnika, odnosno njegov kapacitet (veličina)
S_{min}	MWh	Minimalna napunjenost spremnika
$S_{pp}(t)$	MWh	Toplinska energija punjenja/praznjenja spremnika u vremenskom trenutku t
T_1	K	Viša temperatura u radu DT
T_2	K	Niža temperatura u radu DT
T_m	°C	Srednja temperatura radnog medija solarnog kolektora
T_{polaz}	°C ili K	Polazna temperatura toplovoda
T_{povrat}	°C ili K	Povratna temperatura toplovoda
$T_{projektana}$	°C	Projektna temperatura prostora za grijanje
$T_{vanjska}(t)$	°C	Vanjska temperatura zraka, ovisna o vremenskom trenutku t
a_1	W/(K m ²)	Koeficijent toplinskih gubitaka 1. reda
a_2	W/(K ² m ²)	Koeficijent toplinskih gubitaka 2. reda
$c_{biomasa}$	€/MWh	Specifična cijena biomase
$c_{el.en.}(t)$	€/MWh	Specifična cijena električne energije u vremenskom trenutku t
$c_{p,voda}$	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet vode
$c_{spremnik}(S_{max})$	€/MWh	Specifični investicijski trošak spremnika ovisan o njegovoj veličini
$f_{kolektor}$	-	Udio toplinske energije proizvedene pomoću solarnih kolektora
p_{kol}	W/m ²	Specifična korisna toplinska snaga kolektora
w_{voda}	m/s	Brzina strujanja vode
γ_s	°	Kut azimuta Sunca
$\varepsilon_{kotao,max}$	-	Omjer vršnog opterećenja i maksimalne snage kotla
$\varepsilon_{kotao,min}$	-	Udio minimalne dostavne snage kotla
$\varepsilon_{kotao,min}$	-	Omjer minimalne i maksimalne dostavne snage kotla
η_{kol}	-	Učinkovitost solarnog kolektora
η_{kotao}	-	Termodinamička učinkovitost kotla
η_o	-	Optička učinkovitost
θ_z	°	Kut zenita
μ_{voda}	Pa s	Dinamička viskoznost vode
ρ_{albedo}	-	Albedo okoline
ρ_{voda}	Kg/m ³	Gustoća vode
COP	-	Faktor grijanja/hlađenja
$COP(T_{vanjska}, t)$	-	– faktor grijanja ovisan o vanjskoj temperaturi $T_{vanjska}$

D	m	Unutarnji promjer cijevi
N	h	Ukupan broj vremenskih trenutaka
Re	-	Reynoldsov broj
$S(t)$	MWh	Napunjenost spremnika u vremenskom trenutku t
$S(t - 1)$	MWh	Napunjenost toplinskog spremnika u prethodnom vremenskom trenutku
SS	°C	Stupanj sat
STP	MWh	Satno toplinsko opterećenje
t	h	Vremenski trenutak
z	€	Funkcija cilja
ΔT	°C ili K	Temperaturna razlika između polaznog i povratnog voda
β	°	Kut nagiba solarnog kolektora
γ	°	Kut azimuta
ε_0	-	Udio početne napunjenosti spremnika
ε_{DT}	-	Faktor stvarnog djelovanja DT
ε_{min}	-	Udio minimalne napunjenosti spremnika
θ	°	Kut između Sunca i normale na površinu pod nagibom

SAŽETAK

Energetska učinkovitost i centralizirani toplinski sustavi vrlo su djelotvorni u smanjivanju potrošnje energije, ukupnih emisija i ovisnosti o uvozu fosilnih goriva. Centralizirani toplinski sustavi imaju dodatne mogućnosti u obliku korištenja niskotemperaturne i otpadne topline, integraciju obnovljivih izvora energije i povećanje fleksibilnosti energetskog sustava tako što se višak proizvedene električne energije može na visokoučinkovit način pretvoriti i pohraniti u obliku toplinske energije pomoću dizalica topline i toplinskih spremnika.

U ovome radu prikazano je mapiranje potreba za toplinskom energijom u gradu Ogulinu i na temelju toga su predložene 3 konfiguracije distribucijske mreže: najveća koja obuhvaća sve popisane objekte, najmanja s objektima u blizini kotlovnice i ona koja sadrži samo objekte koji već imaju ugrađene instalacije potrebne za spajanje na centralizirani toplinski sustav. Uz to su napravljena 3 scenarija proizvodnje toplinske energije koji uključuju kombinaciju kotla na biomasu, dizalicu topline, solarne kolektore i satni, odnosno sezonski toplinski spremnik. Prvi scenarij podrazumijeva korištenje samo kotla na biomasu, sljedeći scenarij uvodi dizalicu topline, dok treći dodaje solarne kolektore i zamjenjuje satni toplinski spremnik sa sezonskim.

Kako bi se odredila najisplativija konfiguracija mreže, odnosno scenarij, provedena je optimizacija veličine spremnike i rada sustava čiji je cilj minimalizirati ukupne troškove. Kao ulazne parametre potrebno je definirati satnu potrošnju toplinske energije, snage proizvodnih jedinica, specifične cijene proizvodnje toplinske energije i specifičnu cijenu toplinskog spremnika. Optimizacijski kod je izrađen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na Katedri za energetiku i energetska postrojenja.

Kako bi se odredila financijski najisplativija verzija sustava, napravljena je tehno-ekonomska analiza u kojoj je najvažniji pokazatelj financijske uspješnosti prodajna cijena toplinske energije koja može osigurati neto sadašnju vrijednost projekta jednaku nuli.

Kao najisplativiji scenarij pokazala se najveća konfiguracija mreže korištena u Scenariju 2 gdje dizalica topline i kotao na biomasu pokrivaju 90% vršnog toplinskog opterećenja. Uvođenje solarnih kolektora i sezonskog toplinskog spremnika nije postiglo željeni rezultat, takav projekt se pokazao neisplativim ako se ne koriste bespovratni poticaji.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustavi, kotao na biomasu, dizalica topline, solarni kolektori, toplinski spremnik, optimizacija

SUMMARY

Energy efficiency and district heating systems are a very effective way of cutting down on energy consumption, carbon dioxide emissions and fossil fuel import dependence. District heating has some additional characteristics including: an efficient exploitation of low-temperature and waste heat, the possibility of renewable energy sources integration and the increase in flexibility of energy systems by using high efficient heat pumps and large thermal energy storage to convert surplus electricity from the grid to heat.

This thesis demonstrates a mapping of thermal energy needs for the city of Ogulin and following this, 3 distribution system configurations have been proposed: the largest which includes all the mapped buildings, the smallest which presents only the ones close to the heating plant and the third one which includes only the buildings with an already existing infrastructure that is needed for connecting to district heating system. In addition to this, three scenarios of thermal energy production units have been made which combine a biomass boiler, a heat pump, solar collectors and thermal energy storage. The first one uses only a boiler and the storage, the second one adds a heat pump into the system and the last one integrates solar collectors and replaces daily storage with a seasonal one.

To prove which of the configurations and scenarios are the best, the optimization of storage size and thermal energy production distribution has been carried out. It minimizes heat production costs and heat storage investment costs by using these input parameters: heat demand distribution, production unit's capacities, specific costs of heat production and specific investment costs of thermal heat storage. The optimization code has been made at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Power Engineering and Energy Management Chair.

A techno-economic analysis has been conducted to find the best possible solution, where the most important parameter was the price of thermal energy paid by the consumers which will equalize the net present value of the project with zero.

The most profitable scenario includes the largest distribution system configuration which combines thermal storage, a biomass boiler and a heat pump. The integration of solar collectors has been proved to be unfeasible if subsidies are not used.

Key words: district heating system, biomass boiler, heat pumps, solar collectors, heat storage, optimization

1. UVOD

Europska Unija (EU) je već 2007. postavila ciljeve vezane za smanjenje emisija ugljikovog dioksida (CO₂), povećanje udjela obnovljivih izvora energije (OIE) i povećanje učinkovitosti u njenom korištenju. Razlog tome je želja za energetsom neovisnošću i smanjenje utjecaja na klimatske promjene. Jedan od najučinkovitijih sredstava za rješavanje navedenih problema je energetska efikasnost; smanjuje se potrošnja i ovisnost o uvozu energije te sukladno tome emisije CO₂. Kao dodatna posljedica javlja se inovacija i napredak tehnoloških rješenja što također potiče industrijsku i tržišnu konkurentnost. Na taj način se potiče gospodarski rast i otvaranje novih radnih mjesta.

Centralizirani toplinski sustavi (CTS) i visokoučinkovita kogeneracija imaju veliki potencijal za uštedu primarne energije. Njihova uloga u energetske sustavima je vrlo važna budući da se njihovom primjenom može ostvariti povećanje fleksibilnosti cjelokupnog energetske sustava kao i mogućnost integracije OIE. EU je prepoznala važnost CTS-a što se očituje u Direktivi o energetske učinkovitosti gdje je propisano da svaka država članica ima zadatak da napravi procjenu potencijala za visokoučinkovitu kogeneraciju i centralizirano grijanje i hlađenje.

1.1. Pariški sporazum i odgovornost Europske unije

U prosincu 2015. u Parizu je održan COP 21 (*eng. Conference of Parties*) gdje je donesen tzv. Pariški sporazum o klimi. Po prvi puta u povijesti, sve su se zemlje članice složile da su klimatske promjene stvaran problem i odlučile su provesti mjere kako bi spriječile daljnji rast temperature i emisija stakleničkih plinova. Time su završili pregovori započeti 2011. u Durbanu. Pariški sporazum je poseban po tome što briše razliku između razvijenih zemalja i zemalja u razvoju i potiče stvaranje zajedničkog plana prema kojem svaka zemlja mora reagirati u skladu sa svojim mogućnostima i [1], [2]:

- ograničiti rast srednje temperature na Zemlji do 2°C mjereno od industrijskog razdoblja s težnjom ograničavanja rasta na 1,5 °C;
- ustanoviti vezujuće doprinose svih članica utvrđene INDC-om (*eng. Intended Nationally Determined Contributions*) svake potpisnice zasebno;
- sve članice moraju provesti smanjenje emisija prema vlastitim mogućnostima kako bi se ostvarili željeni ciljevi;
- sve članice moraju periodično davati izvješća o napretku i o svojim emisijama;
- sve članice moraju svakih 5 godina donositi novi INDC u kojem se pokazuje napredak u odnosu na prošli.

Pariški sporazum je otvoren za potpisivanje od 22.4.2016. U vrijeme pisanja ovoga rada 17 je članica sporazum ratificiralo, a uglavnom je riječ o najugroženijim, otočnim državama u razvoju [3]. Kako bi sporazum stupio na snagu potrebno je skupiti prihvaćanje od strane vlada 55 zemalja koje su odgovorne za 55% ukupnih emisija. Ako se to učini prije 2020. tada bi se Konferencija stranaka (COP) počela sastajati u sklopu „Sastajanja članica Pariškoga sporazuma“ (CMA, *eng. „Meeting of the Parties to the Paris Agreement“*).

EU je danas jedan od najrazvijenijih dijelova svijeta; 2014. je imala najveći svjetski bruto društveni prihod (BDP) od 18.460.646 US\$ [4], odnosno 36.447 US\$ po stanovniku. Svoj visoki razvoj duguje ranom industrijskom napretku. Obje industrijske revolucije su se događale

na prostoru Europe gdje su se sagorijevale iznimno velike količine tada jeftinog fosilnog goriva (uglavnom ugljena) i emitirale velike količine stakleničkih plinova bez znanja o posljedicama. Danas su glavni zagađivači Kina (20% ukupnih svjetskih emisija), SAD (17.89%), EU (9,6%), Rusija (7,5%) i Indija (4%) [5].

Planirani nacionalno utvrđeni doprinos (INDC) EU je predan 6.3.2015. i zapravo odražava njenu energetska strategiju s pogledom na klimu i klimatske promjene za razdoblje od 2020. do 2030. EU se tako obvezala smanjiti svoje emisije za 40% do 2030. u usporedbi s 1990. kako bi se povećanje temperature ograničilo na 2°C u usporedbi s predindustrijskim razdobljem, što se poklapa sa strategijom EU o smanjenju emisija CO₂ za 80-95% do 2050. u usporedbi s 1990. [7]. Planirani nacionalno utvrđeni doprinosi EU se ipak smatraju nedovoljno ambicioznima u odnosu na njihove potencijale (kao i većina predanih INDC-a). Radi usporedbe, samo su planirani doprinosi 5 zemalja ocijenjeni kao dovoljno ambiciozni [6].

Unatoč tome, EU je već davno uvidjela važnost klimatskih promjena. Naime, 2007. je predloženo smanjenje emisija CO₂ od 30% u odnosu na 1990. ako se i ostale razvijene zemlje priključe tom planu. Pošto taj pothvat nije prepoznat od strane drugih razvijenih zemalja, EU je nastavila s planom smanjenja emisija od 20% do 2020. u odnosu na 1990. [8]. Taj plan je dio klimatsko-energetske strategije 20-20-20; osim smanjenja emisija CO₂ za 20% plan je i povećati energetska učinkovitost i udio OIE u finalnoj potrošnji za 20%.

Uz energetska strategiju donesene su i dvije direktive: Direktiva o promicanju energije iz OIE i Direktiva o energetska učinkovitosti. Direktiva o promicanju OIE iz 2009. donijela je politiku za proizvodnju i promociju energije iz OIE u EU [9]. Direktiva o energetska učinkovitosti uspostavila je paket mjera kako bi se pomoglo i omogućilo postizanje povećanja učinkovitosti od 20% do 2020. Pod Direktivom, sve zemlje dužne su koristiti energiju na učinkovitiji način u svim stupnjevima pretvorbe u energetska lancu [10].

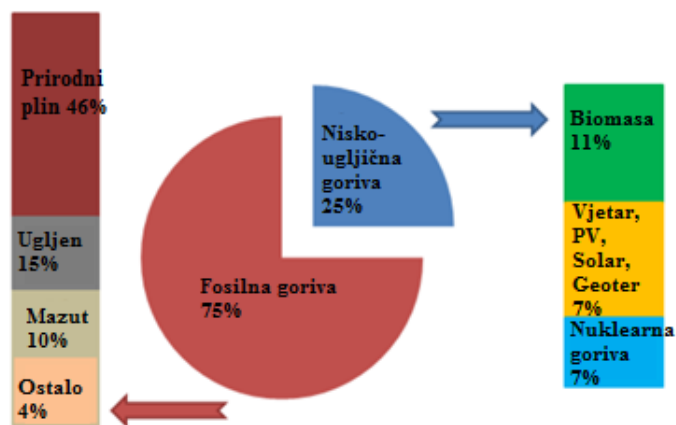
U Komunikaciji Okvira za klimatska i energetska politiku za razdoblje od 2020. do 2030. donesenoj 2014., komisija je predložila smanjenje emisija stakleničkih plinova za 40% u odnosu na stanje emisija iz 1990. [11]. Kako bi se ostvario cilj smanjenja stakleničkih plinova do 2030. za 40% predviđeno je povećanje udjela OIE na barem 27% u istome razdoblju. Osim toga, potrebno je prilagoditi energetska sustav decentraliziranoj i varijabilnoj proizvodnji električne energije (uslijed povećane proizvodnje iz solarnih elektrana i vjetroelektrana). Trenutno se smatra da će ciljevi za smanjenjem emisija stakleničkih plinova za 20% do 2020. biti ispunjeni [12]. Udio OIE u krajnjoj potrošnji energije povećao se na 13% u 2012. i očekuje se daljnji porast do 21% u 2020. godini, a prema energetska politici za razdoblje do 2020., očekuje se porast do 24% u 2030. godini, [11] što znači da će cilj za 2020. godinu najvjerojatnije biti ispunjen [13].

Jedini cilj koji neće biti ispunjen vezan je uz energetska učinkovitost, tj. uz povećanje učinkovitosti korištenja energije na 20% do 2020. [11], [14]. Iz tog će se razloga vjerojatno obnoviti Direktiva za promicanje energetska učinkovitosti. EU je uvidjela problem energetska učinkovitosti i važnost potrošnje energije za grijanje i hlađenje (većina energije za grijanje i hlađenje otpada na zgradarstvo) te je predložena Strategija EU za grijanje i hlađenje [15]. Kao jedno od ključnih rješenja ovoga problema predloženo je povećanje udjela centraliziranih toplinskih sustava te njihov razvoj [15].

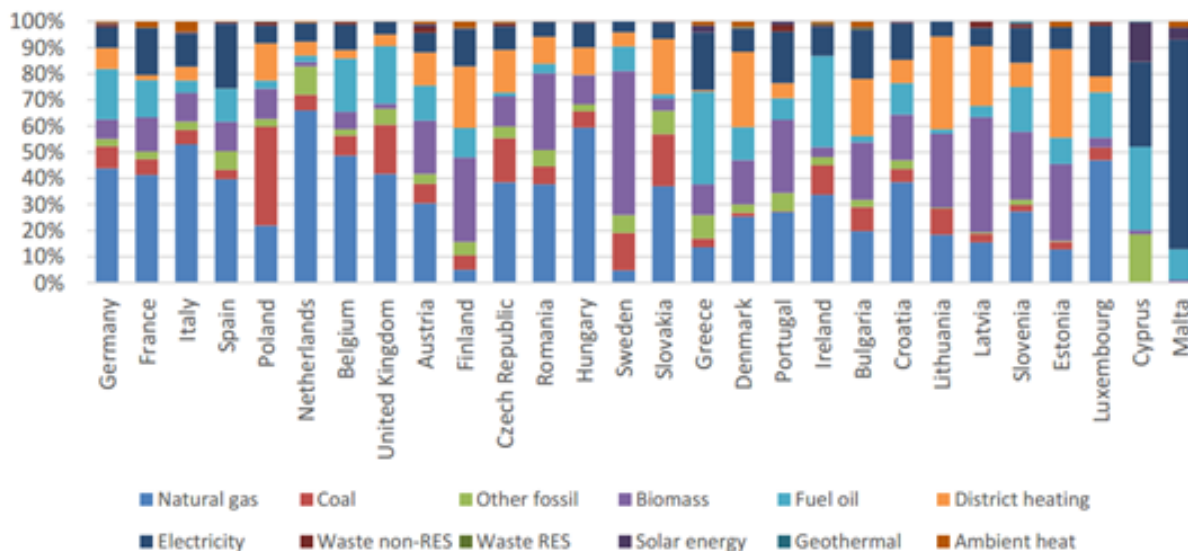
1.2. Korištenje CTS-a s ciljem povećanja energetske učinkovitosti

EU troši oko 50% finalne energije na grijanje i hlađenje [15] zbog čega je taj sektor od velike važnosti. Trenutno se radi na donošenju Strategije za grijanje i hlađenje u kojoj će se pokušati donijeti rješenja za već postojeće sustave i zgrade, ali i donijeti nova koja uključuju OIE i CTS. Komunikacija strategije donesena je 16.2.2016.

Oko 75% energije za grijanje i hlađenje pokriveno je fosilnim gorivima (od čega gotovo polovica otpada na prirodni plin) dok je 25% pokriveno OIE (11% ukupne potrošnje otpada na biomasu). Slika 1. i Slika 2. detaljno prikazuju ukupne udjele energenata u sektoru grijanja i hlađenja za EU 28 i za zemlje članice pojedinačno.



Slika 1. Udio energenata za grijanje i hlađenje za EU 28 [15]



Slika 2. Udio energenata za grijanje i hlađenje, pojedinačno za članice EU 28 [15]

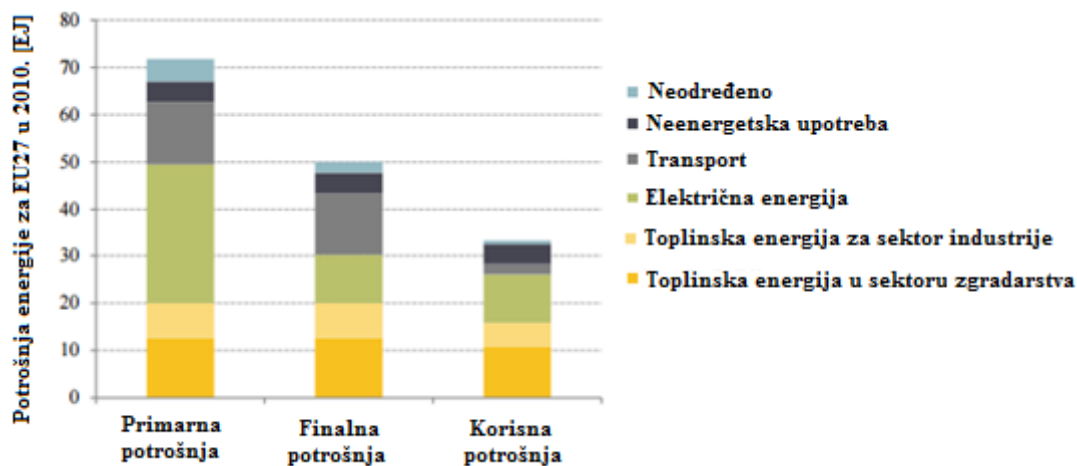
Najveći udio OIE nalazi se u baltičkim i nordijskim zemljama (Estonija 43%, Švedska 67%).

Cilj za 2020. vezan za energetske učinkovitost vjerojatno neće biti postignut, a najveći potrošači energije su upravo zgrade. EU je već poduzela određene korake kako bi riješila ovaj problem. Najlogičnije rješenje je energetska obnova zgrada, ali s pretpostavljenom brzinom obnove od 3% na godišnjoj razini, zgrade koje postoje danas biti će prisutne i u 2050. godini. Oko 40%

zgrada u EU datira iz 60-ih godina prošloga stoljeća, dok je dvije trećine izgrađeno kada propisi za energetska učinkovitost još nisu ni postojali. Postoje djelomična rješenja: preporuča se korištenje OIE poput sunčanih kolektora te dizalica topline (DT), integracija OIE u zgrade gotovo nulte emisije (NZEB, *eng. near zero-energy buildings*) kao i u zgrade/energane koje proizvode električnu energiju (koju čak ponekad i predaju u mrežu) i toplinsku energiju, ali njihov je broj trenutno jako malen i još uvijek ne predstavljaju klasično rješenje problema. Osim toga, ovakav plan obuhvaća samo novoizgrađene zgrade. Trenutno ne postoji studija koja ukazuje na to kako na ekonomski isplativ način smanjiti potrošnju već postojećih zgrada [16]. Također, veliki dio tih zgrada grije se zastarjelim bojlerima (kotlovima) čija je iskoristivost manja od 60% [15], što dakako utječe na kvalitetu zraka jer granice emisija za čestica u doba kada su te zgrade bile sagrađene nisu bile toliko stroge kao danas.

Jedno od rješenja koje se spominje u prijedlogu strategije za grijanje i hlađenje je CTS. Riječ je o sustavu koji toplinsku energiju proizvodi na jednom, centralnom, mjestu i potom je distribuirana do potrošača. Raspon dobave toplinske energije ograničen je na 30-ak kilometara od izvora topline. Mali raspon distribucijske mreže ne predstavlja problem jer većina potrošača u EU živi blizu nekog toplinskog izvora; 70 milijuna građana koristi CTS dok 140 milijuna živi u blizini barem jednog.

Slika 3. pokazuje potrošnju primarne, finalne i korisne energije za sve sektore potrošnje u EU27 za 2010. [16].



Slika 3. Energetska bilanca EU kroz tri faze potrošnje – primarna, finalna i korisna energija za 2010. [16]

Ukupna potrošnja iznosila je 70 EJ primarne energije dok je samo oko 30 EJ sudjelovalo u korisnoj potrošnji. Veliki gubitak između finalne i korisne energije vezan je uz transport. Sljedeći je gubitak između primarne i finalne potrošnje i vezan je za proizvodnju električne energije; više od 50% primarne energije vezano za proizvodnju električne energije nije iskorišteno. Naime, riječ je o niskotemperaturnoj energiji koja se uglavnom „baca“ u okoliš. Projektom pod nazivom „Heat Roadmap Europe“ ustanovljeno je da se radi o 11.3 EJ topline koja bi se mogla iskoristiti za grijanje u sektoru kućanstva [18]. Sva potrebna toplina za grijanje kućanstava i proizvodnju potrošne tople vode (PTV) mogla bi se podmiriti s tom neiskorištenom energijom [16], [19]. Toplinska energija za korištenje u industrijskom sektoru mora biti pri višim temperaturama zbog čega se otpadna toplinska energija često ne može

direktno koristiti; potrebno je koristiti DT ili organske Rankinove cikluse (ORC) kako bi se postigle više temperature.

Osim za iskorištavanje otpadne topline i njenu distribuciju do potrošača, CTS može poslužiti i za povećanu integraciju OIE kroz stvaranje tzv. pametnog sustava (*eng. smart system*) gdje su proizvodnja električne i toplinske energije, kao i toplinska i električna mreža u potpunosti integrirani. Višak električne energije može poslužiti za proizvodnju toplinske energije pomoću elektrootpornih grijalica i DT. Današnji sustavi mogu bez poteškoća integrirati 25% OIE u svoj sustav, ali pri povećanju udjela do 65% to neće biti moguće ako CTS nije integriran s električnim sustavom [16], [17], [20].

2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI

2.1. Definicija i karakteristike CTS-a

CTS je u SAD-u uveden u kasnijim godinama 19. stoljeća, dok se u Europi počeo koristiti u ranijim godinama 20. stoljeća [20].

Kako bi se ideja CTS-a provela u djelo potrebno je imati 3 bitna elementa:

- relativno jeftini izvor topline;
- određenu potrebu za toplinskom energijom (u obliku potrebe za pripremom PTV-a, grijanjem kućanstva ili potrebe u industrijskom procesu);
- sustav distribucije koji uključuje cjevovod, odnosno toplovod/parovod.

Danas je prisutno 5 izvora toplinske energije koji se smatraju financijski isplativima, te lokacijski i općenito pogodnima:

- otpadna toplina iz termoenergetskih postrojenja, gdje postoji kombinirana proizvodnja električne i toplinske energije (CHP, *eng. Combined Heat and Power*), tj. kogeneracija;
- toplina nastala spaljivanjem otpada (*eng. waste-energy plants*);
- višak topline iz industrijskih postrojenja i rafinerija nafte;
- kruta glomazna goriva koja imaju poteškoće pri izgaranju u malim kotlovima (tu ponajviše spadaju gorljivi OIE poput drvene sječke);
- prirodni geotermalni izvori topline.

U budućnosti se očekuje povećano korištenje OIE (sunčani kolektori) i DT te korištenje električne energije u elektrootpornim grijalicama, što ne predstavlja problem ako veliki udio električne energije dolazi upravo iz OIE.

Što se tiče potrošača, tj. kupca toplinske energije, CTS ima određene prednosti, ali i mane. Prednosti CTS-a za kupca su sljedeće: korištenje CTS-a je vrlo jednostavno i komforno rješenje koje ne zahtjeva nikakvo miješanje kupca u njegov rad; kupac može biti siguran da će dobiti toplinu točno kada mu je potrebna (osim ako nije došlo do kvara sustava, za što je tada odgovoran proizvođač, odnosno distributer toplinske energije); kupcu je potrebno vrlo malo mjesta za potrebe grijanja, tj. ne treba smještati kotao i/ili toplinski spremnik u svoje kućanstvo. Dodatna je pogodnost što za kupca ne postoji opasnost od požara ili eksplozija. Što se tiče ekonomskih pogodnosti, kupac ne treba plaćati niti se treba brinuti o instaliranom višku snage kotla, već samo plaća snagu priključka i onu toplinsku energiju koja je njemu potrebna. Često se u CTS-u koristi i drvo kao OIE što može predstavljati dodatan izvor prihoda za lokalnu zajednicu ako se upotrebljava neiskorištena drvena sječka.

Mane CTS-a koje se direktno odnose na kupca su sljedeće: kupac uglavnom ne može pregovarati o cijeni toplinske energije, a potrošač često mora dodatno investirati u svoj sustav grijanja ako se želi prebaciti na CTS, npr. ako PTV nije uključen u CTS. Premda je proizvođač odgovoran za održavanje sustava, ako se dogodi neki veći kvar tada veliki broj kupaca istovremeno nema pristup traženoj toplinskoj energiji [19].

Međutim, CTS sa sobom donosi vrlo važne značajke i prednosti koje su nepobitne i vrijede uvijek bez obzira na mjesto na kojem se CTS nalazi:

- ekonomija obuhvata (*eng. economy-of-scope*) je temeljna ideja CTS-a, može proizvoditi toplinsku energiju iz nekolicine resursa što ga čini vrlo fleksibilnim, ekonomičnim i atraktivnim za integraciju u već postojeći sustav ili za izgradnju novoga;
- ekonomija razmjera (*eng. economy-of-scale*) je vrlo bitna karakteristika kod većih instaliranih postrojenja, što znači da što je postrojenje veće to su njegovi specifični troškovi manji (izraženi npr. u €/MW ili €/MWh);
- fleksibilnost CTS-a je jedna od njegovih najvećih prednosti – može vrlo jednostavno promijeniti toplinski izvor ili tehnologiju tijekom rada ako se slučajno promijene tržišni uvjeti, npr. pri manjoj cijeni električne energije raditi će toplinske pumpe, a pri većim cijenama električne energije raditi će CHP te će se tako povećati prihodi;
- sigurnost opskrbe je veća nego kod individualnih sustava grijanja; neki od razloga su što su u kućanstvima uglavnom korišteni bojleri starije generacije s manjim stupnjem djelovanja i što se cijena korištenih fosilnih goriva (pogotovo plina) često mijenja. CTS može raditi i na otpadnu toplinu koja je zapravo besplatna što nije moguće ako se koriste individualni sustavi grijanja.

Osim gore spomenutih, CTS ima i prednosti vezane uz utjecaj na okoliš. Cjelokupna se proizvodnja toplinske energije seli na jedno centralno mjesto gdje je olakšano mjerenje emisija i veća se pažnja posvećuje mjerenju kvalitete izgaranja. Jedan od primjera povećanja kvalitete zraka uz povećanje CTS-a je Stockholm gdje je opaženo smanjenje koncentracije sumporovog dioksida (SO₂) [19]. Emisije SO₂ su uglavnom na lokalnoj razini, tj. globalne posljedice su manje. CO₂ je prije svega globalni problem, ali se može ograničiti korištenjem niskougljičnih goriva i provođenjem kvalitetnijeg izgaranja što je moguće u CTS-u. Primjerice, biomasa se smatra gorivom koje ne utječe na ukupnu računicu CO₂, budući da se ispušteni ugljikov dioksid vraća u zemlju kroz apsorpciju biljaka uslijed fotosinteze. Osim kvalitetnijeg izgaranja, CTS nudi i energetska uštedu, tj. korištenje otpadne topline. CTS-om se vrlo jednostavno mogu integrirati OIE, a postoje i sustavi za hvatanje i skladištenje CO₂ (CCS, *eng. Carbon Capture and Storage*). Takvi se sustavi lakše mogu kontrolirati zakonodavstvom jer spadaju u veća postrojenja za koje se mogu propisati strože granice emisija, kvalitete goriva i učestalosti kontrole i ispitivanja kvalitete rada postrojenja.

2.2. Razvoj CTS-a

Kroz razvoj CTS-a korišteno je više pristupa, a danas mnogi od njih više ne postoje zato što je često dolazilo do pucanja na cijevima ili su jednostavno imali premalu učinkovitost. Glavni cilj razvoja CTS-a je bilo smanjenje investicijskih troškova, potrebnog prostora, vremena potrebnog za izgradnju postrojenja te troškova održavanja i vođenja postrojenja. Kroz povijest su očite 4 generacije CTS-a gdje je zadnja ona koja još nije potpuno zaživjela, premda postoje primjeri 3. generacije koje sadrže karakteristike 4.

- 1. generacija

Prva generacija centraliziranih sustava grijanja je koristila vodenu paru kao radni medij (nositelj toplinske energije). Ovakvi sustavi su prvi puta uvedeni u SAD-u 1880-ih. Tipične komponente ovakvoga sustava su betonski kanali u kojima se nalaze parovod, parne brtve

i kompenzatori za duljinska rastezanja uslijed temperaturne dilatacije. Danas se takav sustav smatra zastarjelim premda se još danas uvijek može naći u New Yorku (Manhattan) i u Parizu [19], [20]. U takvom sustavu vodena para je uvijek bila na temperaturama mnogo većim od 100°C što je uzrokovalo velike toplinske gubitke (proporcionalni su s temperaturnom razlikom između medija i okoliša), ali često i nesreće i eksplozije. Razlog nastajanja ove generacije CTS-a je bila želja za zamjenom starih bojlera loše iskoristivosti. Danas se uglavnom provode zamjene sustava 1. generacije s novim sustavima koji imaju veću iskoristivost [19], [20].

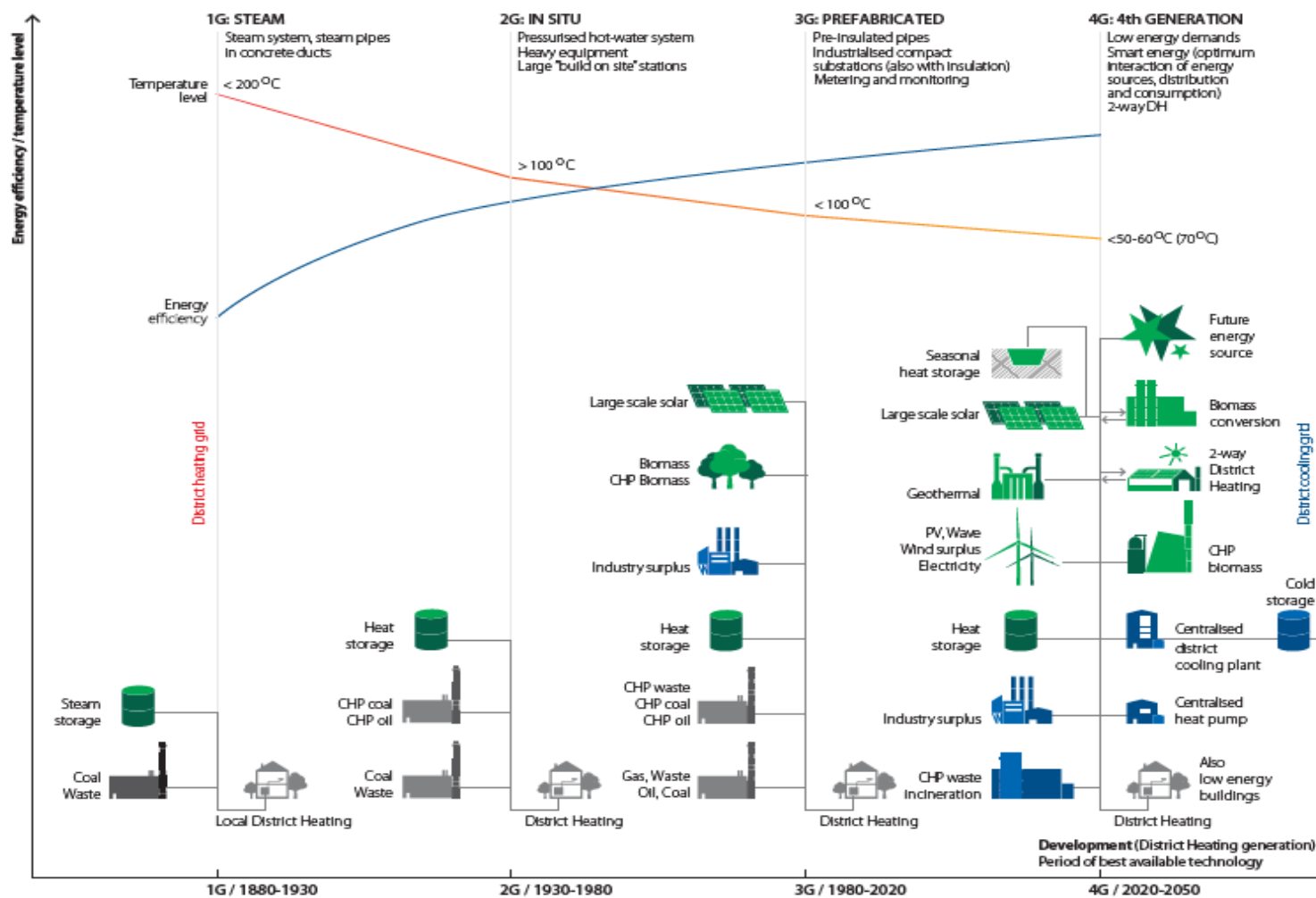
- 2. generacija

Druga generacija CTS-a koristi vodu pod tlakom na temperaturama većim od 100°C. Ovi sustavi su se javili 1930. i dominirali su tržištem sve do 1970. Tipične komponente ovakvoga sustava su vrelovodi u betonskim kanalima, veliki izmjenjivači topline i veliki ventili. Ova generacija CTS-a je bila česta u zemljama bivšega Sovjetskoga saveza. Tehnologija je bila relativno loša i nedostajala joj je kvalitetnija regulacija toplinskog opterećenja. Razlog korištenja ove generacije bila je želja za implementacijom kogeneracije u sustav [19], [20].

- 3. generacija

Treća generacija CTS-a je uvedena između 1970. i 1980. Stlačena voda je i dalje radni medij, ali je polazna temperatura najčešće manja od 100°C. Ovaj tip CTS-a se još naziva i „skandinavski tip“ zato što su glavni dobavljači opreme upravo iz skandinavskih zemalja. Klasične komponente sustava su unaprijed napravljene i izolirane cijevi koje su spremne za direktno postavljanje u zemlju. Toplinske podstanice su male, kompaktne i napravljene od nehrđajućeg čelika. Ovakva tehnologija se koristi kako bi se zamijenile sve postojeće tehnologije u centralnoj i istočnoj Europi. Razlog tome je potreba za povećanjem učinkovitosti sustava uslijed povećanja cijene fosilnih goriva zbog dvije naftne krize. Korištenje solarne i geotermalne energije postoji u malom broju primjera [19], [20].

Sve ove tehnologije teže smanjenju polazne temperature medija, komponentama koje se mogu relativno lagano izraditi i to prije samoga dolaska na gradilište kako bi se smanjila potrebna radna snaga i vrijeme potrebno za postavljanje i instalaciju. Prateći ovaj razvoj, buduća, četvrta generacija CTS-a bi trebala omogućiti manje polazne temperature te komponente koje se mogu jednostavno sklopiti, što podrazumijeva i savitljive cijevi. Četvrta generacija ne podrazumijeva samo promjenu sustava grijanja. Kako bi se nova generacija CTS-a mogla uvesti potrebno je promijeniti, tj. nadograditi postojeći energetski sustav – povećati udio OIE, povećati energetsku učinkovitost u zgradama te uvesti skladištenje toplinske/električne energije kako bi cijeli sustav postao fleksibilniji i učinkovitiji [19], [20]. Slika 4. pokazuje evoluciju CTS-a prema učinkovitijoj i naprednijoj 4. generaciji.



Slika 4. Razvoj CTS-a kroz povijest, od 1. do 4. generacije [20]

2.3. Četvrta generacija CTS-a

Studije su pokazale da je uloga CTS-a u budućim održivim sustavima s povećanim udjelima OIE vrlo važna, ali da se trenutne tehnologije moraju djelomično promijeniti i nadograditi kako bi se smanjili toplinski gubici mreže, u potpunosti spojile toplinska i električna mreža i tako povećala učinkovitost niskotemperaturnih jedinica u sustavu grijanja [20]. To podrazumijeva i promjenu sa strane potrošača, tj. potrebno je povećati efikasnost korištenja toplinske energije u zgradarstvu i promijeniti navike korištenja toplinske energije.

Kako bi se mogle ispuniti dane smjernice, budući sustavi trebaju:

- moći osigurati niskotemperaturni CTS za grijanje i PTV do postojećih zgrada, energetski obnovljenih zgrada i novo napravljenih nisko-energetskih zgrada;
- biti u mogućnosti distribuirati toplinu pomoću toplinske mreže s malim toplinskim gubicima;
- imati mogućnost recikliranja topline iz niskotemperaturnih izvora kao što su Sunčeva energija i geotermalna energija;
- osigurati mogućnost integracije u veći sustav, pametni sustav (gdje su u potpunosti integrirani pametni sustavi električne, plinske i toplinske mreže);
- moći osigurati kvalitetnu podlogu i strukturu vezanu za suradnju, dobavu investicija i planiranje kako bi se postigla potpuna transformacija u budući održivi energetski sustav.

Integracija OIE u sustav s udjelom preko 60% nije moguća bez integracije CTS-a. Razlog tome je velika nepredvidljivost OIE, naročito s točke gledišta proizvodnje električne energije gdje u svakome trenutku potražnja mora biti jednaka potrošnji. Proizvodnju električne energije iz OIE ne možemo regulirati, tj. nije preporučljivo gasiti proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora zato jer se tada gubi njihov smisao. Potrebno je čitavi sustav učiniti fleksibilnim kako bi mogao odgovarati na promjene proizvodnje električne energije tako što bi tu električnu energiju skladištio, odnosno potrebno je imati pametnu mrežu (*eng. smart grid/smart electricity grid*). Pametna električna mreža je samo jedan dio održivog sustava. Kako bi sustav bio kategoriziran kao održiv potrebno je osigurati i energetsku učinkovitost.

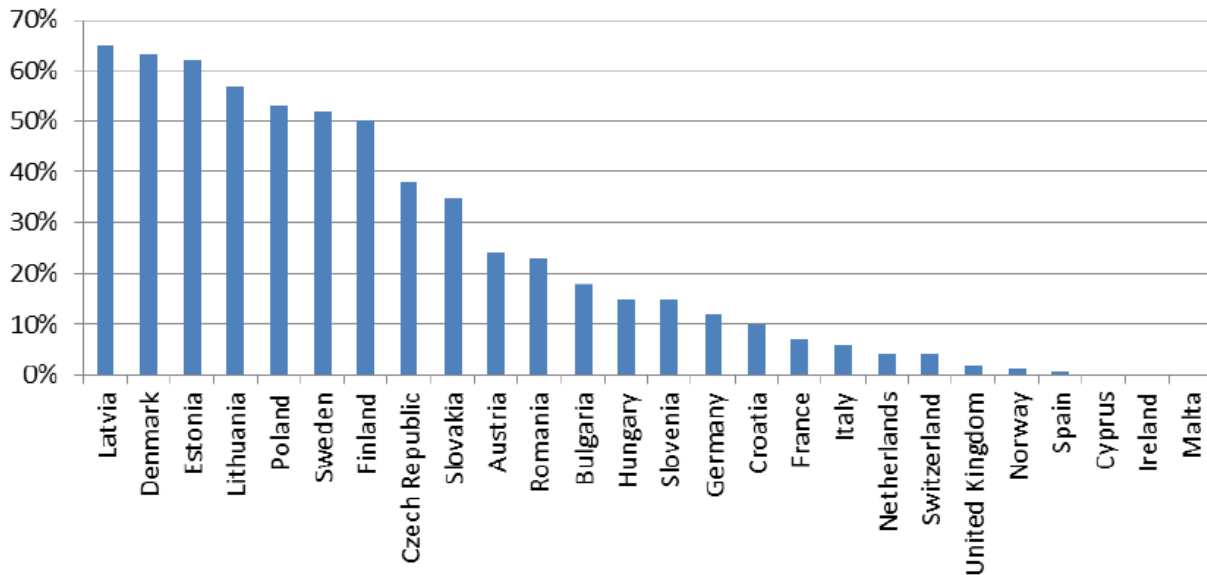
Jedan od načina kako sustav učiniti fleksibilnim je korištenje aktivne regulacije kogeneracijskog postrojenja uz toplinski spremnik. Kogeneracijsko postrojenje proizvodi električnu energiju kada opada proizvodnja električne energije iz OIE, odnosno CHP ne proizvodi električnu energiju kada proizvodnja električne energije iz OIE raste. Ako se uz taj način rada uvede i toplinski spremnik tada se udio OIE u proizvodnji električne energije može povećati do 20-25% [20].

Osim CHP-a potrebno je uvesti i toplinske pumpe velikih snaga i dodatni toplinski spremnik kako bi se još više OIE moglo integrirati u sustav. Višak električne energije se pomoću DT može vrlo učinkovito pretvoriti u toplinsku energiju, a potom pohraniti. Ovakvim načinom može se integrirati do 40% OIE [20] a da se ne naruši ukupna učinkovitost sustava. Uvođenje spremnika električne energije u ovom stadiju nije djelotvorno s obzirom na odnos uložene cijene i same koristi spremnika.

Daljnjim povećanjem udjela OIE potrebno je uvoditi tehnologiju koja ima mogućnost fleksibilnog rada, kao što je CHP i DT kako bi se mogla održati frekvencija i napon mreže (direktno povezani s razlikom između potrošnje i proizvodnje električne energije).

2.4. CTS u EU

CTS pokriva 9% ukupnih toplinskih potreba u sektoru kućanstva, 10% u sektoru usluga te 8% toplinskih potreba u industriji. Trenutno postoji oko 10.000 sustava centraliziranog grijanja što pokriva oko 70 milijuna građana, a 140 milijuna građana živi u gradovima s najmanje jednim CTS-om. Slika 5. prikazuje udio populacije koji koristi usluge CTS-a po zemljama članicama EU 28 [16].

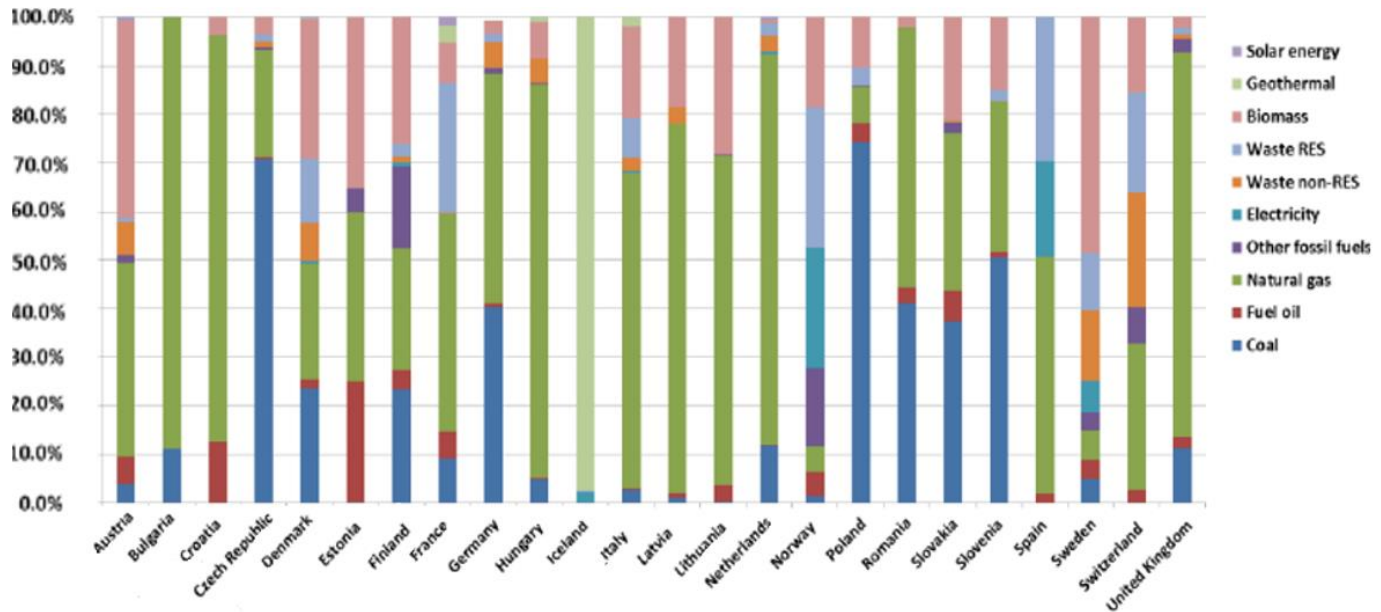


Slika 5. Postotak populacije EU-28 koji koristi CTS [16]

Veliki udio CTS-a u grijanju nalazi se u nordijskim zemljama gdje postoji velika potreba za toplinskom energijom i u zemljama bivšega Sovjetskoga saveza gdje je CTS 2. generacije bio standardna tehnologija. Ukupna duljina sustava distribucije CTS-a u EU je oko 150.000 km, gdje Danska, Švedska, Poljska, Njemačka i Finska imaju najveće duljine CTS-a.

Ukupna proizvodnja toplinske energije iz CTS-a u 2012. iznosila je 576 TWh, dok je instalirana toplinska snaga iznosila 247 GW [16]. Instalirana snaga je uglavnom u obliku CHP-a (42%) ili kao samostalni kotao (49%). Mali dio instalirane snage predstavlja izgaranje otpada (4%) dok je korištenje OIE u ukupnoj instaliranoj snazi neprimjetno.

Oko 80% proizvedene toplinske energije dolazi iz fosilnih goriva. Najveći udio čini prirodni plin (40%), a zatim ugljen (29%). Udio biomase u ukupnoj potrošnji iznosi 16%. Najveći udio biomase je zabilježen u Švedskoj (49%), Austriji (41%) i Estoniji (35%). Ostali OIE su nezamjetni, ali postoje u obliku geotermalne i solarne energije. Slika 6. prikazuje detaljnu raspodjelu energenata po zemljama članicama EU.



Slika 6. Udio nositelja energije u CTS-u EU za 2012. [16]

2.5. CTS u Hrvatskoj

U Hrvatskoj postoji 75 CTS-a, među kojima su najveći oni u Zagrebu i Osijeku. U 2013. je postojalo 13 tvrtki u 18 gradova u RH koji se bave proizvodnjom, distribucijom i opskrbom toplinske energije [24], [25]. Na taj način, pokriveno je 155.500 kupaca koji tu energiju koriste za grijanje prostora ili zagrijavanje PTV-a. Najveći dio kupaca pripada sektoru kućanstva. Slika 7. prikazuje sve toplinarske sustave u Republici Hrvatskoj u 2013. [25].

Toplinska se energija uglavnom proizvodi u kogeneracijskim postrojenjima u većim gradovima (Zagreb, Osijek, Split) ili u manjim toplanama ili kućnim kotlovnica [24]. Osim isporuke toplinske energije, u Zagrebu, Splitu i Osijeku se proizvodi i tehnološka para; dijelom se koristi za potrebe industrije, a dijelom za potrebe grijanja prostora.

U 2013. ukupna grijana površina kućanstava je iznosila 8.072.143 m², dok je grijana površina ostalih potrošača iznosila 227.686 m². Ukupna duljina distribucijske mreže je iznosila 410 km dok je broj novih potrošača u toj godini iznosio 1.013 (uglavnom u Zagrebu) što predstavlja 57.480 m² nove površine.

Koriste se uglavnom fosilna goriva: prirodni plin 85%, ekstra lako loživo ulje 8%, a loživo ulje 7%. Osim toga, postoje i primjeri korištenja biomase, ali su oni rijetki.

Najveći broj potrošača se nalazi u Zagrebu gdje je energetska subjekt HEP Toplinarstvo d.o.o. U gradu Zagrebu postoji oko 100.000 korisnika dok broj korisnika u ostalim gradovima ne premašuje brojku od 12.000. HEP Toplinarstvo je najveći proizvođač toplinske energije u Hrvatskoj – skoro 90 % isporučene toplinske energije je upravo iz njegovih postrojenja.

Najniža cijena za sektor kućanstva iznosi 0.16 HRK/kWh, a plaćaju je korisnici HEP Toplinarstva u gradu Osijeku. Najveća cijena za isporučenu toplinsku energiju iznosi 0,43 kn/kWh u Virovitici gdje je energetska subjekt Plin VTC d.o.o. Osim toga, potrebno je i dodati cijenu koja ovisi o snazi priključka, a izražava se u HRK/kW. Najniža cijena iznosi 11.41

HRK/kW u Osijeku i Zagrebu, dok najviša cijena iznosi 22 HRK/kW za gradove Slavonski Brod (Brod plin d.o.o.) i Virovitica (Plin VTC d.o.o.).



Slika 7. Prikaz svih toplinarskih sustava u Republici Hrvatskoj [25]

3. OPIS ZADATKA I ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA

3.1. Opis zadatka

U sklopu ovoga rada bilo je potrebno prikupiti, mapirati i izračunati potrebe za toplinskom energijom u gradu Ogulinu. Potom, na temelju tih podataka biti će predložene tri alternative za distribuciju toplinske mreže, odnosno toplovoda. U skladu s time potrebno je odrediti potrebne kapacitete proizvodnih pogona centraliziranoga toplinskog sustava kako bi se zadovoljile sve potrebe potrošača ovisno o predloženim distribucijama toplovoda. Dodatno je trebalo predložiti alternativne načine proizvodnje toplinske energije za CTS koji bi uključivali kombinaciju kotla na biomasu, tehnologiju koja uključuje solarnu energiju (solarne kolektore), dizalicu topline te u skladu s time optimizirati veličinu toplinskog spremnika. Kao zaključnu stavku zadatka potrebno je izraditi tehno-ekonomsku analizu svake od navedenih kombinacija tehnologije i distribucijske mreže kako bi se odredila najisplativija.

3.2. Analiza postojećeg stanja

Grad Ogulin nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske, u Karlovačkoj županiji. Takav položaj osigurava mu odličnu povezanost s drugim dijelovima Hrvatske. Grad se prostire na 543,32 km² i sastoji se od 24 naselja.

Ogulin je od 2011. potpisnik Sporazuma gradonačelnika (*eng. Covenant of Mayors*). Radi se o sporazumu koji veže napredne europske gradove u zajedničkom cilju da se zaustave klimatske promjene. Tim se sporazumom gradonačelnici obvezuju na primjenu mjera energetske učinkovitosti kako bi se postigli planovi smanjenja CO₂ do 2020.

Grad je također tražio izradu Akcijskog plana energetske održivog razvitka (SEAP, *eng. Sustainable energy action plan*) u kojem se navode mjere energetske učinkovitosti koje bi grad mogao poduzeti kako bi se smanjile njegove emisije. Osim toga, SEAP daje vrlo vrijedne podatke o trenutnoj potrošnji, korištenim energentima, specifičnoj potrošnji u sektoru zgradarstva itd. Plan je izradio Grad Ogulin u suradnji s REGEA-om (Regionalna energetska agencija) [32].

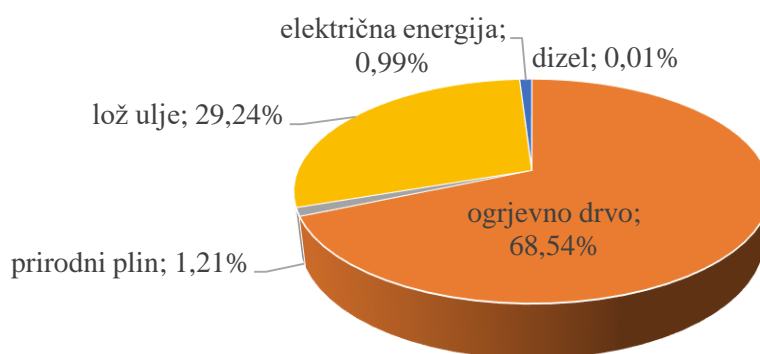
Premda se u SEAP-u spominje ugradnja solarnih kolektora na krovove 200 kućanstva, izgradnja novoga CTS-a nije opisana kao jedna od mjera. Grad Ogulin je ipak zatražio izradu studije predizvedivosti za CTS na biomasu. Prije samoga mapiranja toplinskih potreba mora se izvršiti analiza potrošnje postojećeg sustava.

Prema [32] dobivaju se podaci o trenutnoj potrošnji u zgradarstvu (Tablica 1). Osim toga, dan je i podatak o udjelima pojedinih energenata, (Slika 8.). U sektoru zgradarstva, na grijanje i PTV, najviše se troši biomasa (69%) i lož ulje (30%) dok ostatak otpada na prirodni plin i električnu energiju.

U Ogulinu postoje dva mala CTS-a koji su prema [24] definirani kao zatvoreni toplinski sustavi. Zatvoreni toplinski sustav je zapravo CTS čija je ukupna duljina distribucijske mreže kraća od 2.000 metara pri čemu ima manje od 500 samostalnih uporabnih cjelina. Vlasnik je SKG d.o.o. Ogulin (Stambeno komunalno gospodarstvo) i koji među ostalim obavlja i djelatnosti distribucije i proizvodnje toplinske energije. Tablica 2. prikazuje detaljne podatke CTS-a u Ogulinu za 2013.

Tablica 1. Potrošnja toplinske energije u zgradarstvu [32]

Vrsta	Broj zgrada	Ukupna površina [m ²]	Potrošnja toplinske energije [kWh]	Specifična potrošnja toplinske energije [kWh/m ²]
Zgrade u vlasništvu grada	18	41.626	7.864.964	188,9
Stambene zgrade – kućanstva	5135	297.851	52.047.676	174,7
Zgrade komercijalnih i uslužnih djelatnosti	577	171.976	32.320.310	187,9
Ukupno	5730	511.454	92.052.949	179,9

**Slika 8. Udio pojedinog energenta u sektoru zgradarstva [32]****Tablica 2. Podaci o CTS-u grada Ogulina [24]**

Adresa	V. I. Marinkovića	Ljudevita Gaja
Ukupna instalirana snaga kotlovnice [kW]	2.200	2.400
Korišteni energent	Lož ulje i ekstra lako lož ulje	
Ukupan broj kućanstava	150	
Ukupan broj ostalih potrošača	27	
Ukupna grijana površina kućanstva [m ²]	7.503	
Ukupna grijana površina ostalih potrošača	4.187	
Priključna snaga kućanstva [kW]	975	
Priključna snaga ostalih potrošača	463	

Cijena isporučene toplinske energije za kućanstva iznosi 0,41 kn/kWh, dok za poslovne potrošače iznosi 0,51 kn/kWh [33].

4. MAPIRANJE POTREBA

4.1. Mapiranje potreba za toplinskom energijom

Kako bi se ustanovio potrebni kapacitet i konfiguracija distribucijske mreže potrebno je mapirati potrošače za koje postoji mogućnost spajanja na buduću distribucijsku mrežu CTS-a. Mapiranje kućanstava i poslovnih potrošača je napravljeno u suradnji s REGEA-om i Upravom grada Ogulina. Popis objekata se može podijeliti na objekte čiji se prostor koristi samo za potrebe kućanstva, na one koji se koriste isključivo za poslovni prostor i na mješovite objekte.

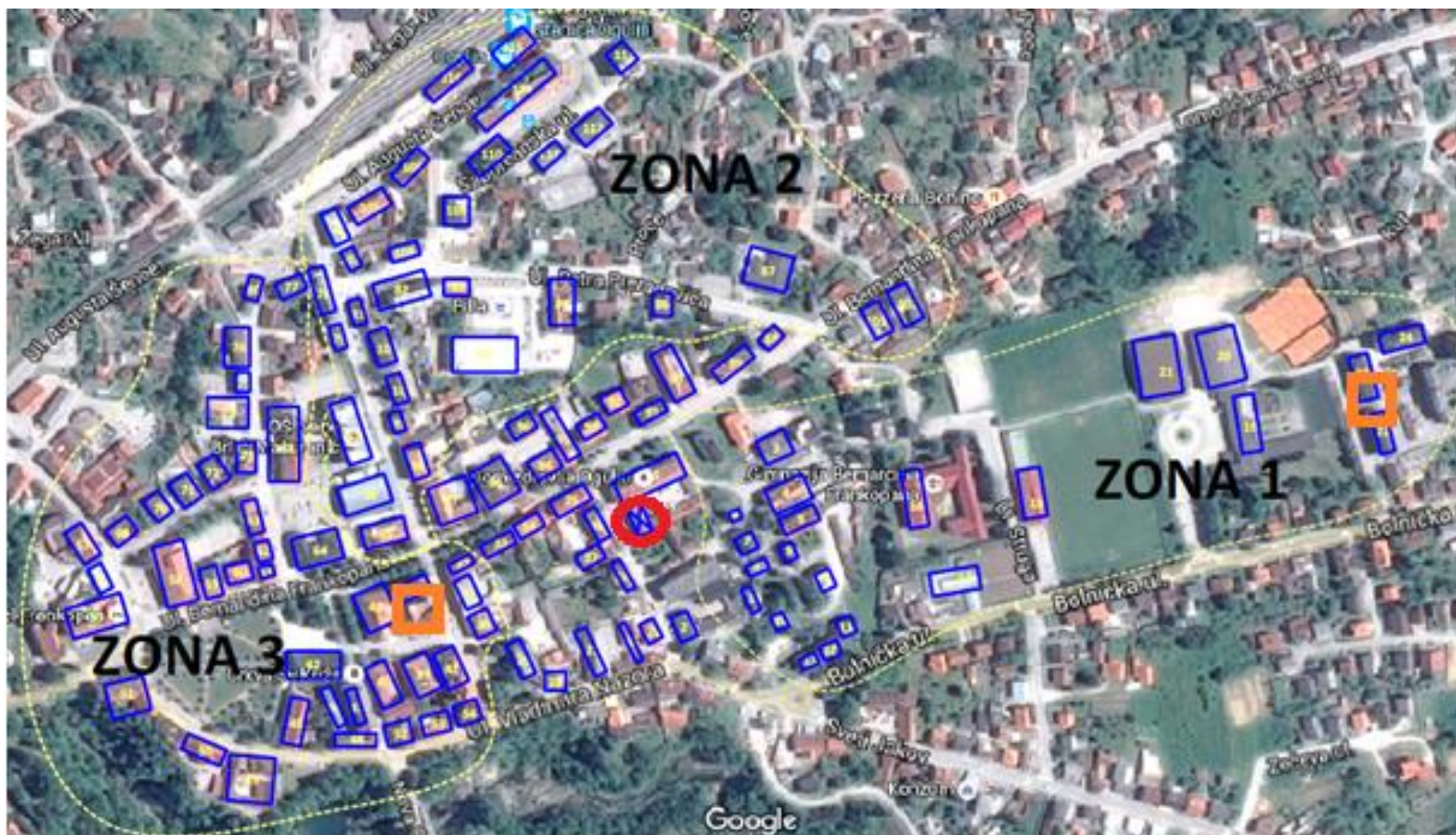
Premda prema [32] specifična potrošnja toplinske energije iznosi 179,9 kWh/m², REGEA je prema iskustvu iz prošlih projekata preporučila korištenje iznosa od 200 kWh/m² jer se prema vizualnoj kontroli objekata radi o relativno starim zgradama. Kako bi se dobila okvirna vršna toplinska snaga potrošača i odredila distribucijska mreža, korišten je iznos od 40 W/m³ objekta. Kasnije će biti pokazano da vršna toplinska snaga određena na ovaj način odlično odgovara detaljnijoj analizi preko metode stupanj-sata obrađenoj u nastavku. Za izračun ukupne potrošnje i vršne toplinske snage koristio se iznos od 90% ukupne neto površine objekta. Ista pretpostavka vrijedi i za izračun vršne toplinske snage, za izračun se koristio iznos od 90% neto volumena objekta.

Važno je napomenuti da će budući CTS grada Ogulina pokrivati samo potrošnju toplinske energije vezanu za grijanje prostora te neće uključivati i toplinsku energiju za grijanje PTV-a.

Ukupno je popisano 116 objekata. Tablica 3. prikazuje detaljne podatke, a Slika 9. prikazuje smještaj objekata u gradu Ogulinu.

Tablica 3. Podaci o potrošačima budućeg CTS-a grada Ogulina

Ukupan broj objekata	116
Broj objekata – isključivo kućanstva	30
Broj objekata – isključivo poslovni prostor	47
Broj objekata – djelomično kućanstva/poslovni prostori	39
Broj objekata s već postojećom infrastrukturom potrebnom za spajanje na CTS	31
Ukupna neto površina objekata [m ²]	101.829
Ukupna potrošnja toplinske energije [kWh]	18.329.220
Ukupna vršna toplinska snaga [kW]	12.579



Slika 9. Prikaz i smještaj objekata (plavo), postojećih kotlovnica (narančasti kvadrati) i lokacije za planiranu novu kotlovnicu (crveni krug)

Čitava mreža biti će podijeljena na 4 zone. Zona 1 predstavlja istočni dio, zona 2 sjeverni, a zona 3 istočni dio. Zona 0 predstavlja dio uz samu kotlovnicu, odnosno pokriva centar grada Ogulina i nije posebno naznačena.

4.2. Izgradnja distribucijske mreže

Kako bi se odredio promjer cijevi toplovoda korišten je katalog tvrtke ISOPLUS koja se bavi proizvodnjom dvostrukih cijevi za potrebe CTS-a [42]. Toplinska snaga distribucijske mreže je općenito definirana jednadžbom (1):

$$P_{topl} = \dot{m}_{voda} \cdot c_{p,voda} \cdot \Delta T = \dot{m}_{voda} \cdot c_{p,voda} \cdot (T_{polaz} - T_{povrat}) \quad (1)$$

Gdje je \dot{m}_{voda} definiran prema (2) :

$$\dot{m}_{voda} = w_{voda} \cdot \rho_{voda} \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

Pri čemu su:

P_{topl} – toplinski učinak [W]

w_{voda} – brzina strujanja vode [m/s]

ρ_{voda} – gustoća vode [kg/m³]

D – promjer cijevi kroz koju struji radni medij [m]

ΔT – temperaturna razlika

T_{polaz} – polazna temperatura u distribucijskom vodu [°C]

T_{povrat} – povratna temperatura u distribucijskom vodu [°C]

Regulacija snage CTS-a vrši se preko promjene temperaturne razlike i brzine strujanja vode. Preporučene brzine strujanja vode ovise o promjeru cijevi, a mogu biti u rasponu od 0,5-5 m/s. To su preporučene brzine strujanja kako bi se postigao optimalni Reynoldsov broj 10^5 - 10^6 za distribucijske sustava u CTS-u [19]. U tome rasponu se postiže optimalni odnos koeficijenta trenja i snage pumpanja (direktno povezana s brzinom strujanja, promjerom i koeficijentom trenja).

Reynoldsov broj je definiran prema jednadžbi (3)

$$Re = \frac{\rho_{voda} \cdot w_{voda} \cdot D}{\mu_{voda}} \quad (3)$$

Pri čemu je:

Re – Reynoldsov broj [-]

μ_{voda} – dinamička viskoznost vode [Pa s]

Tablica 4. prikazuje korištenu tablicu iz kataloga ISOPLUS prema kojoj je dizajnirana toplinska mreža.

Tablica 4. Podaci korišteni za proračun nazivnog promjera toplovoda i priključaka [34]

Type	Volume Flow V' in m ³ /h		Flow Speed w in m/s		Transmittable Capacity P in kW at spread					
	from	to	from	to	20 K		30 K		40 K	
					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

Tablica 4. služi kako bi se dobio nazivni promjer ovisno o traženoj toplinskoj snazi. Zadnja 3 stupca predstavljaju 3 različita temperaturna raspona. Pri izračunu nazivnog promjera potrebno je uzeti najmanju temperaturnu razliku između polaza i povrata jer to predstavlja kritični slučaj; potreban je najveći protok vode. Za odabir nazivnog promjera korištena je aritmetička vrijednost iznosa brzine vode, odnosno toplinske snage.

Tablica 5. Ukupan broj i raspored priključaka prema nazivnim promjerima DN

	Nazivni promjer priključka DN [mm]					
	25	32	40	50	65	80
Ukupan broj	15	51	17	18	11	4

Nazivni promjeri priključaka se računaju na isti način kao i cijevi toplovoda. Maksimalno opterećenje po objektu iznosi 535,68 kW što odgovara nazivnom promjeru priključka DN 80, minimalno toplinsko opterećenje iznosi 14,61 kW, što predstavlja nazivni promjer priključka DN 25. Tablica 5. prikazuje detaljne podatke o broju i vrsti priključaka.

Kao što je prethodno pokazano, distribucijski sustav podijeljen je na 4 zone. Prema projektnom zadatku je potrebno predložiti 3 verzije distribucijskog sustava. Verzija 1 uključuje sve potrošače, Verzija 2 uključuje samo objekte najbliže budućoj kotlovnici, dok Verzija 3 uključuje samo objekte koji već imaju postavljenu infrastrukturu potrebnu za spajanje na CTS što znači da su već spojeni na jedan od dva postojeća CTS-a ili imaju ugrađeno centralno grijanje.

Tablica 6. prikazuje verzije distribucijskog sustava s podacima o broju objekata, neto površini grijanih objekata i potrošnji, odnosno opterećenju.

Tablica 6. Podaci o verzijama distribucijskog sustava

Broj verzije	Uključeni objekti	Ukupan broj objekata	Ukupna neto površina objekata [m ²]	Ukupno vršno toplinsko opterećenje [kW]	Ukupna potrošnja toplinske energije [kWh]
Verzija 1	Zone 1, 2, 3	116	101.829	12.508	18.211.320
Verzija 2	Zona 0	24	21.279	2.607	3.830.220
Verzija 3	Odabrani objekti	31	36.211	4.437	6.517.980

Cijevi toplovoda pretežito prate glavne ulice, tj. uglavnom se radi o asfaltnom iskopu što će biti važno pri izradi tehno-ekonomske analize. Naime, asfaltni iskop je skuplji od zemljanog iskopa.

U ISOPLUS katalogu ne postoje nazivni promjeri veći od DN 250, tj. ne postoje cijevi koje imaju toplinski učinak veći od 7 MW pri temperaturnoj razlici od 20°C. Te su cijevi u distribucijskoj mreži označene kao DN>200. Kasnije će pomoću ekstrapolacije podataka biti prikazano da se radi o nazivnom promjeru DN 300.

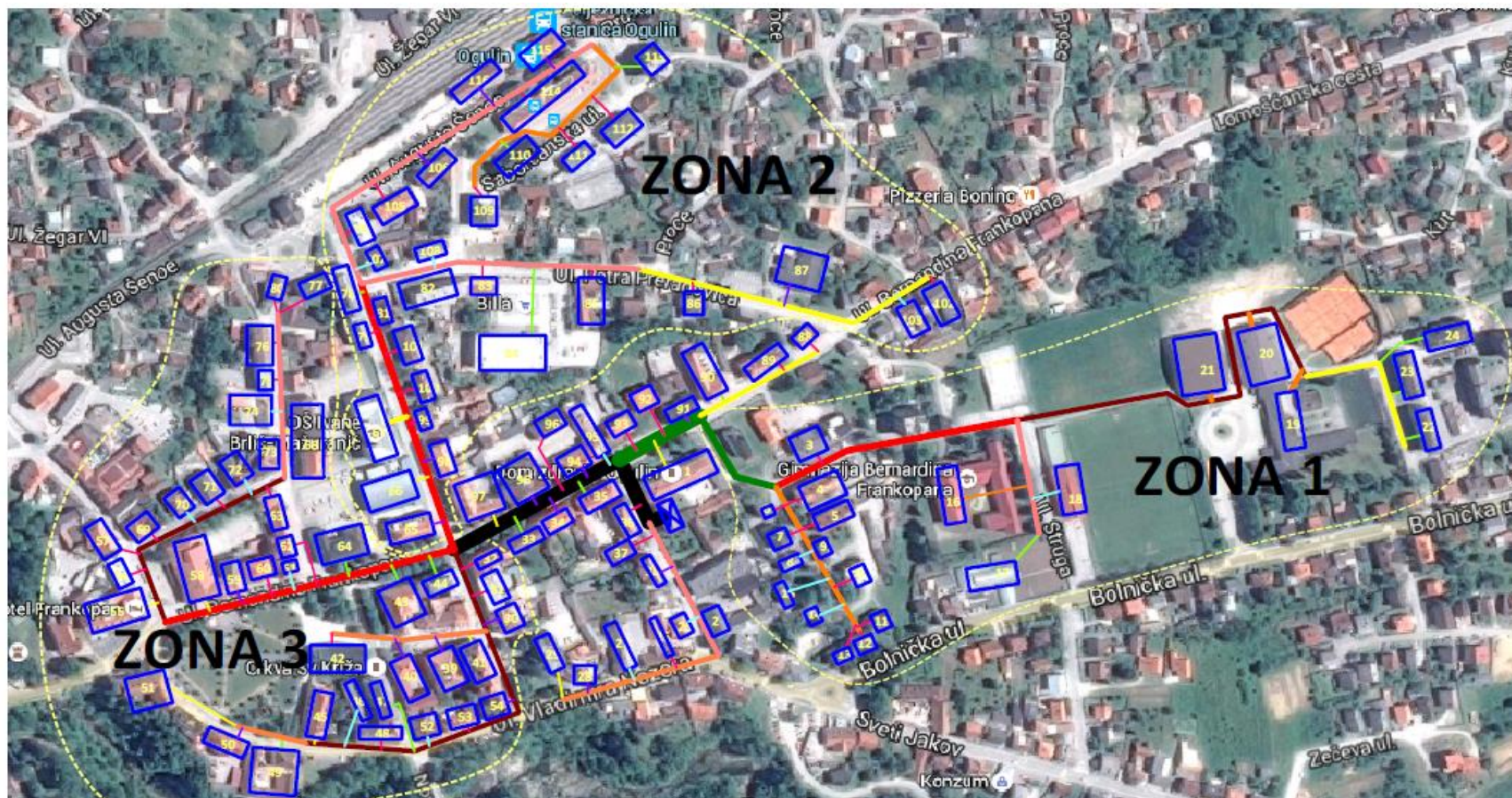
Slika 10., Slika 11. i Slika 12. prikazuju verzije distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda i priključaka; Verzija 1 je najveća, Verzija 2 je najmanja dok Verzija 3 uključuje samo objekte s već postojećim instalacijama potrebnim za uvođenje CTS-a.

Tablica 7. prikazuje podatke o duljini distribucijske mreže za svaku od 3 verzije.

Tablica 7. Podaci o duljini distribucijskih mreža

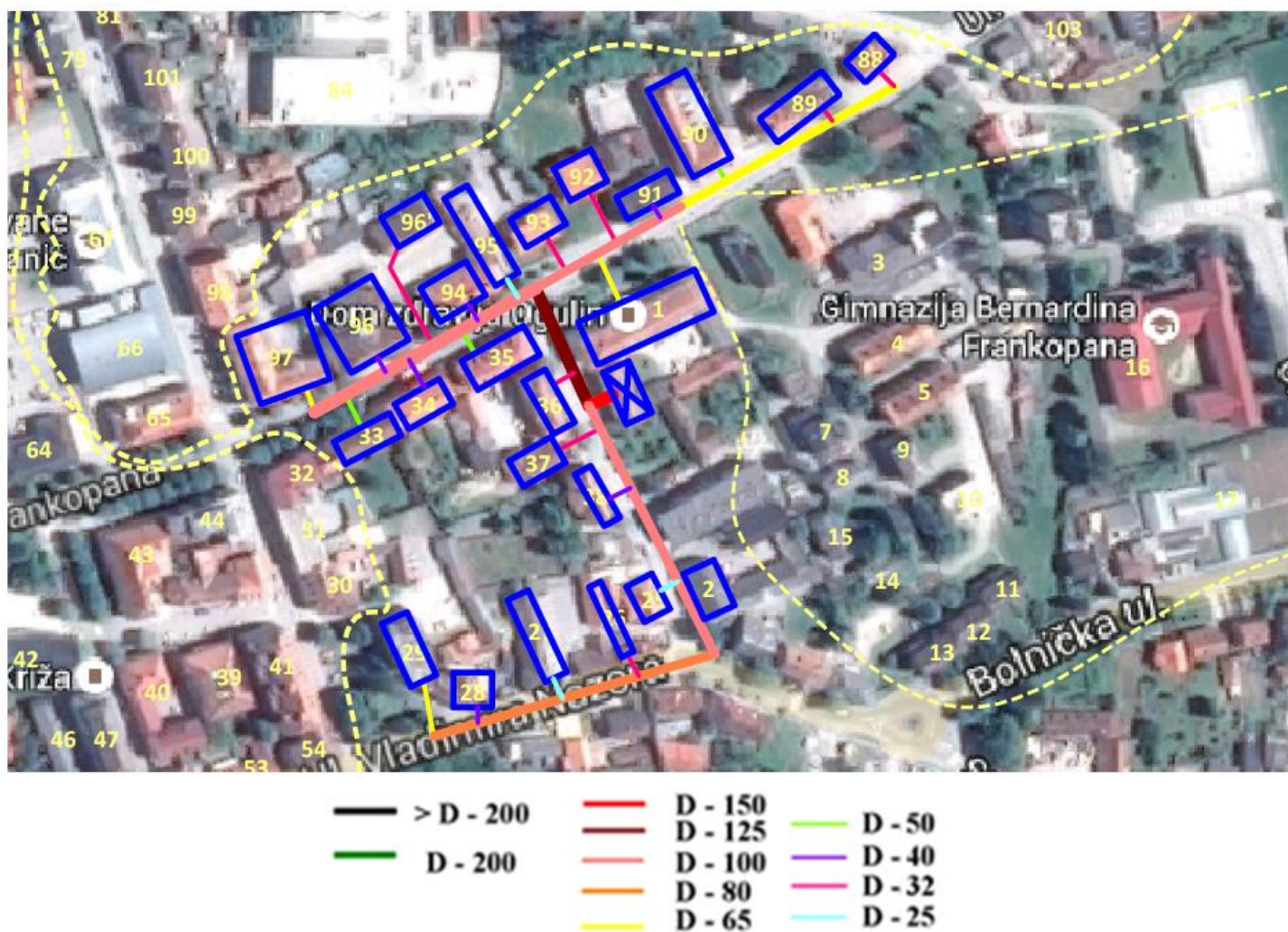
Broj verzije	Ukupna duljina [m]	Linearna gustoća toplinske energije [kWh/m]	Linearna gustoća vršnog toplinskog opterećenja [kW/m]
Verzija 1	5.179	3.516,4	2,41
Verzija 2	851	4.500,9	2,91
Verzija 3	4.516	3.557,9	2,46

Linearna gustoća toplinske energije i vršnog toplinskog opterećenja dobar su preliminarni podatak za određivanje isplativosti projekta. Najveća verzija ima i najdulju mrežu dok najmanja verzija ima najveću linearnu gustoću toplinske energije i vršnog toplinskog opterećenja.

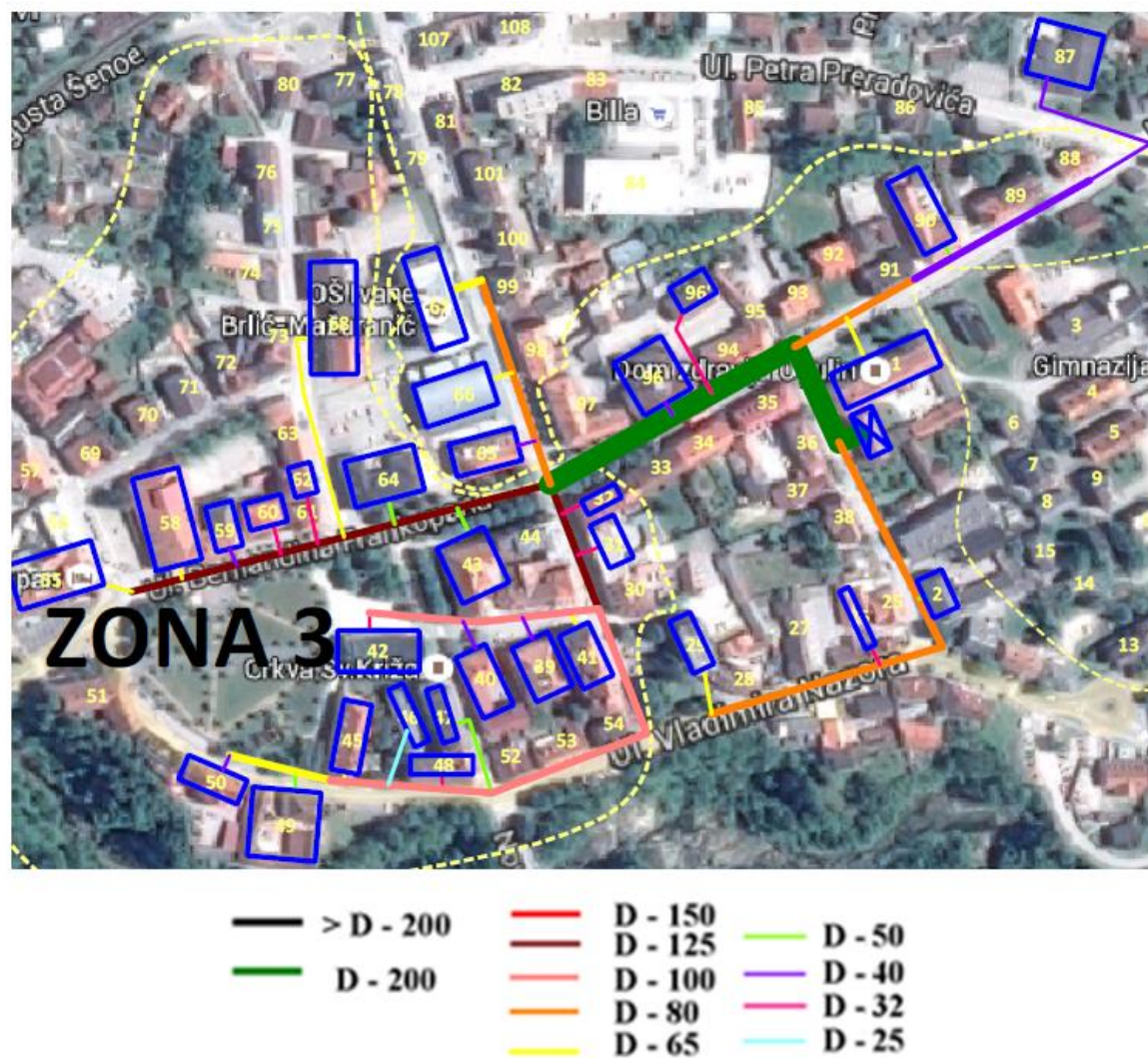


	> D - 200		D - 150		D - 50
	D - 200		D - 125		D - 40
			D - 100		D - 32
			D - 80		D - 25
			D - 65		

Slika 10. Verzija 1 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda



Slika 11. Verzija 2 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda



Slika 12. Verzija 3 distribucijskog sustava s ucrtanim nazivnim promjerima toplovoda

5. MATEMATIČKI MODEL OPTIMIZACIJE

5.1. Opis optimizacije

Nakon što su određene potrebe i potrošači, može se krenuti u optimizaciju sustava proizvodnje toplinske energije.

U sklopu ovoga rada korišten je program MATLAB [35], dok se za optimizaciju koristio optimizacijski alat; dodatak za MATLAB pod imenom OPTI Toolbox. Za provođenje optimizacije koristio se SCIP (*eng. Solving Constraint Integer Programs*) rješavač koji služi za rješavanje nelinearnih jednadžbi. OPTI Toolbox je besplatan program koji se jednostavno može preuzeti s web stranice [36]. MATLAB također posjeduje nelinearne rješavače, ali se SCIP pokazao kao bolje rješenje jer je brži i može garantirati globalni optimum funkcije.

5.2. Funkcija cilja

Zadaća optimizacije je pronaći minimum funkcije cilja. Ona predstavlja zbroj svih troškova i prikazana je jednadžbom (4):

$$z = \sum_{t=1}^N \frac{c_{biomasa} \cdot Q_{kotao}(t)}{\eta_{kotao}} + \sum_{t=1}^N \frac{c_{el.en.}(t) \cdot Q_{DT}(t)}{COP(T_{vanjska}, t)} + I_{spremnik} \quad (4)$$

Gdje je:

z – funkcija cilja [€]

t – vremenski trenutak [h]

N – broj vremenskih trenutaka [h]

$c_{biomasa}$ – cijena biomase [€/MWh]

$Q_{kotao}(t)$ – proizvodnja toplinske energije iz kotla na biomasu u vremenskom trenutku t [MWh]

η_{kotao} – učinkovitost kotla na biomasu [-]

$c_{el.en.}(t)$ – cijena električna energije ovisna o vremenskom trenutku t [€/MWh]

$Q_{DT}(t)$ – proizvodnja toplinske energije iz dizalice topline u vremenskom trenutku t [MWh]

$COP(T_{vanjska}, t)$ – faktor grijanja ovisan o vanjskoj temperaturi $T_{vanjska}$ [-]

$T_{vanjska}(t)$ – vanjska temperatura zraka, ovisna o vremenskom trenutku t [°C]

$I_{spremnik}$ – investicijski trošak u toplinski spremnik [€]

Varijable koje se optimiziraju su sljedeće: Q_{kotao} , $Q_{DT}(t)$ i $I_{spremnik}$. Pomoću ove optimizacije, dobiva se optimalni rad sustava i veličina spremnika, na način da se minimaliziraju troškovi pogona i investicija u spremnik. Prvi član jednadžbe (4) predstavlja trošak biomase za pogon kotla, drugi član predstavlja trošak električne energije potrebne za pogon dizalice topline, a zadnji član predstavlja investicijski trošak za toplinski spremnik.

Investicijski trošak spremnika je definiran jednadžbom (5):

$$I_{\text{spremnik}} = S_{\text{max}} \cdot c_{\text{spremnik}}(S_{\text{max}}) \quad (5)$$

Gdje je:

S_{max} – maksimalna napunjenost spremnika, odnosno njegov kapacitet (veličina) [MWh]

$c_{\text{spremnik}}(S_{\text{max}})$ – specifični investicijski trošak spremnika ovisan o njegovoj veličini [€/MWh]

Investicijski trošak spremnika je uzrok nelinearnosti jer specifična cijena spremnika cijena ovisi o veličini spremnika.

5.3. Modeliranje toplinskog spremnika

CTS radi na način da proizvodi toplinsku energiju i predaje je u distribucijsku mrežu, a višak toplinske energije se pohranjuje u toplinskom spremniku. Maksimalna energija predana u toplinski spremnik je jednaka 50% njegova kapaciteta i iznosi $Q_{\text{max_ulaz}}$. To se može zapisati jednadžbom (6):

$$Q_{\text{max,ulaz}} \geq Q_{\text{kotao}}(t) + Q_{DT}(t) \quad (6)$$

Gdje je:

$Q_{\text{max_ulaz}}$ – maksimalna moguća energija pohranjena u toplinski spremnik u jednom vremenskom trenutku (satu) [MWh]

Osim ograničenja vezanih za maksimalnu moguću pohranjenu energiju u jednom vremenskom trenutku, postoji i drugo ograničenje, koje je vezano za ukupnu energetska bilancu. Napunjenost spremnika u trenutku t se može prikazati jednadžbom (7):

$$S(t) = S(t-1) + Q_{\text{ulaz}}(t) - Q_{\text{potr.}}(t) = S(t-1) + S_{pp}(t) \quad (7)$$

Pri čemu je:

$S(t)$ – napunjenost spremnika u vremenskom trenutku t [MWh]

$S(t-1)$ – napunjenost toplinskog spremnika u prethodnom vremenskom trenutku [MWh]

$Q_{\text{ulaz}}(t)$ – proizvodnja toplinske energije iz svih jedinica u vremenskom trenutku t [MWh]

$Q_{\text{potr.}}(T_{\text{vanjska}}, t)$ – potražnja za toplinskom energijom u trenutku t [MWh]

$S_{pp}(t)$ – toplinska energija punjenja/praznjenja spremnika u vremenskom trenutku t , ako se spremnik puni onda je pozitivna, ako se spremnik prazni onda je negativna [MWh]

Jednadžba (7) se može opisati i riječima: napunjenost spremnika u vremenskom trenutku t je jednaka napunjenosti u prethodnom vremenskom trenutku umanjenoj za iznos praznjenja, odnosno uvećanoj za iznos punjenja spremnika.

Proizvodnja toplinske energije iz svih kapaciteta se može izračunati prema (8):

$$Q_{ulaz}(t) = Q_{kotao}(t) + Q_{DT}(t) \quad (8)$$

Pri čemu je:

$Q_{ulaz}(t)$ – ukupna proizvodnja toplinske energije u trenutku t

Napunjenost spremnika je ograničena maksimalnom i minimalnom napunjenošću spremnika. Maksimalna napunjenost spremnika iznosi S_{max} dok minimalna napunjenost, odnosno minimalno dopuštena napunjenost spremnika zavisi od tehnologije, ali za potrebe ovoga rada uzima se kao konstantna vrijednost neovisno o veličini i vrsti spremnika. Ograničenje na minimalnu i maksimalnu napunjenost se može prikazati jednadžbama (9) i (10):

$$S_0(S_{max}) + \sum_{t=1}^N Q_{ulaz}(t) - \sum_{t=1}^N Q_{potr.}(t) \leq S_{max} \quad (9)$$

$$S_0(S_{max}) + \sum_{t=1}^N Q_{ulaz}(t) - \sum_{t=1}^N Q_{potr.}(t) \geq S_{min} \quad (10)$$

Pri čemu je:

S_0 – početna napunjenost spremnika [MWh]

$\sum_{t=1}^N Q_{ulaz}(t)$ – suma svih toplinskih tokova na ulazu u spremnik [MWh]

$\sum_{t=1}^N Q_{potr.}(t)$ – suma svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika [MWh]

S_{max} – maksimalna napunjenost spremnika [MWh]

S_{min} – minimalna napunjenost spremnika [MWh]

Početna i minimalna napunjenost spremnika u funkciji su maksimalne veličine spremnika prikazane jednadžbama (11) i (12):

$$S_0(S_{max}) = \varepsilon_0 \cdot S_{max} \quad (11)$$

$$S_{min} = \varepsilon_{min} \cdot S_{max} \quad (12)$$

Gdje je:

ε_0 – udio početne napunjenosti spremnika [%]

ε_{min} – postotni udio minimalne napunjenosti spremnika [%]

U nastavku će biti pokazano da sezona grijanja traje 5.088 sati, tj. $N = 5.088$. Zbog ograničenja radne memorije, optimizacija je podijeljena na 4 dijela, odnosno 4 puta po 1027 sati. Svakih 1027 sati predstavlja kraj jedne optimizacije, tj. tada spremnik mora biti napunjen 50%. To uzrokuje grešku jer bi rezultati bili nešto drugačiji kada bi se cijela optimizacija odradila u punom vremenskom periodu; ovdje se radi o kvazi-optimizaciji. Jednadžba (13) je povezana s napunjenošću spremnika u zadnjem trenutku koje mora biti jednako napunjenosti u početnom trenutku.

Tada vrijedi da je suma svih toplinskih tokova na ulazu u spremnik jednaka zbroju svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika prema (13):

$$\sum_{t=1}^N Q_{ulaz}(t) = \sum_{t=1}^N Q_{potr.}(t) \quad (13)$$

5.4. Modeliranje dizalice topline

Faktor grijanja DT, $COP(T_{vanjska}, t)$, je funkcija vanjske temperature, odnosno vremena t . Modeliranje faktora grijanja se vrši prema jednadžbi (14):

$$COP = \frac{\text{Korisna toplina}}{\text{Uložena energija}} = \frac{T_1}{T_1 - T_{vanjska}} \cdot \varepsilon_{DT} \quad (14)$$

Gdje je:

$T_{vanjska}$ – vanjska srednja temperaturra zraka [K]

T_1 – viša temperatura u radu DT [K]

ε_{DT} – faktor stvarnog stupnja djelovanja DT, iskustvena vrijednost [%]

DT nema ograničenje vezano za tehnički minimum toplinske snage, stoga vrijedi (15) :

$$0 \leq Q_{DT}(t) \leq Q_{DT,max} \quad (15)$$

Pri čemu je:

$Q_{DT,max}$ – instalirana toplinska snage DT [MW]

5.5. Modeliranje kotla na biomasu

Kotao na biomasu ne može raditi ispod tehničkog minimuma. U optimizacijskom modelu će se maksimalna toplinska snaga modelirati kao najveća moguća toplinska snaga koja se može dostaviti do potrošača; odnosno to je instalirana snaga kotla umanjena za ukupne termodinamičke gubitke. Isto vrijedi i za minimalnu snagu; minimalna snaga u optimizacijskom modelu je definirana kao minimalna toplinska snaga koju kotao može dostaviti do potrošača. To se može opisati jednadžbom (16):

$$Q_{kotao,min} \leq Q_{kotao}(t) \leq Q_{kotao,max} \quad (16)$$

Gdje je:

$Q_{kotao,min}$ – minimalna dostavna toplinska snaga kotla [MW]

$Q_{kotao,max}$ – maksimalna dostavna snaga kotla [MW]

Minimalna dostavna snaga kotla se računa prema (17):

$$Q_{kotao,min} = Q_{kotao,max} \cdot \varepsilon_{kotao,min} \quad (17)$$

Gdje je:

$\varepsilon_{kotao,min}$ – udio minimalne dostavne snage kotla [%]

Koeficijent učinkovitosti kotla η_{kotala} u stvarnosti ovisi o trenutnoj snazi kotla. Pošto se učinkovitost kotla vrlo malo mijenja s promjenom njegove snage, tj. ne utječe puno na točnost rezultata, a njegovim modeliranjem se uvode dodatne varijable, nelinearnosti i usporava se proces optimizacije, odlučeno je da se učinkovitost kotla postavi kao konstantna vrijednost.

6. SCENARIJSKA ANALIZA

Prije nego što se prikažu pojedinosti svakog scenarija biti će prikazani podaci potrebni za kreiranje scenarija; satno toplinsko opterećenje i definicije kapaciteta proizvodnih postrojenja.

6.1. Opis podataka potrebnih za scenarijsku analizu

6.1.1. Satno toplinsko opterećenje

Kako bi se mogla provesti optimizacija potrebno je poznavati satno toplinsko opterećenje. Mapiranjem potreba, prikupljeni su podaci o ukupnoj toplinskoj potrošnji toplinske energije za čitavu godinu, ovisno o verzijama distribucijskog sustava. Pomoću stupanj-sat analize može se dobiti satno toplinsko opterećenje iz kojeg se precizno može dobiti i vršno godišnje toplinsko opterećenje koje se kod mapiranja potreba dobilo pretpostavkom da je ono jednako umnošku 90% neto volumena i konstante od 40 W/m^3 .

Satno toplinsko opterećenje, se može izračunati pomoću jednadžbe (18):

$$STP = \left(\frac{Q_{god}}{\sum SS} \right) \cdot SS = Q_{potr} \quad (18)$$

Pri čemu je:

STP – satno toplinsko opterećenje [MWh]

Q_{god} – godišnja potrošnja toplinske energije, dobiveno preko mapiranja toplinskih potreba, ovisno o verziji distribucijske mreže [MWh]

SS – stupanj sat [$^{\circ}\text{C}$]

Stupanj-sat SS se definira pomoću (19):

$$SS = T_{projektna} - T_{vanjska} \quad (19)$$

Gdje je:

$T_{projektna}$ – projektna temperatura prostora za grijanje [$^{\circ}\text{C}$]

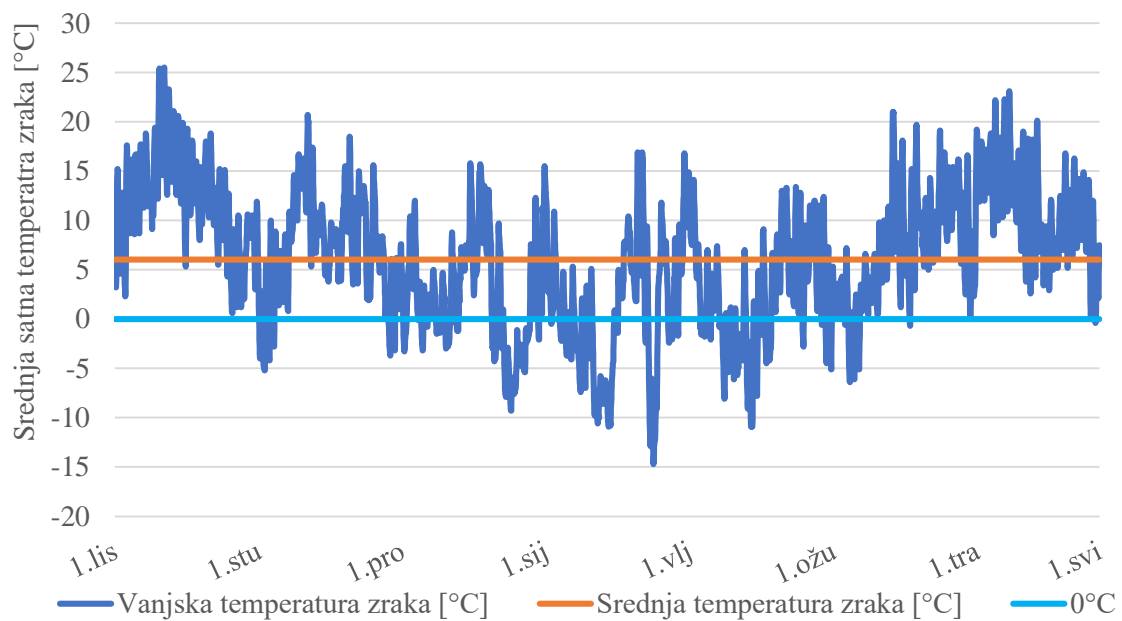
$T_{vanjska}$ – vanjska temperatura zraka, ovisi o vremenskom trenutku [$^{\circ}\text{C}$]

Projekta temperatura $T_{projektna}$ je iskustvena vrijednost i iznosi 21°C

Važno je odrediti sezonu grijanja i način rada, odnosno paljenja CTS-a kroz dan. Kako bi se mogli odrediti uvjeti rada na satnoj razini, uvode se sljedeće pretpostavke:

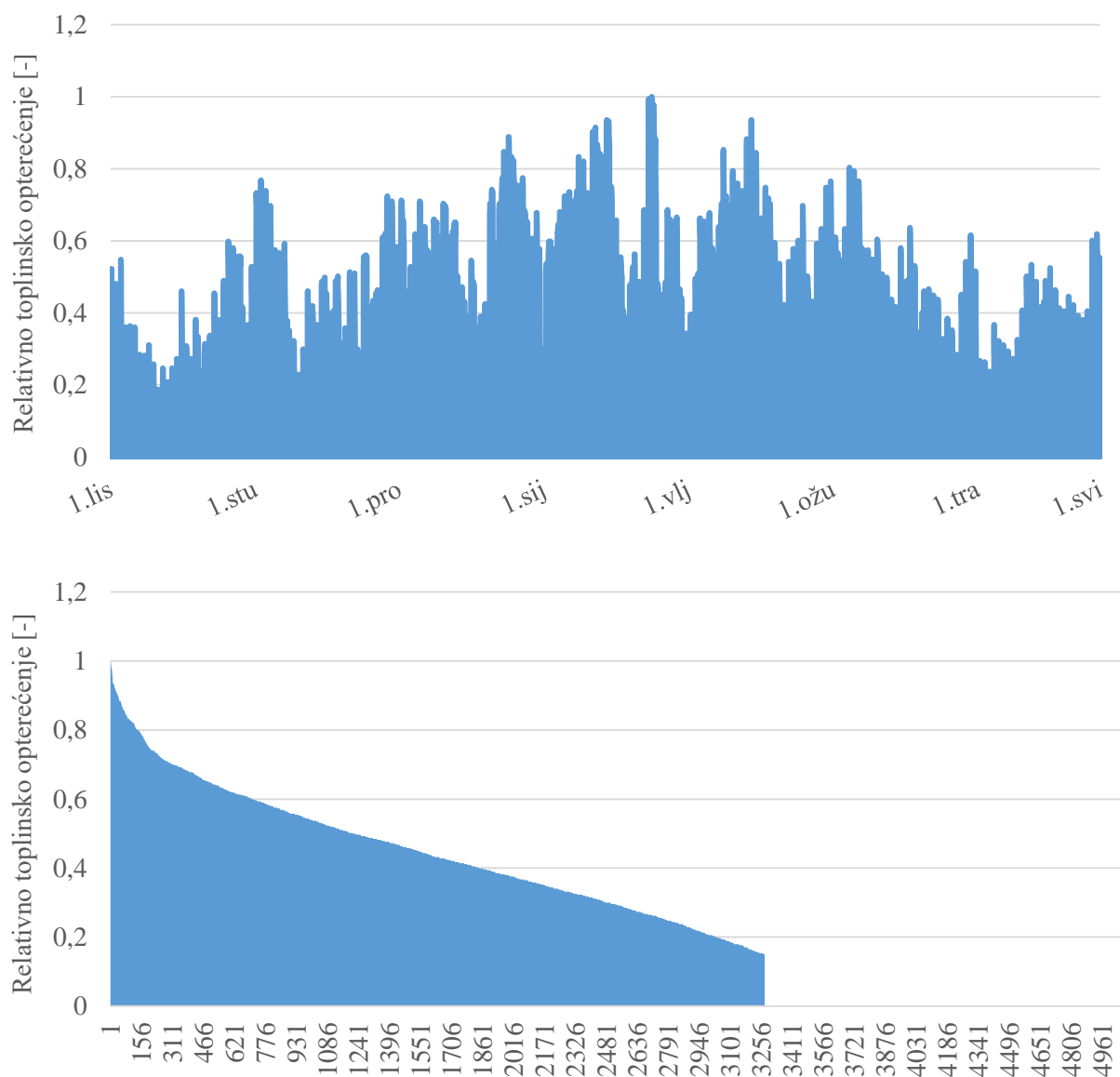
- CTS ne radi od 1.5. do 1.10. što znači da sezona grijanja traje od 1.10. do 1.5. odnosno 5088 sati
- CTS radi od 5 do 23 sata, u ostalim trenucima ne radi
- ako tijekom sezone grijanja vrijednost vanjske temperature *Tvanjska* dođe poraste iznad 16°C , CTS se gasi
- ako tijekom sezone grijanja, u periodu od 23 do 5 sata vanjska temperatura iznosi manje od -15°C , tada se CTS pali, ali projektna unutrašnja temperatura tada iznosi 15°C .

Vanjska temperatura *Tvanjska* za područje grada Ogulina dobivena je pomoću programa Meteororm [37] koji sadrži bazu meteoroloških podataka za određena mjesta na Zemlji. Oni položaji na planeti koji nemaju vlastitu meteorološku stanicu se modeliraju statističkim alatima u samome programu. U Ogulinu se nalazi meteorološka stanica koja mjeri temperaturu zraka, ali ne i Sunčevo zračenje. Slika 13. prikazuje srednje satne temperature zraka u sezoni grijanja na području grada Ogulina.



Slika 13. Srednje vanjske temperature u gradu Ogulinu, sezona grijanja [37]

Pomoću ovih podataka može se dobiti distribucija stupanj-sata SS i toplinskog opterećenja Q_{potr} . Osim toga, dobiveni su i podaci o maksimalnom i minimalnom toplinskom opterećenju $Q_{potr,max}$, i $Q_{potr,min}$. Satna distribucija Q_{potr} se može prikazati pomoću relativnih vrijednosti, gdje 1 predstavlja maksimalno sezonsko opterećenje $Q_{potr,max}$, a minimalna vrijednost na dijagramu predstavlja minimalno toplinsko opterećenje $Q_{potr,min}$. Slika 14. prikazuje relativno toplinsko opterećenje za sezonu grijanja.



Slika 14. Relativno toplinsko opterećenje

Tablica 8. prikazuje podatke o toplinskom opterećenju prema Verzijama distribucijskog sustava.

Tablica 8. Maksimalno i minimalno toplinsko opterećenje po verzijama distribucijskog sustava

	Verzija distribucijskog sustava		
	Verzija 1	Verzija 2	Verzija 3
Maksimalno toplinsko opterećenje, $Q_{potr,max}$ prema stupanj satu [MW]	12.389	2.607	4.437
Pogreška stupanj sat/REGEA [%]	0,9	5	1,8
Minimalno relativno toplinsko opterećenje [%]	15		
Minimalno toplinsko opterećenje [MW]	1.854	0,390	0,663
Broj sati u sezoni grijanja [h]	5088		

Tablica 8. pokazuje da su pretpostavke o vršnoj toplinskoj snazi donesene pri mapiranju bile točne, najveća greška iznosi samo 5%, za najmanju verziju, dok najmanja iznosi 0,9% kod najveće verzije. Minimalno relativno toplinsko opterećenje iznosi 15% i jednako je za svaku verziju jer je distribucija toplinskog opterećenja rađena metodom stupanj-sata.

6.1.2. *Određivanje minimalne i maksimalne snage kotla na biomasu*

Kako bi se odredio $Q_{kotoa,max}$ koristit će se jednostavan empirijski izraz (21). Maksimalno toplinsko opterećenje $Q_{potr,max}$ dobiveno je pomoću metodologije stupanj-sat. Maksimalna toplinska dostavna snaga kotla je prema (20) jednaka:

$$Q_{kotoa,max} = Q_{potr,max} \cdot \varepsilon_{kotoa,max} \quad (20)$$

Gdje je:

$\varepsilon_{kotoa,max}$ – omjer vršnog opterećenja i maksimalne dostavne snage kotla [-]

Minimalna dostavna snaga kotla je jednaka nuli kada kotao ne radi, ali pri radu kotao ne može raditi ispod tehničkog minimuma jer se pri niskim opterećenjima povećavaju nedozvoljene emisije [27]. Premda trenutno najbolji kotlovi imaju mogućnost raditi na 10% maksimalne snage, tipični kotlovi na biomasu imaju područje rada od 25% do 100% punog kapaciteta. Stoga će kotao korišten pri ovoj optimizaciji imati tehnički dostavni minimum jednak 30% maksimalne dostavne snage [35] prema jednadžbi (21).

$$Q_{kotoa,min} = Q_{kotoa,max} \cdot \varepsilon_{kotoa,min} = 0,3 \cdot Q_{kotoa,max} \quad (21)$$

Gdje je:

$\varepsilon_{kotoa,min}$ – omjer minimalne i maksimalne dostavne snage kotla [-]

$\varepsilon_{kotoa,min}$ je konstantan za svaki scenarij zato jer predstavlja tehničku karakteristiku kotla.

Minimalna dostavna snaga kotla iznosi 30% maksimalne dostavne snage kotla dok minimalno relativno toplinsko opterećenje iznosi samo 15%, tako da se već u ovome trenutku može zaključiti kako je potrebno instalirati toplinski spremnik određenog kapaciteta. Naime, višak toplinske energije koju kotao proizvede pri minimalnom opterećenju mora biti pohranjen.

Situacija koja nije obuhvaćena ovom optimizacijom je gašenje kotla. U stvarnosti, kada se kotao ugasi (prekine se dotok biomase), on još uvijek proizvodi određenu toplinu, uslijed ugrijanog žara i stjenki kotla; postoji određena inercija. Isti princip vrijedi i pri hladnom startu kotla, stjenke kotla su hladne i potrebno je određeno vrijeme da se postigne tražena snaga. U tim situacijama kotao će raditi ispod tehničkog minimuma i takvi slučajevi nisu obuhvaćeni ovom optimizacijom.

6.1.3. *Određivanje maksimalne snage dizalice topline*

Dizalica topline nema tehnički minimum, odnosno ona može raditi 0-100% opterećenja. Maksimalna snaga dizalice topline je određena ovisno o scenariju kao što će biti prikazano u nastavku. Potrebno je poznavati sljedeće parametre: T_1 je konstantna i iznosi 373 K (100°C), faktor stvarnog stupnja djelovanja ε_{DT} je također odabran i iznosi 0,55.

6.1.4. Kapacitet toplinskog spremnika

Veličina toplinskog spremnika se ne određuje unaprijed, već je ona optimizacijska varijabla, tj. jedan od rezultata optimizacije uz način rada sustava je i njegov kapacitet. Jedino ograničenje veličine toplinskog spremnika će biti njegove geometrijske mjere. Taj problem će biti prikazan u poglavlju Rezultati. Scenarij gdje veličina spremnika neće biti optimizirana je Scenarij 3 gdje će toplinski spremnik unaprijed biti određen ovisno o tome kolika je proizvodnja toplinske energije iz kolektora kada CTS ne radi, odnosno u ljetnom razdoblju.

Jedini parametar koji je potrebno definirati za toplinski spremnik je njegova minimalna napunjenost, ε_{min} koja je konstanta i iznosi 0,15.

Uz to je potrebno definirati i početnu, odnosno krajnju napunjenost spremnika ε_0 , koja je također konstantna i iznosi 0,5, što znači da je na početku i na kraju svakog intervala optimizacije spremnik napunjen 50%.

Iskoristivost spremnika iznosi 98%.

6.1.5. Modeliranje proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora

U Scenariju 3 biti će korišteni solarni kolektori. Kako bi se izračunala ukupna proizvedena toplinska energija iz kolektora potrebno je poznavati podatke o sunčevom zračenju na traženoj lokaciji za što se ponovno koristio program Meteororm. Kao što je rečeno, u Ogulinu postoji meteorološka postaja za mjerenje temperature, ali ne postoji opcija za mjerenje solarnog zračenja zbog čega podaci iz Meteororma nisu sasvim precizni; dobiveni su statističkim usrednjavanjem podataka iz okolnih meteoroloških postaja. Prikupljeni su sljedeći podaci: horizontalno globalno zračenje G_{glob} , horizontalno difuzno zračenje G_{dif} i horizontalno direktno zračenje G_{dir} . Globalno zračenje na neki način predstavlja zbroj ostalih triju zračenja kao što će biti pokazano u nastavku.

Odlučeno je da će solarni kolektori biti fiksno ugrađeni, djelomično na zemlju, odnosno krovove zgrada. Zbog toga je potrebno solarne kolektore postaviti pod odgovarajući nagib β ; osim toga potrebno je odabrati u koji će dio neba biti usmjereni. Kut koji označava prema kojoj strani svijeta je kolektor okrenut, se naziva azimut, γ . Iznos 0° označava sjever, istok 90° , jug 180° , a zapad označava 270° . Pomoću programa PV GIS [41] se odredio optimalni kut β i azimut (Tablica 9.) [41].

Tablica 9. Optimalni kut nagiba i azimuta za kolektor postavljen u Ogulinu

	Nagib β	Azimut γ
Optimalni kut [°]	33	180

Podaci o zračenju su prikupljeni za horizontalnu površinu, odnosno za kut nagiba β jednak nuli. Potrebno je preračunati zračenje za određeni kut nagiba. Prema [42] vrijedi jednačba (22):

$$G_{glob,\beta} = G_{dir,\beta} + G_{dif,\beta} + G_{ref,\beta} \quad (22)$$

Gdje je:

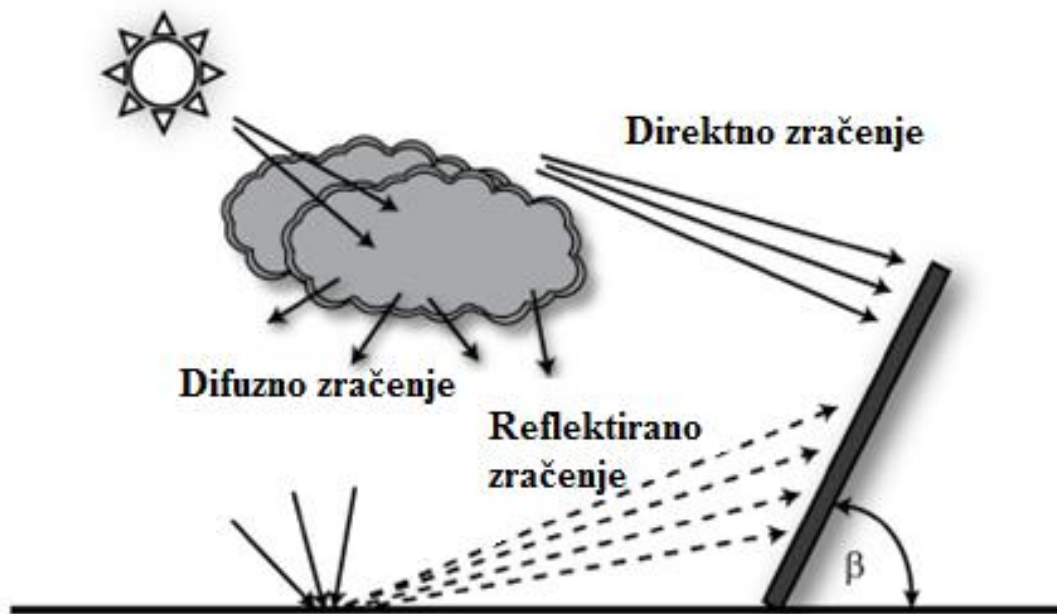
$G_{glob,\beta}$ – globalno zračenje za kut nagiba β [W/m^2]

$G_{dir,\beta}$ – direktno zračenje za kut nagiba β [W/m^2]

$G_{dif,\beta}$ – difuzno zračenje za kut nagiba β [W/m^2]

$G_{ref,\beta}$ – reflektirano zračenje za kut nagiba β [W/m^2]

Slika 15. prikazuje razliku između pojedinih vrsta zračenja.



Slika 15. Ilustracija direktnog, difuznog i reflektiranog zračenja [42]

Direktno zračenje se prema [42] može vrlo jednostavno izračunati jer se radi o čistom geometrijskom odnosu. Jedini ulazni podaci su kut nagiba β , kut azimuta za postavljeni kolektor γ te kutevi azimuta i elevacije Sunca kroz promatrani period (u ovom slučaju godinu dana). Elevacija se definira slično kao i azimut, samo što ona označava kut povezan s visinom sunca, kut od 90° označava zenit, dok izlazak/zalazak Sunca označavaju elevaciju od 0° .

Direktno zračenje za nagibni kut β se može dobiti pomoću jednačbe (23):

$$G_{dir,\beta} = G_{dir} \cos\theta \quad (23)$$

Pri čemu je:

G_{dir} – direktno zračenje na horizontalnu plohu [W/m^2]

Slika 16. prikazuje definiciju kuta θ , označava kut između normale na površinu i trenutnog položaja Sunca na nebu [42], a $\cos\theta$ se može izračunati jednadžbom (24):

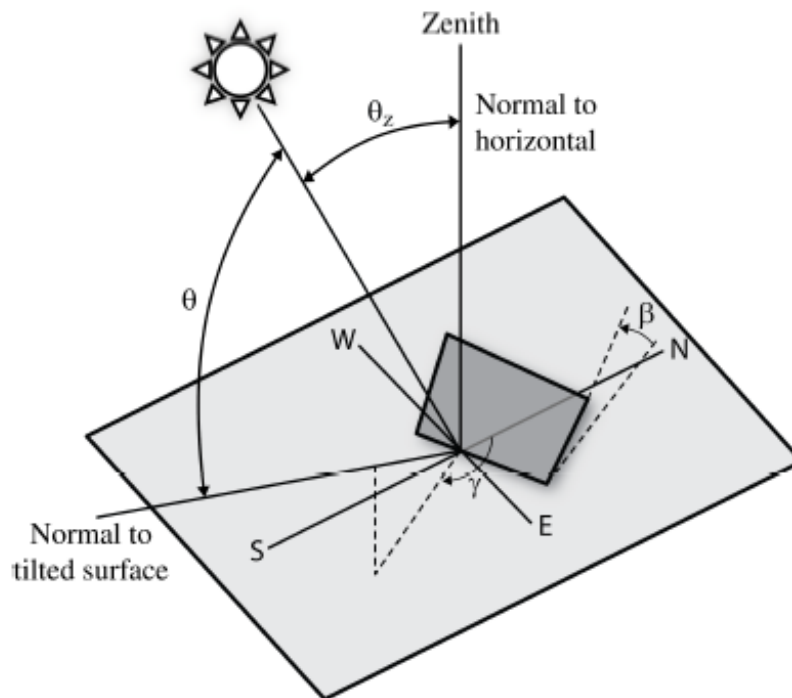
$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (24)$$

Pri čemu je:

θ – kut između Sunca i normale na površinu pd nagibom [$^\circ$]

θ_z – kut zenita, odnosno kut od 90° umanjen za kut elevacije Sunca θ_s [$^\circ$]

γ_s – kut azimuta Sunca [$^\circ$]



Slika 16. Pojašnjenje kutova vezanih za izračun direktnog zračenja na plohu pod određenim nagibom [42]

Za difuzno zračenje je u [42] preporučeno nekoliko empirijskih izraza, u ovome radu će biti korišten izraz (25):

$$D_{dif,\beta} = D_{dif} \cdot R_d \quad (25)$$

Pri čemu je:

R_d – omjer difuznog zračenja na nagnutu površinu i difuznog zračenja na horizontalnu površinu [-]

Reflektirano zračenje se računa preko difuznog zračenja i albeda okoline pomoću jednadžbe (26):

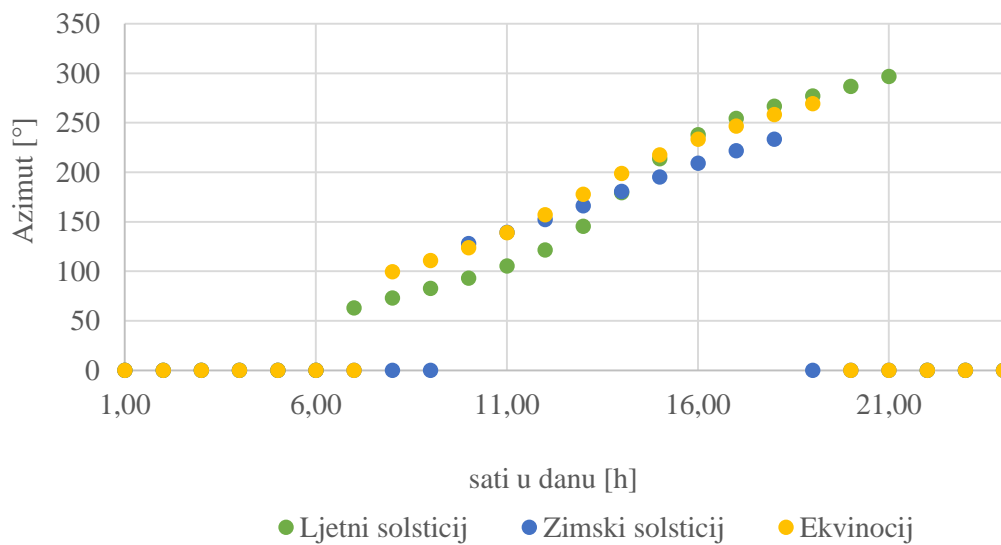
$$G_{ref,\beta} = \rho_{albedo} \cdot G_{dif} \cdot R_d \tag{26}$$

Pri čemu je:

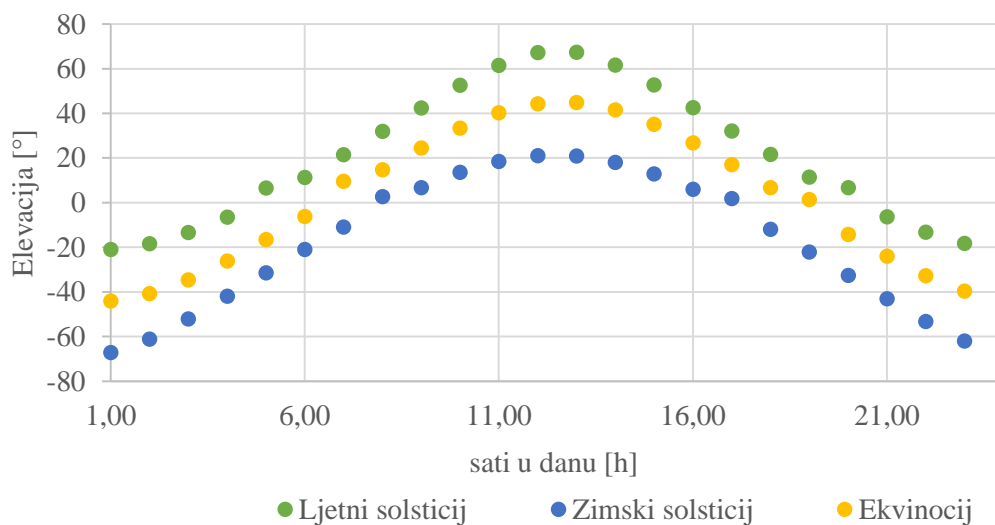
ρ_{albedo} – albedo okoline [-]

Iznos albeda je odabran i iznosi 0,15.

Podaci o elevaciji Sunca θ_s , i azimutu γ_s prikupljeni su pomoću SunEarth Tools-a [43]. Kao ulazni podatak potrebno je odabrati mjesto na Zemlji i godina za koju se žele dobiti podaci o satnom položaju Sunca. Odabrani su podaci za 2015. godinu; elevacija i azimut Sunca ne variraju puno i neće utjecati na rezultate. Slika 17. i Slika 18. prikazuju prikupljene podatke za 3 karakteristična dana u godini: ljetni i zimski solsticij te ekvinocij.



Slika 17. Azimut Sunca za grad Ogulin



Slika 18. Elevacija Sunca za grad Ogulin

Znajući sve parametre, može se izračunati globalno sunčevo zračenje za površinu pod nagibom. Kako bi se dobila specifična efektivna snaga solarnog kolektora (dobavna specifična toplinska snaga kolektora) potrebno je izračunati njegovu efikasnost prema jednadžbi (27) [38]:

$$\eta_{kol} = \eta_o - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_{vanjska})}{G_{glob,\beta}} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_{vanjska})^2}{G_{glob,\beta}} \quad (27)$$

Pri čemu je:

η_{kol} – učinkovitost solarnog kolektora [-]

η_o – maksimalna učinkovitost ako nema toplinskih gubitaka, optička učinkovitost (*eng. optical efficiency*) [-]

a_1 – koeficijent toplinskih gubitaka 1. reda [W/(K m²)]

T_m – srednja temperatura radnog medija solarnog kolektora [°C]

$T_{vanjska}$ – temperatura okoliša (zraka) [°C]

a_2 - koeficijent toplinskih gubitaka 2. reda [W/(K² m²)]

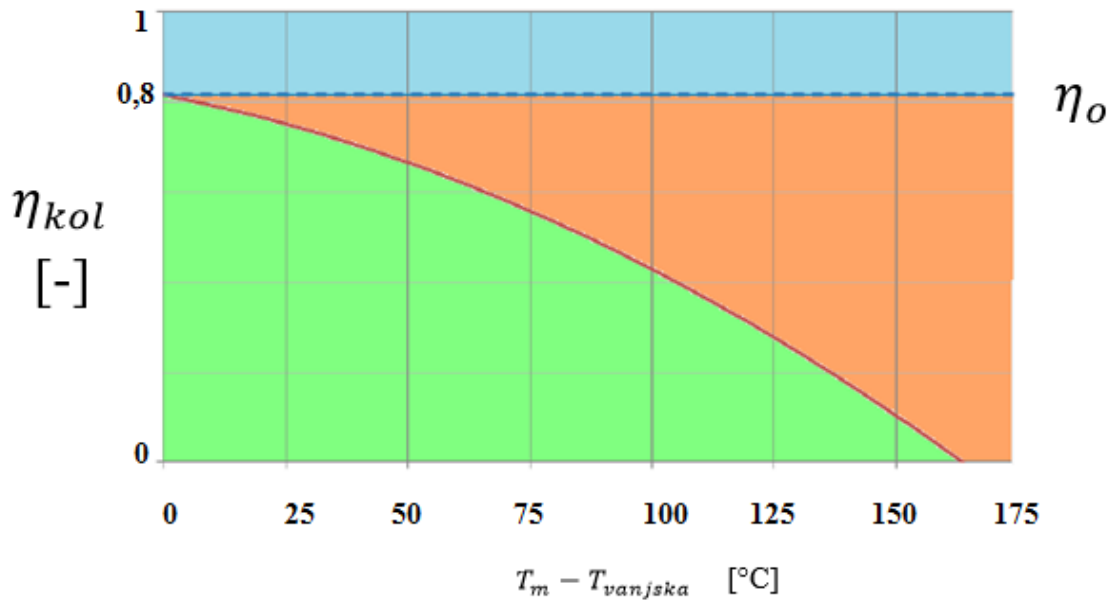
Problem je u tome što su koeficijenti toplinskih gubitaka dinamičke varijable jer ovise o globalnoj ozračenosti, a srednja temperatura radnog medija je također dinamička varijabla jer ovisi o više parametara kao što je temperatura zraka, trenutno opterećenje, protok radnog medija itd. Za potrebe ovoga rada ti se parametri uzimaju kao konstantne vrijednosti.

Optička učinkovitost η_o kao i koeficijenti a_1 i a_2 , ovise o vrsti solarnih kolektora. Tablica 10. prikazuje okvirne vrijednosti. Detaljniji podaci o pločastim kolektorima (FPC) i kolektorima s vakumskom cijevi (ETC) mogu se dobiti pomoću [45].

Tablica 10. Okvirne vrijednosti za različite vrste solarnih kolektora [30]

Tip kolektora	η_o [-]	a_1 [W/(K m ²)]	a_2 [W/(K ² m ²)]
Visokokvalitetni ETC	0,75	1,0	0,005
Visokokvalitetni FPC	0,8	3,0	0,008
Uobičajeni FPC	0,75	4,0	0,010

Slika 19. prikazuje ilustraciju jednadžbu (27).



Slika 19. Prikaz učinkovitosti kolektora (zeleno), toplinskih gubitaka (crveno) i optičkih gubitaka (plavo) s ovisnošću srednje temperaturne razlike radnog medija i zraka [30]

Specifična efektivna snaga solarnog kolektora pod određenim nagibnom kutom β dobiva se pomoću jednadžbe (28):

$$p_{kol} = \eta_{kol} \cdot G_{glob,\beta} \tag{28}$$

Pri čemu je:

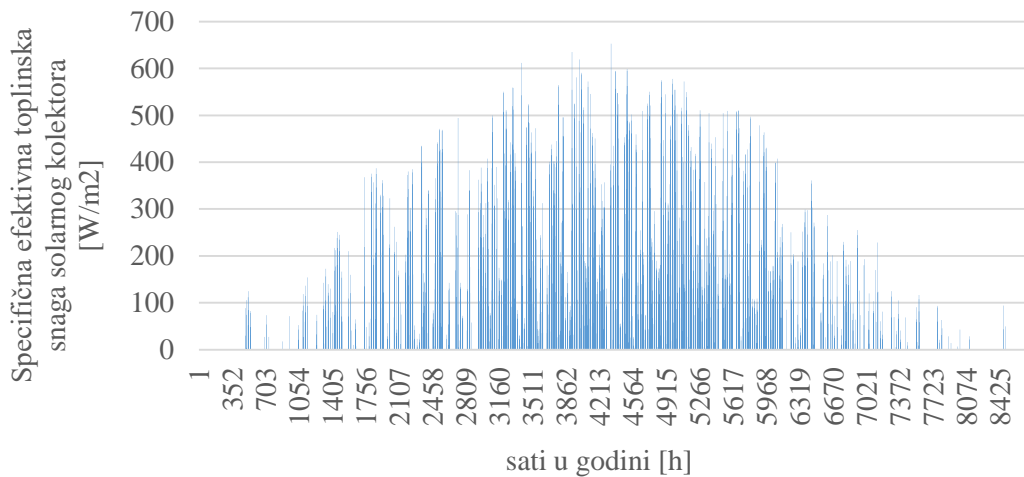
p_{kol} – specifična korisna toplinska snaga kolektora [W/m^2]

Tablica 11. prikazuje odabrane parametre.

Tablica 11. Parametri korišteni pri računanju satne distribucije korisne toplinske snage solarnog kolektora

		Vrsta parametra					
	Tip kolektora	η_o [-]	a_1 [$W/(K m^2)$]	a_2 [$W/(K^2 m^2)$]	T_m [$^{\circ}C$]	T_a [$^{\circ}C$]	$G_{glob,\beta}$ [W/m^2]
Vrijednost	Pločasti kolektor	0,8	3	0,008	80	Meteonorm	Meteonorm i [50]

Slika 20. prikazuje satnu distribuciju specifične efektivne toplinske snage odabranog solarnog kolektora.



Slika 20. Satna distribucija specifične efektivne toplinske snage solarnog kolektora

Ukupna godišnja specifična efektivna toplinska energija iz kolektora iznosi 351,9 kWh/m². Prema [44], realne vrijednosti iznose primjerice 335 kWh/m² za Dansku, 340 kWh/m² za Mađarsku i 334 kWh/m² za Austriju. Temeljem toga se može zaključiti da je ovaj model dobro postavljen.

6.2. Opisi scenarija

U sklopu zadatka ovoga rada potrebno je napraviti 3 scenarija proizvodnje toplinske energije koje uključuju kotao na biomasu, toplinski spremnik, dizalicu topline i solarne kolektore. Tablica 12. prikazuje opise scenarija.

Tablica 12. Opisi scenarija

Ime scenarija	Opis scenarija
Scenarij 1	Kotao + toplinski spremnik
Scenarij 2	Kotao + toplinski spremnik + dizalica topline
Scenarij 3	Kotao + toplinski spremnik + dizalica topline + solarni kolektori

6.2.1. Scenarij 1 – kotao na biomasu u kombinaciji s toplinskim spremnikom

Ovaj scenarij je napravljen za sve 3 vrste distribucijske mreže. Scenarij uključuje samo kotao na biomasu i toplinski spremnik. Kotao na biomasu ima maksimalnu dostavnu snagu jednaku 120% $Q_{potr,max}$, tj. $\epsilon_{kotao,max}$ iznosi 1,2. Tablica 13. prikazuje detaljne podatke o snazi kotla za svaku pojedinu verziju distribucijskog sustava.

Tablica 13. Scenarij 1 – minimalna i maksimalna dostavna snaga kotla

Verzija distribucijskog sustava	$Q_{kotao,max}$ [MW]	$Q_{kotao,min}$ [MW]
Verzija 1	15	4,5
Verzija 2	3,2	1
Verzija 3	5,5	1,7

U skladu s ovim podacima provedena je optimizacija, gdje je određena veličina toplinskog spremnika, a potom napravljena tehno-ekonomska analiza. Najisplativija verzija odabrana je za optimizaciju u Scenariju 2; uvođenje dizalice topline.

6.2.2. Scenarij 2 – kotao na biomasu i dizalica topline u kombinaciji s toplinskim spremnikom

Nakon što je određeno koja je distribucijska mreža iz Scenarija 1 najpovoljnija, u sustav se dodaje dizalica toplina snage 0,5 MW toplinske snage. Izrađeno je 5 kombinacija kotla na biomasu i dizalice topline na način da ukupni toplinski kapacitet sustava bude jednak 120% maksimalnog toplinskog opterećenja pa do 80% maksimalnog toplinskog opterećenja. Snaga kotla je određena na način da se od ukupne instalirane snage oduzme snaga DT, tj. 0,5 MW. Tablica 14. prikazuje kombinacije Scenarija 2.

Tablica 14. Verzije Scenarija 2

Verzije Scenarija 2	Snaga DT [MW]	Snaga kotla [MW]
Kombinacija 1 – 120% $Q_{potr,max}$	0,5	$1,2 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$
Kombinacija 2 – 110% $Q_{potr,max}$	0,5	$1,1 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$
Kombinacija 3 – 100% $Q_{potr,max}$	0,5	$1,0 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$
Kombinacija 4 – 90% $Q_{potr,max}$	0,5	$0,9 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$
Kombinacija 4 – 85% $Q_{potr,max}$	0,5	$0,85 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$
Kombinacija 5 – 80% $Q_{potr,max}$	0,5	$0,8 \cdot Q_{potr,max} - 0,5$

U rezultatima će biti prikazano koja je kombinacija najisplativija s praktične i financijske točke gledišta.

6.2.3. Scenarij 3 – kotao na biomasu i dizalica topline u kombinaciji s toplinskim spremnikom i solarnim kolektorima

Sljedeći korak je integracija solarnih kolektora u sustav. Na početku poglavlja prikazana je metodologija izračuna specifične efektivne toplinske snage solarnog kolektora. Kako bi odredili ukupnu proizvedenu toplinu iz solarnih kolektora potrebno je samo znati njihovu korisnu

površinu. Ukupna efektivna toplinska snaga solarnih kolektora dobiva se koristeći jednadžbu (29):

$$P_{kol} = p_{kol} \cdot A_{kol} = \eta_{kol} \cdot G_{glob,\beta} \cdot A_{kol} \quad (29)$$

Pri čemu je:

P_{kol} – ukupna efektivna toplinska snaga kolektora [W]

A_{kol} – korisna površina kolektora [m²]

Kako bi se odredila veličina spremnika potrebno je izračunati koliko toplinske energije mogu proizvesti solarni kolektori za vrijeme ljetnog razdoblja, tj. kada CTS ne radi (od 1.5. do 1.10.).

Veličina toplinskog spremnika je u tom slučaju određena jednadžbom ((30):

$$S_{kolektor} = \sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol} \cdot A_{kol} = \sum_{1.5.}^{1.10.} \eta_{kol} \cdot G_{glob,\beta} \cdot A_{kol} \quad (30)$$

Pri čemu je:

$S_{kolektor}$ – kapacitet spremnika potreban da se pohrani toplinska energija koju proizvedu solarni kolektori u periodu 1.5. – 1.10. [MWh]

$\sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol}$ – specifična efektivna toplinska energija solarnog kolektora za period 1.5. – 1.10.

Kako bi se odredila ukupna proizvodnja toplinske energija iz solarnih kolektora, odnosno veličina sezonskog toplinskog spremnika, potrebno je odrediti udio toplinske energije proizvedene pomoću solarnih kolektora $f_{kolektor}$ (eng. solar fraction). Tablica 15. prikazuje verzije Scenarija 3.

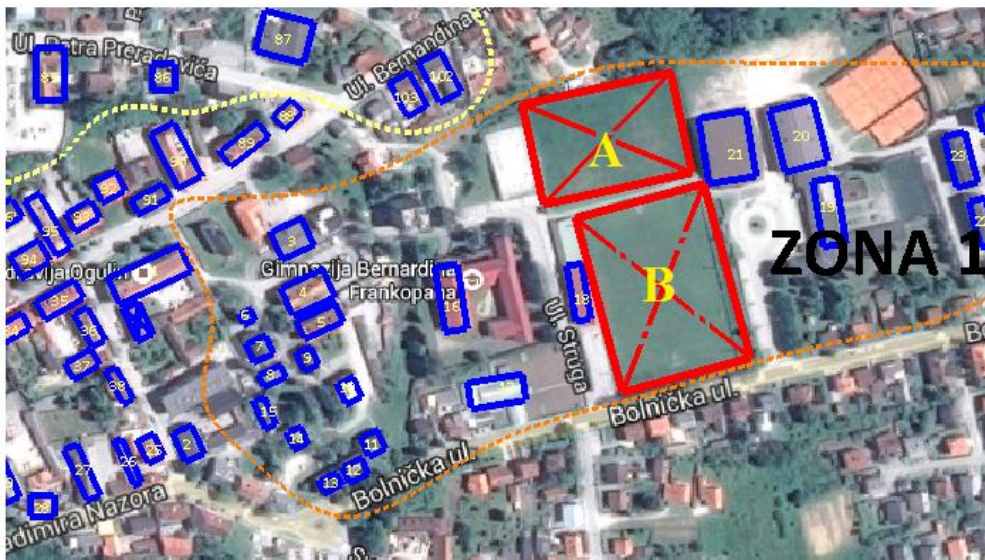
Tablica 15. Verzije Scenarija 3 – različiti udjeli proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora

Kombinacija Scenarija 3	$f_{kolektor}$ [%]	$S_{kolektor}$ [kWh]	$S_{kolektor}$ [m ³]	A_{kol} [m ²]
Kombinacija 1 – 10%	10	$0,1 \cdot Q_{potr}$	$S_{kolektor,1}$ [kWh] / 70	$\frac{\sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol}}{S_{kolektor,1}}$
Kombinacija 2 – 15%	15	$0,15 \cdot Q_{potr}$	$S_{kolektor,2}$ [kWh] / 70	$\frac{\sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol}}{S_{kolektor,2}}$
Kombinacija 3 – 20%	20	$0,2 \cdot Q_{potr}$	$S_{kolektor,3}$ [kWh] / 70	$\frac{\sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol}}{S_{kolektor,3}}$
Kombinacija 4 – 30%	30	$0,3 \cdot Q_{potr}$	$S_{kolektor,4}$ [kWh] / 70	$\frac{\sum_{1.5.}^{1.10.} p_{kol}}{S_{kolektor,4}}$

Tablica 15. prikazuje jednostavan način izračuna kapaciteta potrebnog toplinskog spremnika i korisne površine kolektora kako bi se postigli određeni udjeli proizvodnje toplinske energije iz njih. Instalirani sezonski spremnik je 15% veći od izračunatog jer je minimalna napunjenost

spremnika jednaka 15%. Volumen spremnika je određen na način da se ukupni kapacitet izražen u kWh podijelio sa specifičnom gustoćom toplinske energije za ovu vrstu spremnika koja iznosi 60-80 kWh/m³ [35]; odabrana je vrijednost od 70 kWh/m³. Korisna površina kolektora A_{kol} dobiva se na sljedeći način: ukupna efektivna toplinska snaga solarnog kolektora za ljetnu sezonu $\sum_{1.5}^{1.10} p_{kol}$ podijeli se s ukupnim kapacitetom potrebnog toplinskog spremnika $S_{kolektor} \cdot \sum_{1.5}^{1.10} p_{kol}$ iznosi 285,66 kWh/m², što zapravo znači da se u ljetnom periodu proizvede 81% toplinske energije iz kolektora (ukupni godišnji p_{kol} iznosi 351 kWh/m²).

Premda je ovaj scenarij teško izvediv, jer je sezonski toplinski spremnik velik i zasigurno će imati volumen veći od predviđenog, potrebno je osigurati dovoljno veliku površinu zemlje i krovova zgrada kako bi se osigurala potrebna korisna površina za solarne kolektore. Uz površinu krovova objekata određenih verzijom distribucijskog sustava predlaže se korištenje i zemljanih površina koje se nalaze u Zoni 1 (Slika 21).



Slika 21. Predložene zemljane površine za postavljanje solarnih kolektora

Površina tlocrta krova objekta je određena tako što se bruto površina podijelila s brojem katova tog objekta. Ukupna dostupna površina tlocrta krovova jednaka je zbroju površina krovova svih objekata odabrane distribucijske verzije. Korisna površina kolektora je mnogo manja od ukupne bruto površine korištene za postavljanje kolektora. Za 1 m² bruto površine kolektora potrebno je 3 m² zemljane površine [38]. Korisna površina FPC kolektora je 10% manja od njegove bruto površine [38]. Problem je u tome što je za određivanje potrebne površine krova potrebno poznavati dodatne parametre kao što su nagib krova, orijentacija i vrsta krova. Zbog toga će se pretpostaviti da je moguće iskoristiti samo oko 28,5% (1/3,5) površine tlocrta krovova zgrada kako bi se dobila korisna površina kolektora. Tablica 16. prikazuje podatke i parametre potrebne za izračun potrebne površine krova A_{krov} i zemljišta $A_{zemljište}$, odnosno maksimalno moguće korisne površine kolektora A_{kol} .

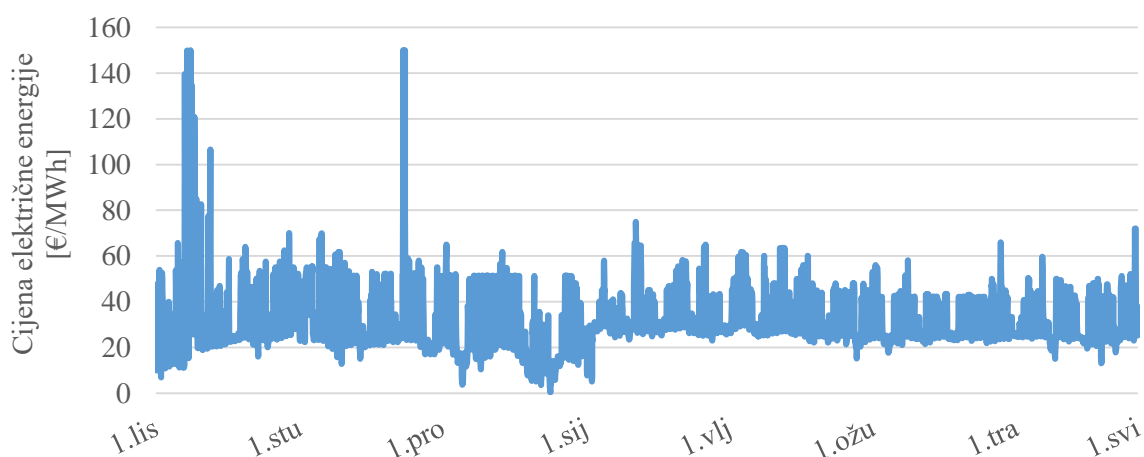
Tablica 16. Podaci o dostupnim površinama za postavljanje solarnih kolektora

Način postavljanja kolektora	Površina krova (A_{krov}) /zemljišta ($A_{zemljište}$) [m ²]	Korisna površina kolektora A_{kol} [m ²]
Solarni kolektori postavljeni na krovove objekata	Ovisno o verziji distribucijskog sustava	$0,9 \cdot (A_{krov}/3,5)$
Solarni kolektori postavljeni na zemljište A	6.650	$0,9 \cdot (A_{zemljište}/3) = 1.995$
Solarni kolektori postavljeni na zemljište B	9.440	$0,9 \cdot (A_{zemljište}/3) = 2.832$

6.3. Podaci vezani za cijene

6.3.1. Cijena električne energije

Cijena električne mijenja se ovisno o vremenu. Pretpostavka je da će se električna energija kupovati na tržištu. Tržište električne energije u Hrvatskoj, Cropex, već postoji [38], ali podaci o kretanju cijena za cijelu godinu nisu bili dostupni za vrijeme pisanja ovoga rada. Iz tog razloga cijene su preuzete s europske burze električne energije EEX za 2015. [39]. Slika 22. prikazuje kretanje cijene električne energije kroz čitavu godinu.



Slika 22. Cijene električne energije [47]

Najveća cijena električna energija iznosi 150,06 €/MWh, dok najmanja iznosi 0,32 €/MWh, u gledanom periodu ona nikada nije bila negativna. Srednja cijena električne energije iznosi 31,78 €/MWh.

6.3.2. Cijena biomase

Cijena biomase varira ovisno o vrsti koja se koristi. U ovome radu razmatralo se samo korištenje drvene sječke čija je srednja ogrjevna vrijednost 3,1 kWh/kg čija cijena iznosi 25 €/MWh prema [40]. Planiranje njene dobave nije obrađeno u ovome radu, već se pretpostavlja da postoji kontinuirani pristup biomasi kroz čitavu sezonu grijanja.

Tablica 17. prikazuje zbirne podatke o cijenama energenata korištenim u simulaciji.

Tablica 17. Zbirni podaci o cijenama energenata [35, 47, 48]

Naziv cijene	Vrsta parametra	Iznos
Cijena električne energije $c_{el.en.}$ [€/MWh]	Satna distribucija, EEX	150-0,32
Cijena električne energije $c_{biomasa}$ [€/MWh]	Konstanta	25
Specifična cijena toplinskog spremnika [€/m ³]	Linearna aproksimacija	(ovisno vrsti i veličini)

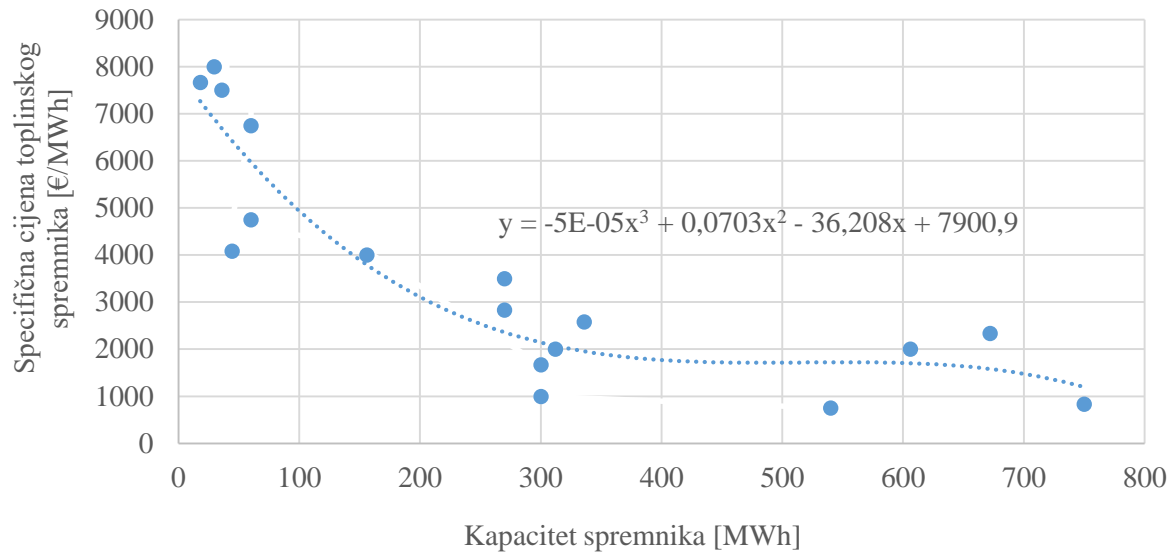
6.3.3. Investicijska cijena toplinskog spremnika

Veličina spremnika je nelinearna optimizacijska varijabla. Njegov kapacitet se optimizira na način da ukupni troškovi pogona i investicijski troškovi u toplinski spremnik budu minimalni. Veličina će ovisiti o njegovoj specifičnoj cijeni koja ovisi o njegovom kapacitetu. Nadalje, specifična cijena ovisi o vrsti spremnika, odnosno radi li se o sezonskom ili dnevnom/satnom. Sezonski spremnici dolaze u obliku jama u zemlji ili vodonosnom sloju dok dnevni/satni dolaze u obliku velikih čeličnih ili betonskih posuda. U ovome radu će se koristiti sezonski spremnici ako za to ima potrebe, odnosno kada će CTS sadržavati solarne kolektore. Kada solarnog grijanja nema, proučavat će se sustav s dnevnim odnosno satnim toplinskim spremnikom.

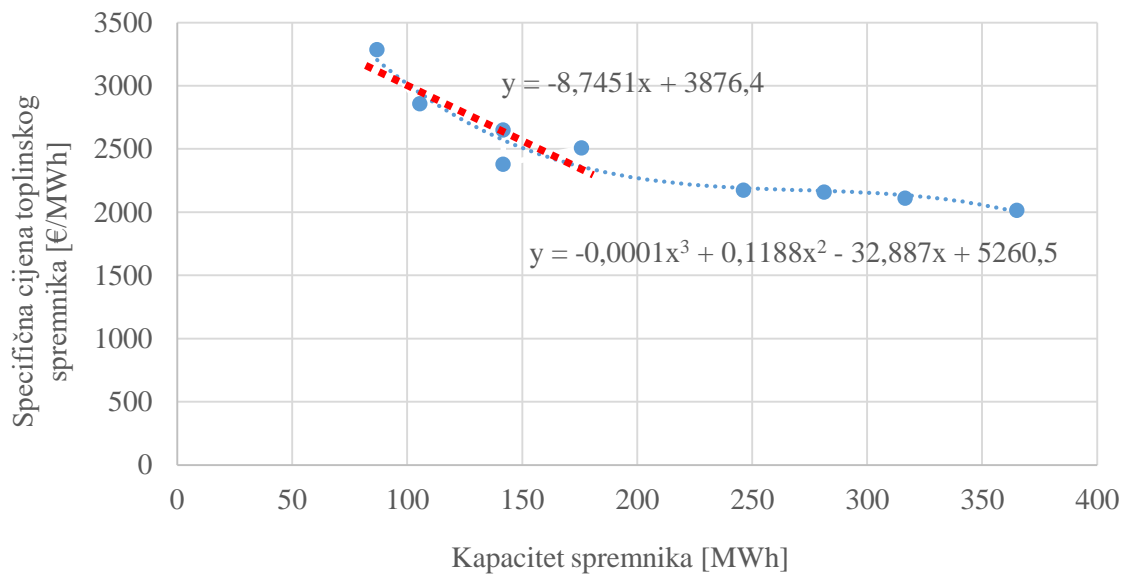
Slika 23. i Slika 24. prikazuju specifične cijene izražene u €/MWh. Spremnici u obliku jama i dnevni spremnici u obliku posuda imaju prosječni specifični kapacitet 60-80 kWh/m³. Specifična cijena sezonskih spremnika kreće se od 600-50 €/m³ dok se specifična cijena manjih dnevnih spremnika u obliku čelične posude kreće od 300-140 €/m³ [27].

Cijene preuzete iz [27] prebačene su u Matlab i pomoću aplikacije za modeliranje funkcije na temelju nekoliko točaka (*eng. curve fitting*) dobivene su zavisnosti veličine spremnika i specifične cijene. Kako bi se optimizacija ubrzala korištene su linearne funkcije za aproksimaciju specifičnih cijena dnevnog spremnika. Naime, optimizirana veličina je nelinearna varijabla, a dodatno uvođenje nelinearnosti bi usporilo proces računanja. Slika 23. prikazuje da linearna aproksimacija relativno dobro prati specifične cijene dnevnog spremnika pri manjim kapacitetima. Budući CTS grada Ogulina spada u male centralizirane toplinske sustave, tj. ne očekuje se instaliranje dnevnih toplinskih spremnika veličina iznad 100 MWh.

Scenarij 3 uključuje korištenje solarnih kolektora i u tom scenariju se veličina spremnika ne optimizira već se uvodi kao parametar. Zato se specifična cijena može računati pomoću aproksimacije krivuljom 3. reda.



Slika 23. Aproksimacija specifičnih cijena sezonskog toplinskog spremnika



Slika 24. Aproksimacija specifičnih cijena dnevnog toplinskog spremnika

6.4. Podaci vezani za tehno-ekonomsku analizu

Kako bi se provela tehno-ekonomska analiza potrebno je uvesti dodatne cijene i parametre (Tablica 18.).

Tablica 18. Cijene i parametri potrebni za tehno-ekonomsku analizu

Naziv parametra	Verzija 1	Verzija 2	Verzija 3
Specifična cijena DT [€/MW]	680.000	680.000	680.000
Izgradnja kotlovnice [€]	259.021	202.061	257.247
Kupovina zemljišta [€]	133.333	133.333	133.333
Rušenje postojećeg objekta na zemljištu [€]	13.333	13.333	13.333
Toplovod [€]	469.522	61.175	156.226
Toplinske podstanice [€]	1.159.333	241.066	391.466
Dokumentacija i nadzor [€]	386.452	122.274	182.794
Cijena biomase [€/MWh]	25	25	25
Trošak električne energije za pogon kotlovnice [€]	73.600	12.266	26.496
Održavanje pogona i rezervni dijelovi [€]	0,5% ukupne investicije		
Odvoz pepela [€]	3.200	640	1.133
Voda i odvodnja [€]	6.666	1.133	2.400
Trošak zaposlenika [€]	36.000	24.000	24.000
Usluge dostavnih službi [€]	2.666	2.666	2.666
Ostali troškovi [€]	13.333	13.333	13.333
Tarifni model za kućanstva [€/KWh] / [HRK/kWh]	0,0499 / 0,3740	0,0499 / 0,3740	0,0499 / 0,3740
Tarifni model za ostale potrošače [€/KWh] / [HRK/kWh]	0,0655 / 0,4910	0,0655 / 0,4910	0,0655 / 0,4910

Kako bi se projekt financirao potrebno je koristiti kredit Hrvatske za obnovu i razvitak (HBOR) [46].

Podaci vezani za kredit su isti za svaki scenarij, odnosno verziju distribucijskog sustava (Tablica 19.).

Tablica 19. Podaci vezani za kredit

Podatak	Verzija 1	Verzija 2	Verzija 3
Udio kredita	85%	85%	85%
Kamatna stopa	4%	4%	4%
Razdoblje [g]	15	15	15

6.4.1. Instalirana snaga kotla na biomasu

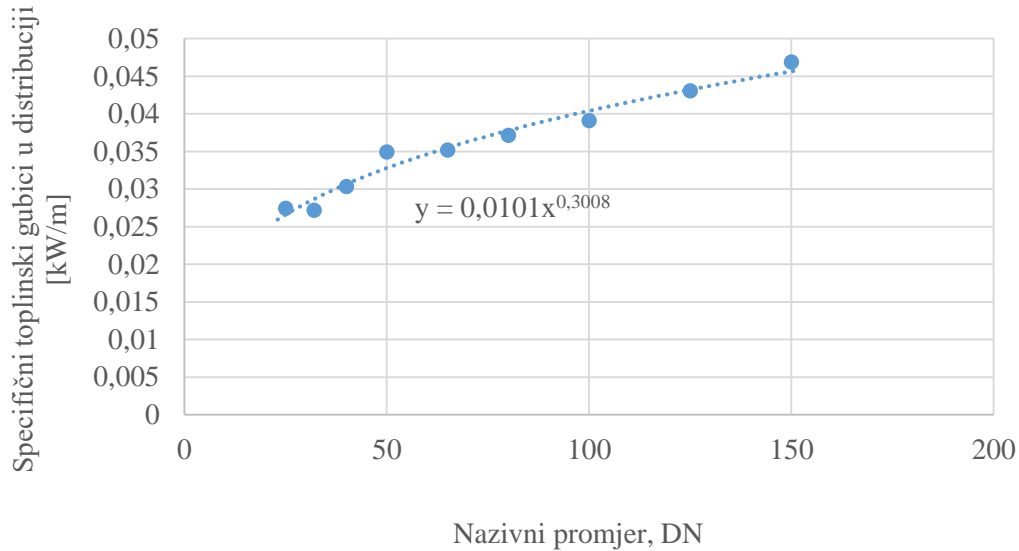
Toplinska snaga kotla na biomasu definirana u optimizacijskom modelu predstavlja najveću moguću snagu koju je moguće dostaviti do potrošača. Ona ima dvije krajnje granice kada kotao radi, maksimalnu $Q_{kotao,max}$ i onu određenu tehničkim minimumom $Q_{kotao,min}$, ako kotao ne radi ona je jednaka 0. Instalirana snaga kotla P_{kotao} je uvijek veća od $Q_{kotao,max}$ jer postoje određeni toplinski gubici u energetskom lancu dobave i proizvodnje toplinske energije: termodinamička iskoristivost kotla i gubici u mreži. Osim toga, postoje dodatni gubici poput iskoristivosti izmjenjivača toplinskih podstanica, hidraulički gubici itd., ali u ovome radu nisu obrađeni.

Kako bi se definirali gubici, korišteni su podaci iz ISOPLUS kataloga gdje su toplinski gubici definirani u obliku smanjenja toplinskog učinka po metru cjevovoda, W/m Tablica 20. Prikaz distribucijskih gubitaka, [34]. prikazuje iznose tih gubitaka ovisno o nazivnom promjeru cijevi.

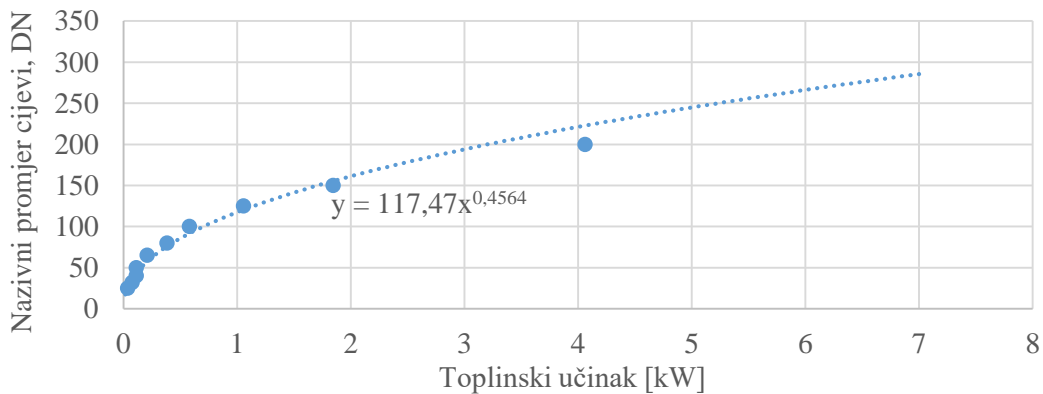
Tablica 20. Prikaz distribucijskih gubitaka, [34]

Tip	Distribucijski gubici			
	Koefficient k_{DR} in W/(m·K)	q_{DR} po metru cijevi W/m kod Srednje temperature T_M		
		100 K	60 K	50 K
D - 25	0,2745	27,451	16,471	13,725
D - 32	0,2720	27,204	16,322	13,602
D - 40	0,3037	30,368	18,221	15,184
D - 50	0,3496	34,959	20,975	17,479
D - 65	0,3522	35,216	21,130	17,608
D - 80	0,3715	37,145	22,287	18,573
D - 100	0,3913	39,128	23,477	19,564
D - 125	0,4308	43,083	25,850	21,542
D - 150	0,4691	46,911	28,146	23,456

Pretpostavljeni su najveći mogući gubici, odnosno pri najvećoj srednjoj temperaturi T_M . Srednja temperatura jednaka je polovici zbroja temperatura polaza i povrata. Problem je u tome što u ovoj tablici nisu prikazani nazivni promjeri veći od D-150, stoga je potrebno napraviti aproksimaciju podataka iz ISOPLUS kataloga. Slika 25. i Slika 26. prikazuju aproksimaciju ovisnosti nazivnog promjera i toplinskog učinka.



Slika 25. Aproksimacija nazivnog promjera u ovisnosti o toplinskom učinku



Slika 26. Aproksimacija gubitaka u distribucijskoj mreži ovisno o nazivnom promjeru

Koristeći aproksimacijske formule moguće je odrediti i toplinske gubitke za nazivne promjere DN 250. Također je moguće utvrditi koji nazivni promjer je potreban kako bi se postigao maksimalni toplinski učinak za Verziju 1, naime na Slika 10., koja prikazuje Verziju 1 distribucijske mreže, taj je vod označen kao DN >200.

Tablica 21. prikazuje distribucijske toplinske gubitke u toplovodu G_{distr} za svaku od verzija.

Tablica 21. Toplinski gubici u distribuciji

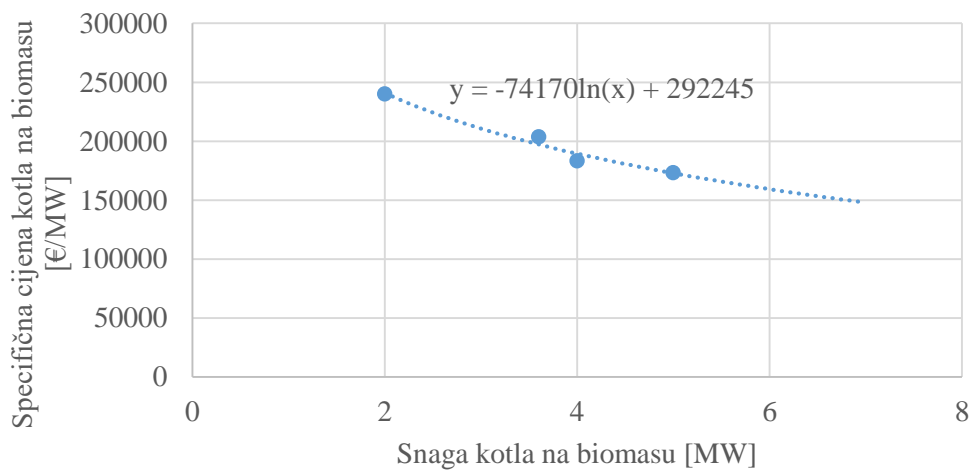
Verzija distribucijske mreže	Ukupna duljina toplovoda [m]	G_{distr} [kW]	Udio gubitka distribucije u ukupnoj potražnji [%]
Verzija 1	5179	496,13	4
Verzija 2	851	30,24	1,15
Verzija 3	1832	69,53	1,56%

Budući da se radi o malom CTS-u, distribucijski toplinski gubici su mali – oni predstavljaju maksimalno 4% toplinskog kapaciteta i to za najveću verziju distribucijskog voda. Premda su u ovome slučaju oni nezamjetni, u nastavku će se taj gubitak uzeti u obzir.

Kao što je napomenuto, instalirana snaga kotla P_{kotoao} veća je od dostavne snage kotla i to je snaga kotla koja će ulaziti u tehno-ekonomsku analizu. Kako bi se odredila ukupna instalirana snaga, potrebno je znati željenu dostavnu snagu kotla i gubitke. Distribucijski gubici G_{distr} su već obrađeni i pokazano je da iznose max 4% u najgorem slučaju (Tablica 21.). Prema [35], kotlovi na biomasu imaju učinkovitost i do 95%. Stoga je odlučeno da je ukupna iskoristivost kotla jednaka 85%. Instalirana snaga kotla može se izračunati prema jednadžba (31):

$$P_{kotoao} = \frac{Q_{kotoao,max} + G_{distr}}{\eta_{kotoao}} \tag{31}$$

Specifična cijena kotla zavisi o instaliranoj snazi kotla prema [47] (Slika 27.).



Slika 27. Specifična cijena kotla na biomasu

6.4.2. Instalirana snaga dizalice topline, kapacitet toplinskog spremnika i solarnih kolektora

Ostali instalirani kapaciteti jednaki su onima predstavljenim u pojedinom scenariju, tj. nema razlike između podataka u tehno-ekonomskoj analizi i onima u optimizacijskom modelu. Specifične cijene dizalice topline i solarnih kolektora ne ovise o njihovoj snazi već su postavljeni kao konstantne vrijednosti [27] (Tablica 22.).

Tablica 22. Specifične investicijske cijene za dizalice topline i solarne kolektore

Vrsta tehnologije	Specifična cijena	Mjerna jedinica
Dizalica topline	680.000	[€/MW]
Solarni kolektori	227	[€/m ²]
	425	[€/MWh]

7. REZULTATI

7.1. Scenarij 1 – kotao na biomasu i toplinski spremnik

Tablica 23. prikazuje ulazne podatke i rezultate simulacije za svaku od verzija distribucijskog sustava.

Tablica 23. Rezultati optimizacije za Scenarij 1

Podatak	Verzija 1	Verzija 2	Verzija 3
Maksimalna dostavna snaga kotla, $Q_{kotao,max}$ [MW]	15	3,2	5,5
Minimalna dostavna snaga kotla, $Q_{kotao,min}$ [MW]	4,5	1	1,7
Instalirana snaga kotla na biomasu, P_{kotao} [MW]	18,1	3,8	6,4
Optimizirana veličina toplinskog spremnika, S_{max} [MWh]	5,56	1,3	2,3
Optimizirana veličina toplinskog spremnika, specifični kapacitet 70 kWh/m ³ [m ³]	79,43	18,57	32,86

Najveći spremnik potreban je najvećoj distribucijskoj mreži; 5,56 MWh, odnosno 79,43 m³. Takva veličina ne predstavlja problem zato što je REGEA pretpostavila veličinu od 160 m³ u obliku čelične posude. Najmanji toplinski spremnik zahtjeva najmanja verzija distribucijske mreže, Verzija 2; 1,3 MWh, odnosno 18,57 m³.

Temeljem gore navedenih podataka, napravljena je tehno-ekonomska analiza za svaku verziju distribucijskog sustava. Kao pokazatelji ekonomske isplativosti projekta odabrani su sljedeći parametri: neto sadašnja vrijednost (NPV, *eng. neto present value*), unutarnja stopa povrata (IRR, *eng. internal rate of return*), period povrata investicije (PP). Kao referentna tarifa isporučene toplinske energije odabrana je cijena za CTS u Karlovcu; 0,374 HRK/kWh (0,0499 €/kWh) za kućanstva i 0,491 HRK/kWh (0,0655 €/kWh) za poslovne potrošače.

Prvo su dobiveni rezultati parametara za navedene tarife i koliki je potreban poticaj da bi se uz navedene cijene postigao NPV jednak nuli. Nakon toga su određene cijene isporučene toplinske energije koje su potrebne kako bi NPV bio jednak nuli, a da se pritom ne koriste nikakvi poticaji. Omjer cijena isporučene toplinske energije za poslovne korisnike i kućanstva je jednak 1,3128.

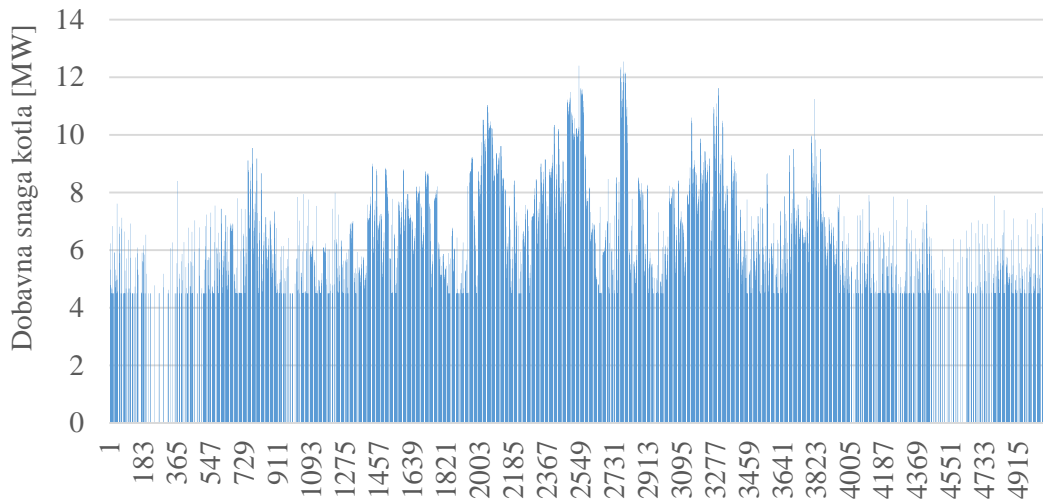
Tablica 24. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize iz koje se može primijetiti kako je ekonomski najisplativiji projekt onaj koji uključuje Verziju 1, koja je površinom najveća. Ona također ima najmanju linearnu gustoću toplinske energije i linearnog vršnog toplinskog opterećenja. Taj podatak u ovoj analizi nije imao veliki utjecaj zato jer u obzir nisu uzeti troškovi pumpanja i investicije u pumpu. Razlog tome što je najveća verzija najpovoljnija su niske specifične cijene investicija.

Ovakav scenarij može smanjiti cijene toplinske energije s 0,374 HRK/kWh na 0,3293 HRK/kWh za kućanstva, odnosno s 0,491 HRK/kWh na 0,432 HRK/kWh za poslovne korisnike, što predstavlja smanjenje tarife od 12%.

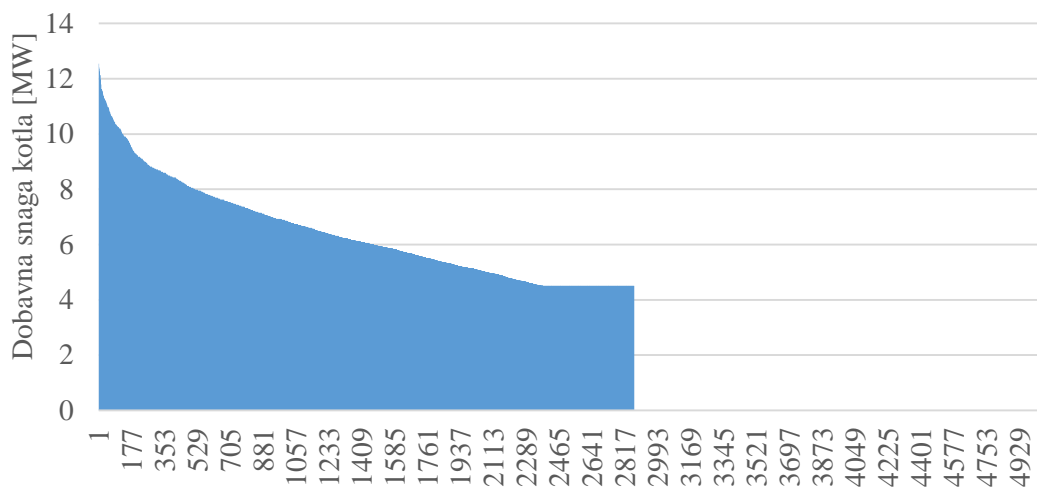
Slika 28., Slika 29. i Slika 30. pokazuju rad CTS-a za čitavu sezonu grijanja.

Tablica 24. Rezultati tehno-ekonomske analize za Scenarij 1

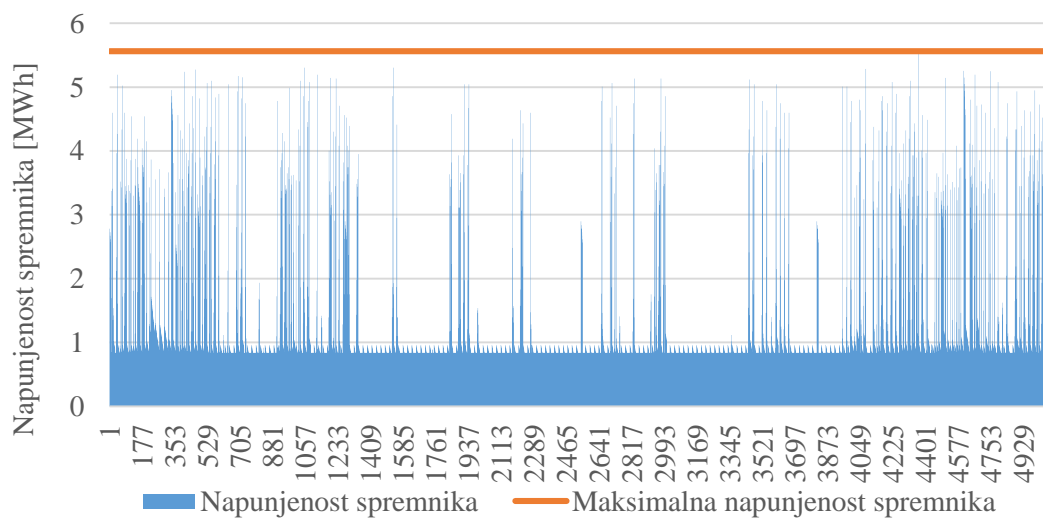
Podatak	Verzija 1	Verzija 2	Verzija 3
NPV [€]	1.491.131,13	-17.595,42	69.233,62
IRR [%]	7,99	3,86	4,36
PP [g]	10,58	14,69	14,08
Potrebni poticaju za NPV=0 [%]	0	30	0
Cijena tarife za kućanstva potrebna za NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]	0,0439 / 0,3293	0,0581 / 0,4358	0,0492 / 0,3690
Cijena tarife za poslovne korisnike potrebna za NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]	0,0576 / 0,4320	0,0763 / 0,5723	0,0645 / 0,4838



Slika 28. Satna raspodjela kotla na biomasu, distribucijska verzija 1, Scenarij 1



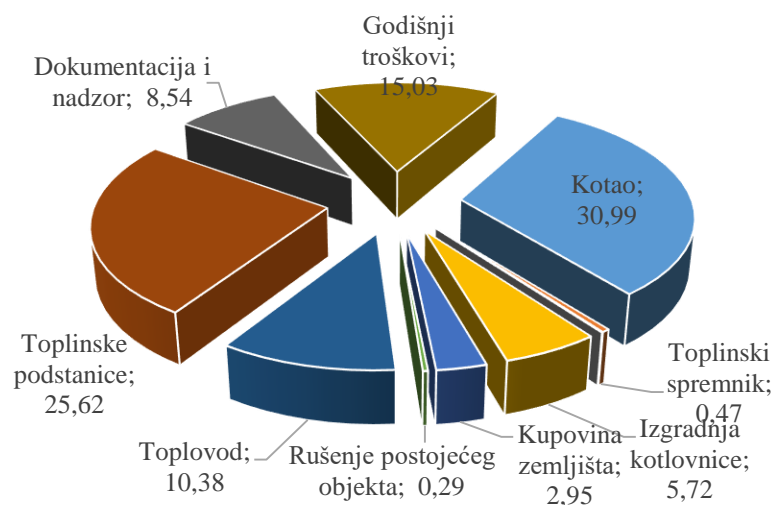
Slika 29. Dobavna snaga kotla za distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1, raspored prema snazi i broju sati



Slika 30. Napunjenost spremnika za distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1

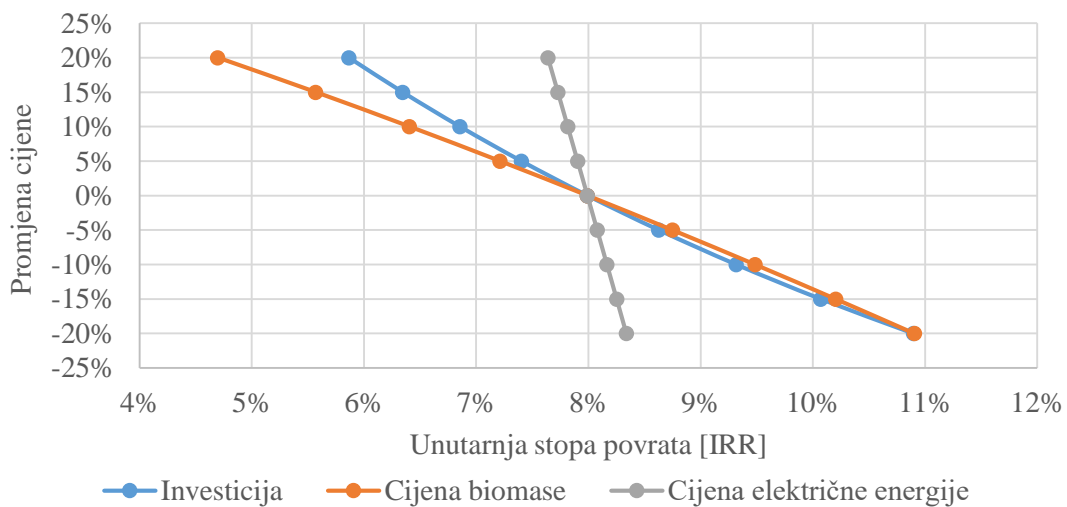
Očito je da kotao na maksimalnoj snazi radi vrlo malen broj sati dok na minimalnoj snazi radi nešto veći udio vremena. Minimalno toplinsko opterećenje je manje od minimalne dobavne snage kotla i upravo je to razlog tome da je potreban tako veliki toplinski spremnik. Osim toga, pomoću njega je pokriven i dio toplinskog opterećenja. Toplinski spremnik je maksimalno napunjen samo 2 sata tijekom čitave sezone.

Slika 31. prikazuje udjele pojedinog dijela CTS-a u ukupnoj investiciji. Najveći udio od 30,99% ima kotao čija je specifična cijena jako ovisna o njegovoj snazi. Nakon toga najveći udio imaju toplinske podstanice, 25,62% i toplovod 10,38%. Godišnji troškovi ne predstavljaju početnu investiciju, ali prikazani na ovaj način imaju udio od 15,03%. Toplinski spremnik ima najmanji udio od samo 0,47%.



Slika 31. Udio pojedinog dijela CTS-a u ukupnoj investiciji za Distribucijsku Verziju 1, Scenarij 1

Dodatno je napravljena i analiza osjetljivosti za odabranu verziju. Razmatrane su promjene cijene investicija i energenata od -20 do +20 % pri čemu je promatran iznos IRR-a. Slika 32. prikazuje rezultate analize osjetljivosti.



Slika 32. Analiza osjetljivost za Verziju 1 distribucijskog sustava Scenarija 1

Najveći utjecaj na IRR ima promjena cijene biomase i promjena cijena investicije. Pri povećanju cijene biomase za 20% od trenutne vrijednosti vrijednost IRR iznosi 4,7%, dok pri smanjenju cijene biomase za 20% ona iznosi 11%. Najmanji utjecaj na IRR ima promjena cijene električne energije korištene za pogon kotlovnice. Maksimalna promjena IRR iznosi oko 0,5 % pri promjeni cijene električne energije za 20%.

7.2. Scenarij 2 – kotao na biomasu, dizalica topline i toplinski spremnik

U Scenariju 2 korištena je najpovoljnija verzija distribucijskog sustava iz Scenarija 1, odnosno sve optimizacije će biti rađene s Verzijom 1 distribucijskog sustava. U ovome scenariju se uz kotao na biomasu uvodi i dizalica topline. Tablica 25. prikazuje ulazne parametre za optimizaciju.

Tablica 25. Ulazni parametri snage postrojenja za Scenarij 2

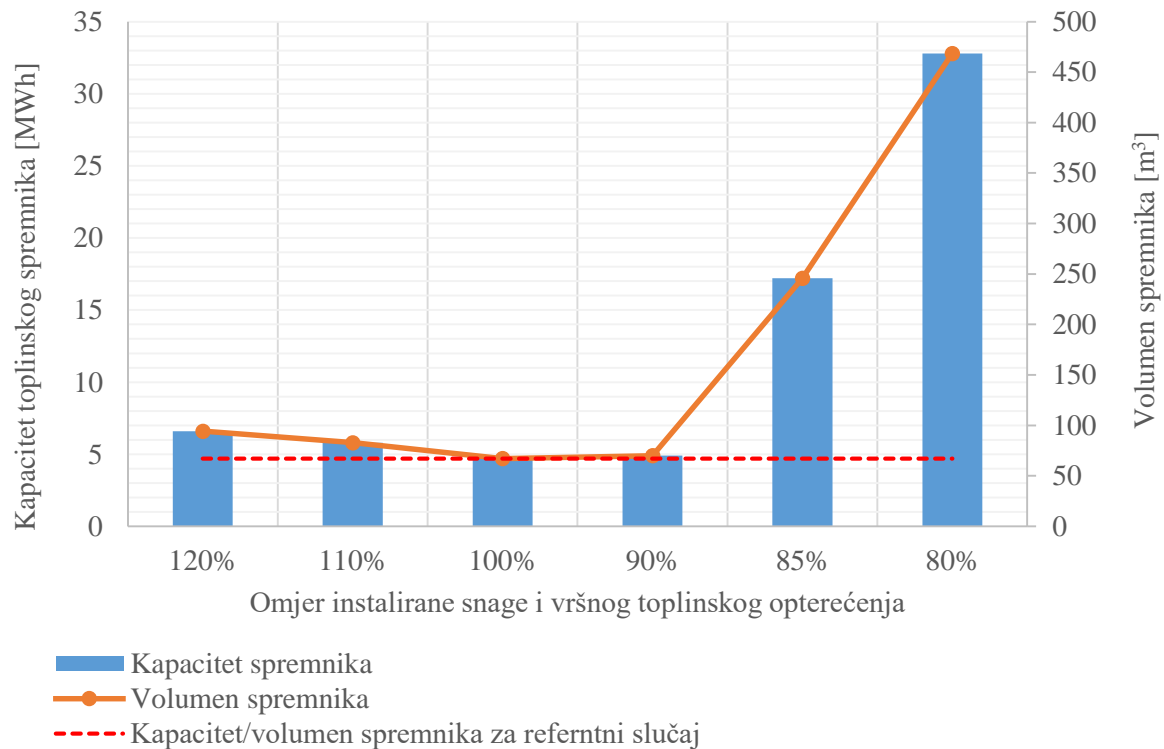
Verzije Scenarija 2	$Q_{DT,max}$ [MW]	$Q_{kotao,max}$ [MW]	$Q_{kotao,min}$ [MW]	P_{kotao} [MW]
Kombinacija 1 – 120% $Q_{potr,max}$	0,5	14,4	4,4	17,6
Kombinacija 2 – 110% $Q_{potr,max}$	0,5	13,2	4	16,1
Kombinacija 3 – 100% $Q_{potr,max}$	0,5	11,9	3,6	14,6
Kombinacija 4 – 90% $Q_{potr,max}$	0,5	10,7	3,3	13,2
Kombinacija 4 – 85% $Q_{potr,max}$	0,5	10,1	3,1	12,5
Kombinacija 5 – 80% $Q_{potr,max}$	0,5	9,5	2,9	11,8

Tablica 26. prikazuje rezultate optimizacije, tj. potrebne veličine toplinskog spremnika za svaku od kombinacija.

Tablica 26. Rezultati optimizacije veličine spremnika za Scenarij 1

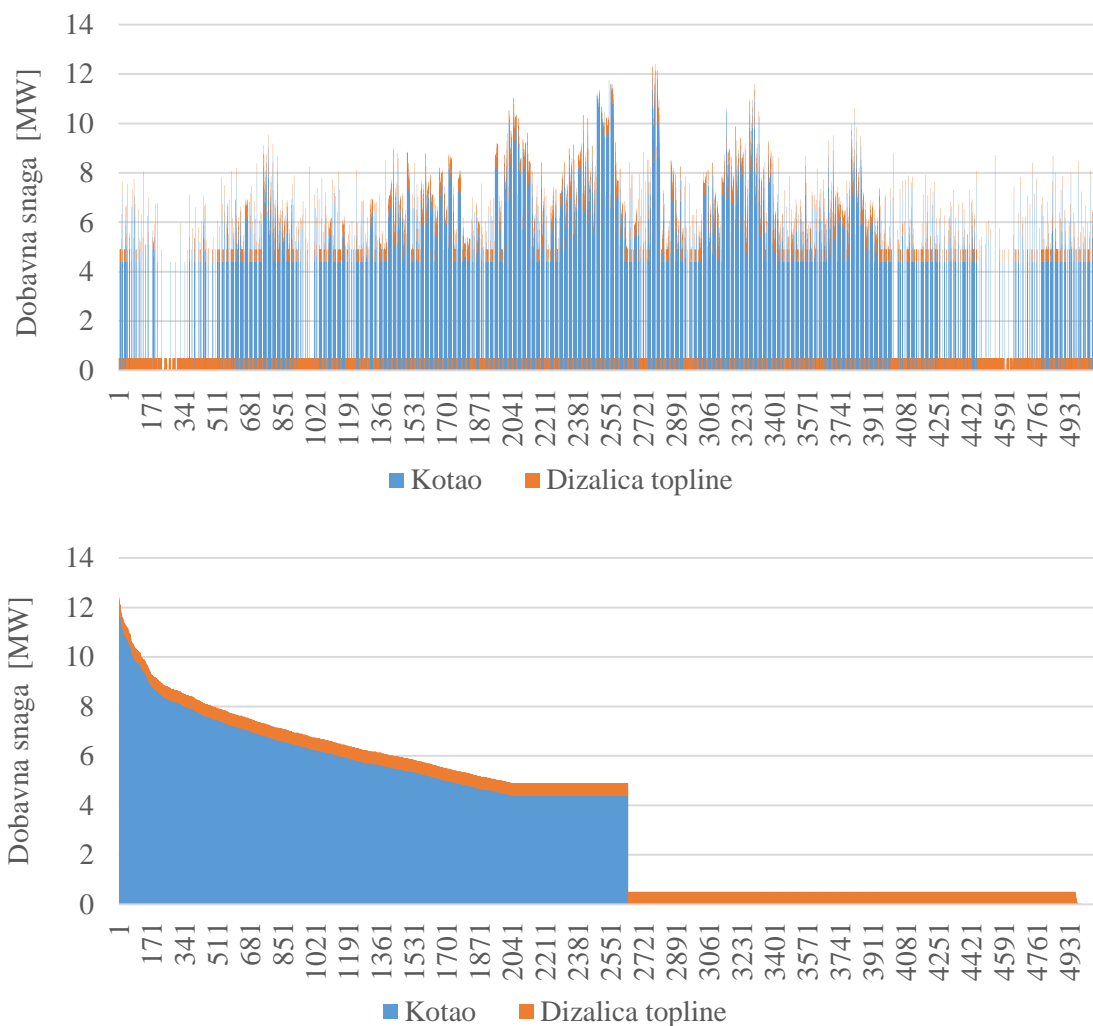
Verzije Scenarija 2	S_{max} [MWh]	S_{max} [m ³]
Kombinacija 1 – 120% $Q_{potr,max}$	6,6	94,3
Kombinacija 2 – 110% $Q_{potr,max}$	5,8	82,86
Kombinacija 3 – 100% $Q_{potr,max}$	4,7	67,14
Kombinacija 4 – 90% $Q_{potr,max}$	4,9	70
Kombinacija 4 – 85% $Q_{potr,max}$	17,2	245,71
Kombinacija 5 – 80% $Q_{potr,max}$	32,8	468,57

Slika 33. prikazuje rezultate optimizacije u obliku dijagrama.

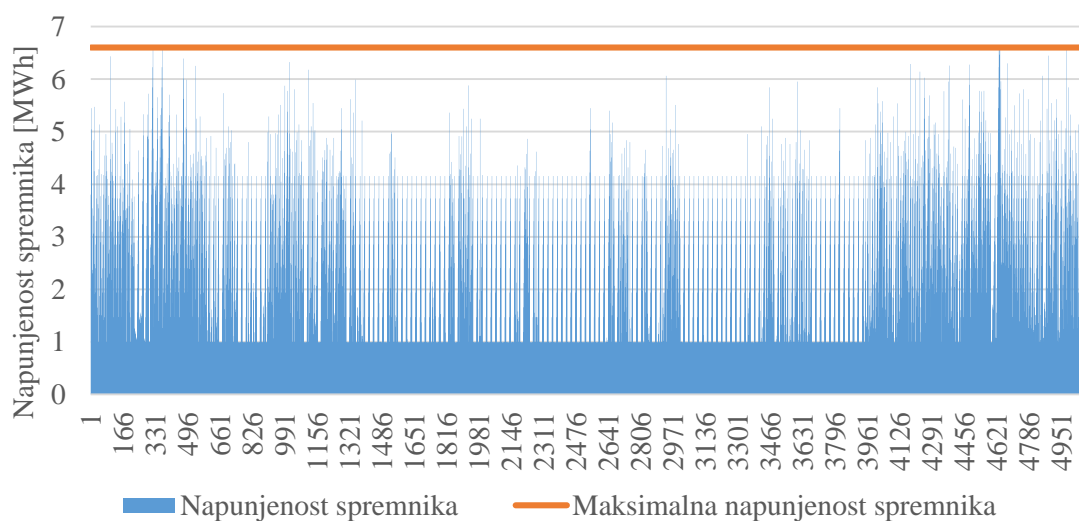


Slika 33. Odnos instalirane snage i kapaciteta toplinskog spremnika za Scenarij 2

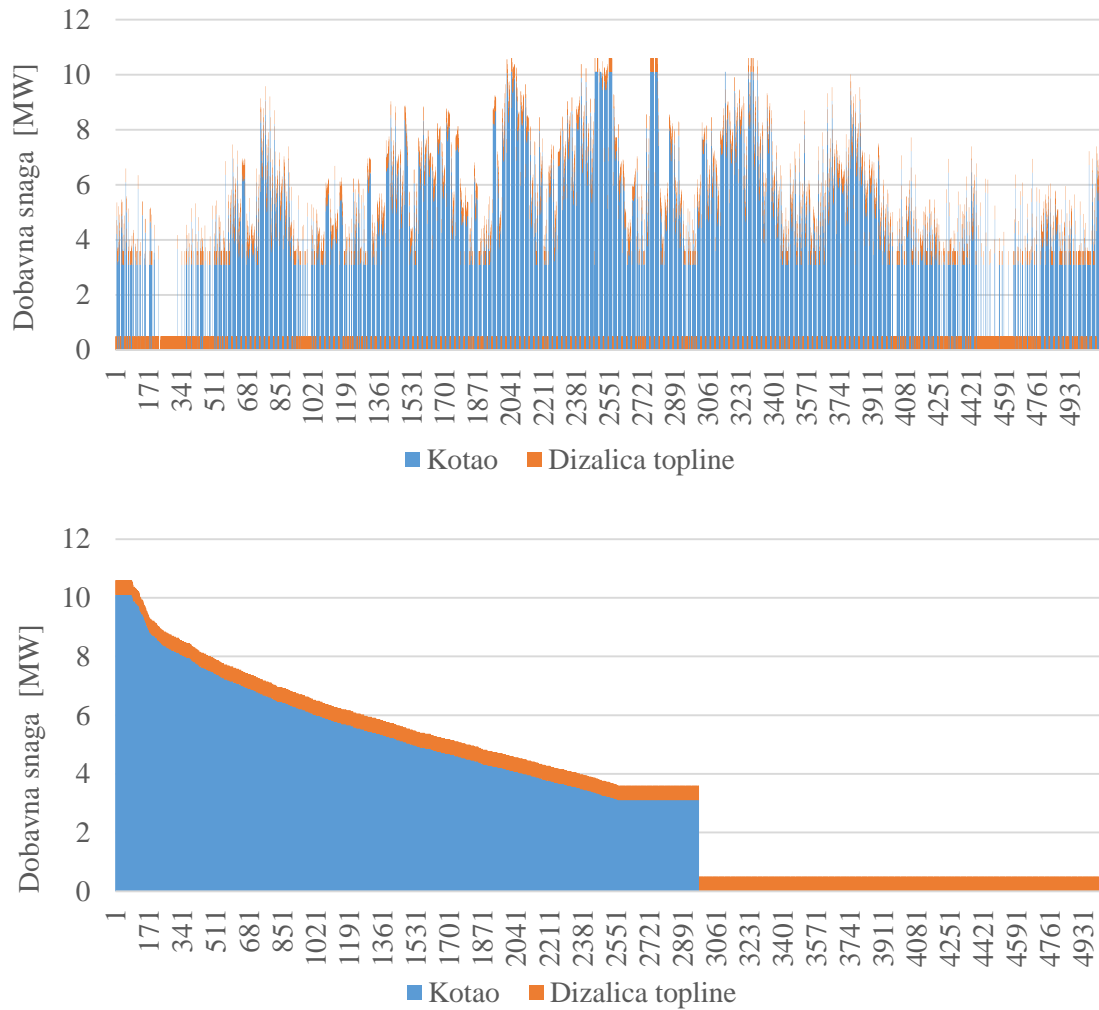
Pri velikim instaliranim snagama kotla (120-100% udjela vršnog toplinskog opterećenja) potreban je toplinski spremnik od oko 5 MWh, tj. oko 80 m³. Takav spremnik nije problematično smjestiti u predviđeni prostor. Dodatnim smanjenjem kotla do 100% ukupne instalirane snage dobiva se najmanji kapacitet toplinskog spremnika, u ovoj kombinaciji spremnik služi samo za pohranu viška toplinske energije kada kotao radi na tehničkom minimumu. Kada bismo dodatno smanjivali kotao (instalirana snaga manja od 100%), uvodile bi se dodatne investicijske uštede sa strane kotla, a jedan dio opterećenja pokriva bi i toplinski spremnik. Smanjenjem ukupne instalirane snage kotla i DT veličina spremnika ponovno počinje rasti, ali ovaj put zbog toga što je potrebno pokriti toplinsko opterećenje. Pri 85% instalirane snage veličina toplinskog spremnika naglo raste na 17,2 MWh (245 m³), razlog tome je što kotao i DT nisu u stanju pokriti vršno toplinsko opterećenje, odnosno toplinski spremnik mora biti dovoljno velik kako bi u tome pomogao. Dodatnim smanjenjem instalirane snage na 80% dobiva se potrebna veličina spremnika od 32,8 MWh (468,57 m³) što predstavlja problem uslijed njegove geometrije. REGEA je predložila spremnik maksimalnog obujma od 160 m³, a najveći dobiveni je skoro 3 puta veći i ne može predstavljati rješenje Scenarija 2. Slika 34. i Slika 35. prikazuju rad CTS pri 120% instalirane snage i 85% instalirane snage. Može se primijetiti kako pri 120% ukupnog instaliranog opterećenja kotao relativno više napunjen nego pri 85% instalirane snage; tada je kotao maksimalno napunjen samo nekoliko sati tijekom sezone kako bi pokrio maksimalno toplinsko opterećenje koje ukupna instalirana snaga kotla i DT nije u stanju pokriti.



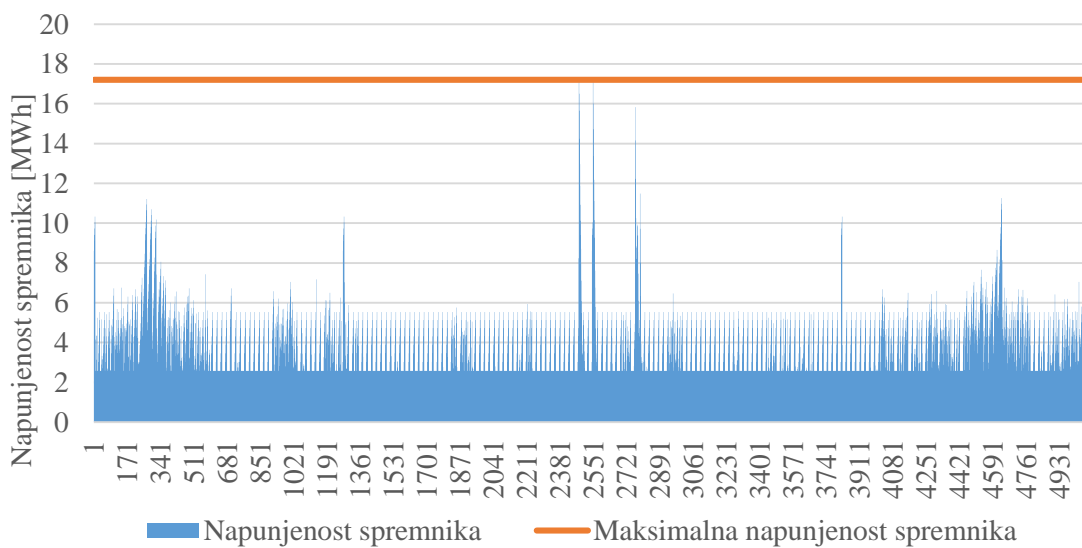
Slika 34. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 120% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja



Slika 35. Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 120% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja



Slika 36. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 85% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja



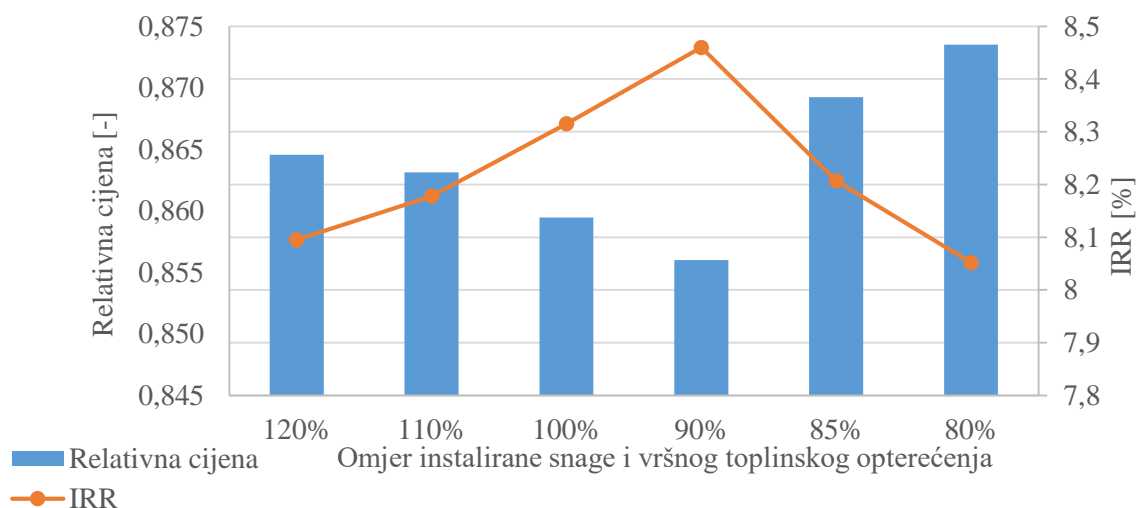
Slika 37. . Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 85% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja

Kao i u Scenariju 1, i u Scenariju 2 je napravljena tehno-ekonomska analiza. Tablica 27. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize.

Tablica 27. Rezultati tehno-ekonomske analize, Scenarij 2

Kombinacija	NPV [€]	IRR [%]	PP [g]	Potrebni poticaju za NPV=0 [%]	Tarifa za kućanstva pri NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]	Tarifa za poslovne potrošače pri NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]
120%	1.668.216,80	8,095	10,50	0	0,0431 / 0,3233	0,0566 / 0,4245
110%	1.694.917,82	8,178	10,43	0	0,0430 / 0,3225	0,0565 / 0,4238
100%	1.738.516,67	8,315	10,33	0	0,0429 / 0,3218	0,0563 / 0,4220
90%	1.780.402,62	8,460	10,22	0	0,0427 / 0,3201	0,0560 / 0,4203
85%	1.676.967,10	8,207	10,41	0	0,0433 / 0,3251	0,0569 / 0,4268
80%	1.617.078,52	8,052	10,53	0	0,0435 / 0,3253	0,0570 / 0,4269

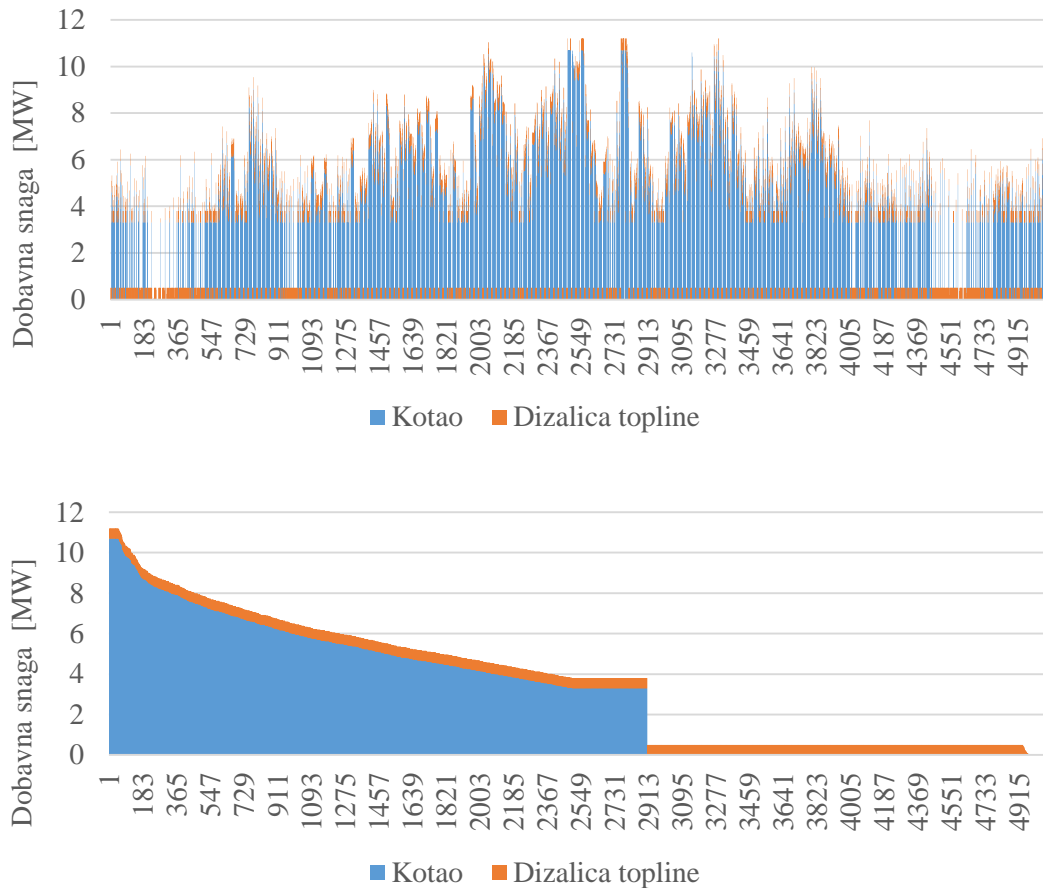
Omjer tarife za poslovne potrošače i kućanstva je konstantan i iznosi 1,3128. Kako bi se odredila najpogodnija kombinacija snage kotla i dizalice topline prikazat će se relativna cijena kao omjer cijena dobivenih tehno-ekonomskom analizom i referentne vrijednosti cijena za CTS u Karlovcu. Slika 38. prikazuje odnos IRR, relativne cijene i omjera ukupne instalirane snage i vršnog toplinskog opterećenja.



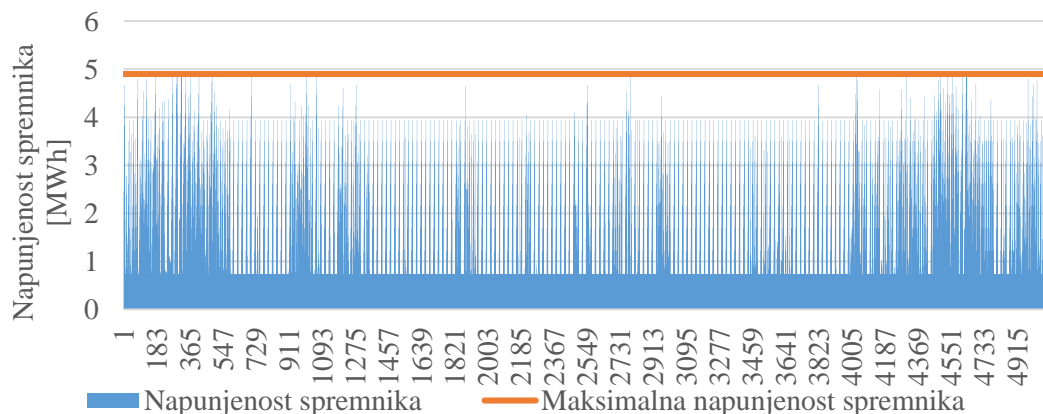
Slika 38. Relativna cijena i IRR u odnosu na omjer instalirane snage i vršnog toplinskog opterećenja, Scenarij 2

Slika 38. pokazuje da je ekonomski najisplativija Kombinacija 4 za Scenarij 2, gdje je zbroj maksimalne dostavne snage kotla i DT jednaka 90% vršnog opterećenja sustava.

Optimizacijom je dobivena veličina spremnika od 4,9 MWh, volumena 70 m³. Ova kombinacija omogućuje smanjenje referentnih cijena za 15%. pri čemu IRR za referentne cijene isporučene toplinske energije iznosi 8,45%. Slika 39. i Slika 40. prikazuju rad CTS-a za Kombinaciju 4, Scenarij 2.

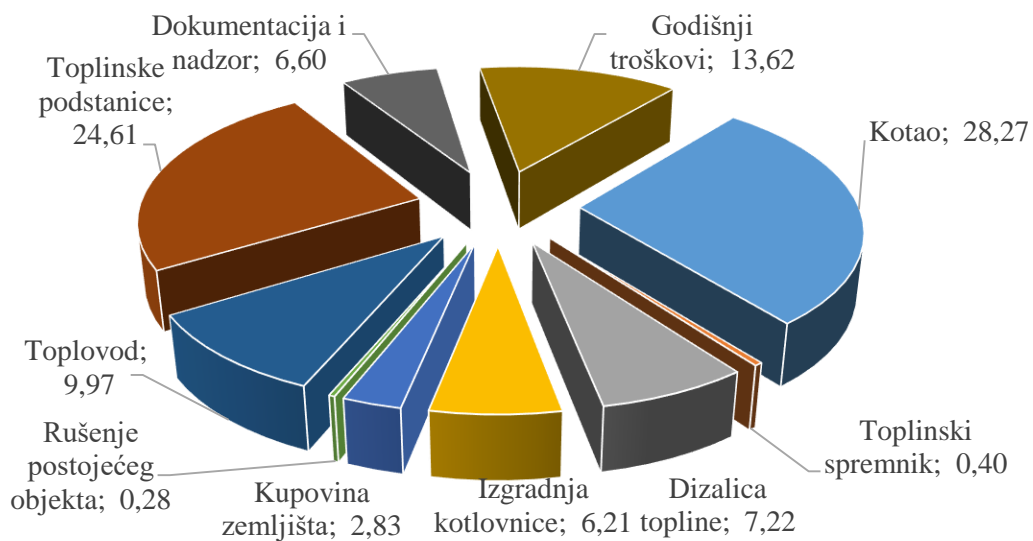


Slika 39. Satna distribucija rada kotla i dizalice topline, Scenarij 2, 90% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja



Slika 40. Satna distribucija napunjenosti spremnika topline, Scenarij 2, 90% ukupnog vršnog toplinskog opterećenja

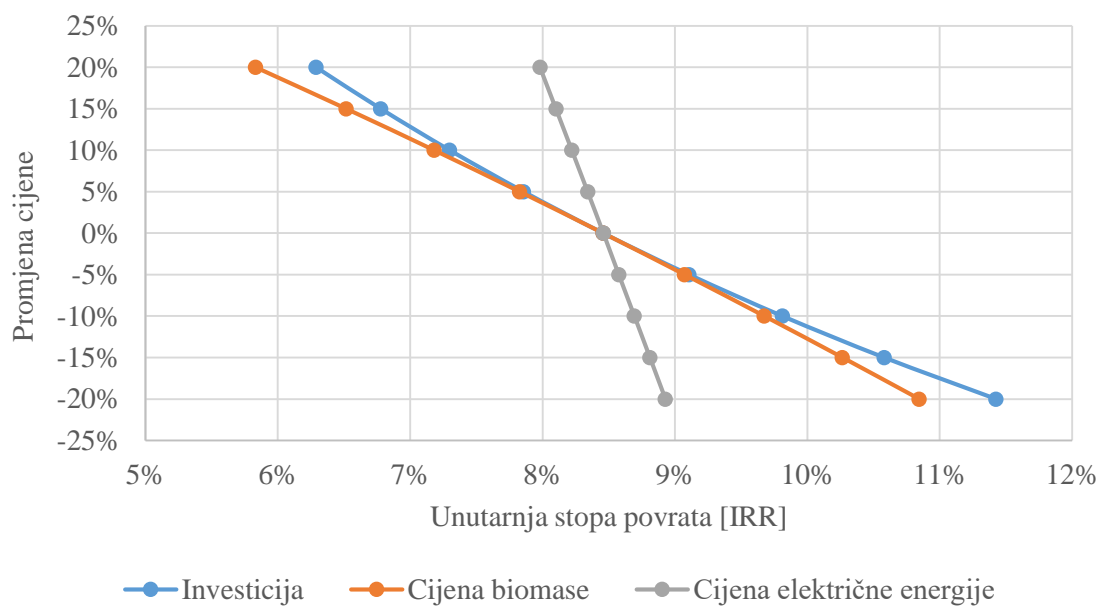
Slika 41. prikazuje udio pojedinog dijela CTS-a u ukupnoj investiciji i godišnjim troškovima za Scenarij 2, Kombinaciju 4.



Slika 41. Udio pojedinog dijela CTS u ukupnoj investiciji i godišnjim troškovima

Prema gornjoj slici se može vidjeti kako DT iznosi oko 7,22% ukupne investicije dok kotao 28,27%. Toplinski spremnik zauzima samo 0,4% ukupne investicije.

Slika 42. prikazuje analizu osjetljivosti za Scenarij 2, Kombinaciju 4.



Slika 42. Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 Kombinaciju 2

Najveći utjecaj na unutarnju stopu povrata ima cijena biomase i ukupna investicija. Cijena biomase može smanjiti IRR s 8,5 na 5,7% ako se poveća za 20%, ako je cijena biomase 20% manja tada će se IRR povećati s 8,5 na 10,9%. Slična stvar vrijedi i za promjenu investicije, IRR može biti od 6,3% do 11,4% ovisno o povećanju ili smanjenju cijena investicije. Promjena cijene električne energije manje utječe na IRR; može iznositi 8% ili 9% ovisno o povećanju ili smanjenju cijene električne energije.

7.3. Scenarij 3 – kotao na biomasu uz dizalicu topline, solarne kolektore i toplinski spremnik

Kombinacija 4 Scenarija 2 se pokazala kao ekonomski najisplativija opcija i ona je izabrana za provođenje Scenarija 3; integracija solarnih kolektora i sezonskog toplinskog spremnika.

Tablica 28. prikazuje ulazne podatke. Pošto su ulazni podaci za optimizaciju Scenarija 3 unaprijed poznati, moguće je napraviti optimizaciju čitave sezone odjednom.

Tablica 28. Ulazni podaci potrebni za optimizaciju rada sustava za Scenarij 3

Kombinacija Scenarija 3	$f_{kolektor}$ [%]	$S_{kolektor}$ [MWh]	$S_{kolektor}$ [m ³]	$S_{kol.inst}$ [m ³]	A_{kol} [m ²]
Kombinacija 1 – 10%	10	1.821	26.016	$1,15 \cdot S_{kolektor} = 29.900$	6.375
Kombinacija 2 – 15%	15	2.731	39.024	$1,15 \cdot S_{kolektor} = 44.842$	9.562
Kombinacija 3 – 20%	20	3.642	52.032	$1,15 \cdot S_{kolektor} = 59.957$	12.750
Kombinacija 4 – 30%	30	5.463	78.048	$1,15 \cdot S_{kolektor} = 93.357$	19.125

Pošto se radi o sezonskim spremnicima, dobiveni veliki kapacitete i volumeni. Najmanji iznosi 29.900 m³ dok najveći iznosi čak 93.357 m³. Za postojeće sustave CTS-a tako veliki spremnici nisu rijetkost; primjerice jedan od najvećih solarnih CTS-a u Danskoj s instaliranom površinom FPC kolektora od 70.000 m² ima toplinski spremnik veličine 203.000 m³ [48]. Najveći standardni pojedinačni sezonski toplinski spremnici iznose do 10.000 m³ (700 MWh). Iz tog razloga će instalirani toplinski spremnik biti zbroj nekoliko manjih toplinskih spremnika volumena 5.000 m³ (350 MWh) jer se u tom rasponu nalazi najveći broj već postojećih velikih spremnika. Kombinacija 1 zahtjeva 6 takvih spremnika, Kombinacija 2 njih 9, dok Kombinacija 3 12, a Kombinacija čak 18 manjih toplinskih spremnika prosječne veličine od 350 MWh (5.000 m³).

Verzija 1 ima dostupnu površinu tlocrta krovova od 48.333 m² i površinu zemljišta od 16.090 m², ukupno 64.423 m². Ako se koja od kombinacija pokaže prevelikom, tada ona neće biti predložena kao najbolja bez obzira na njenu financijsku isplativost.

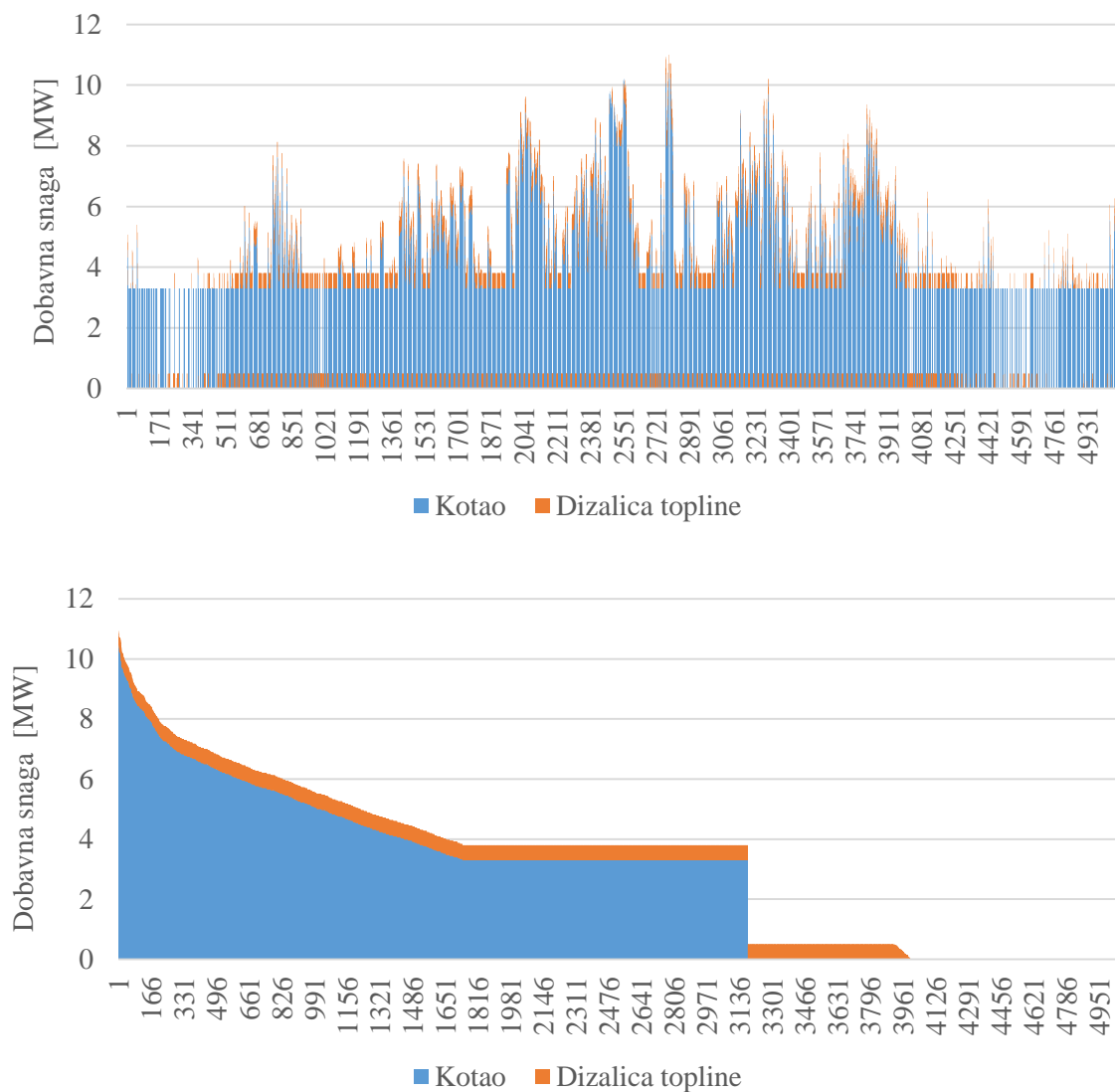
Tablica 29. prikazuje potrebne površine zemlje i krova za svaku od kombinacija pri čemu se prednost prvo daje postavljanju solarnih kolektora na zemlju.

Tablica 29. Potrebne površine krovova i zemljišta za svaku od kombinacija Scenarija 3

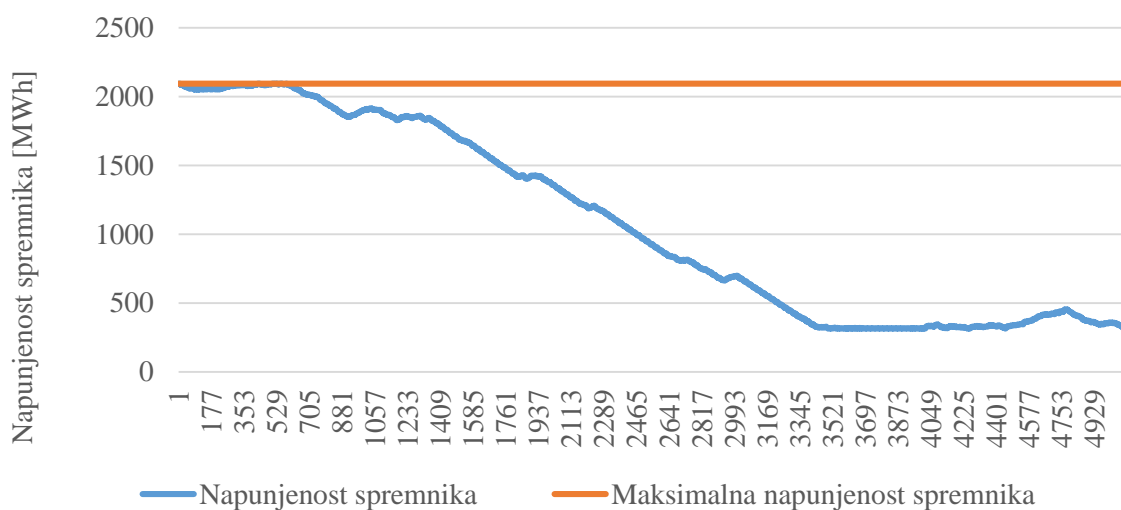
Kombinacija Scenarija 3	A_{kol} [m ²]	Potrebna površina zemljišta $A_{zemljište}$ [m ²]	Potrebna površina zemljišta A_{krov} [m ²]	Ukupna potrebna površina
Kombinacija 1 – 10%	6.375	16.090	6.020	22.110
Kombinacija 2 – 15%	9.562	16.090	18.416	34.506
Kombinacija 3 – 20%	12.750	16.090	30.812	46.902
Kombinacija 4 – 30%	19.125	16.090	55.604	71.694

Tablica 29. pokazuje kako je kombinacija 4 prevelika za CTS-a grada Ogulina, potrebno je pronaći dodatno slobodno zemljište za integraciju solarnih kolektora što u sklopu ovoga rada nije obavljeno.

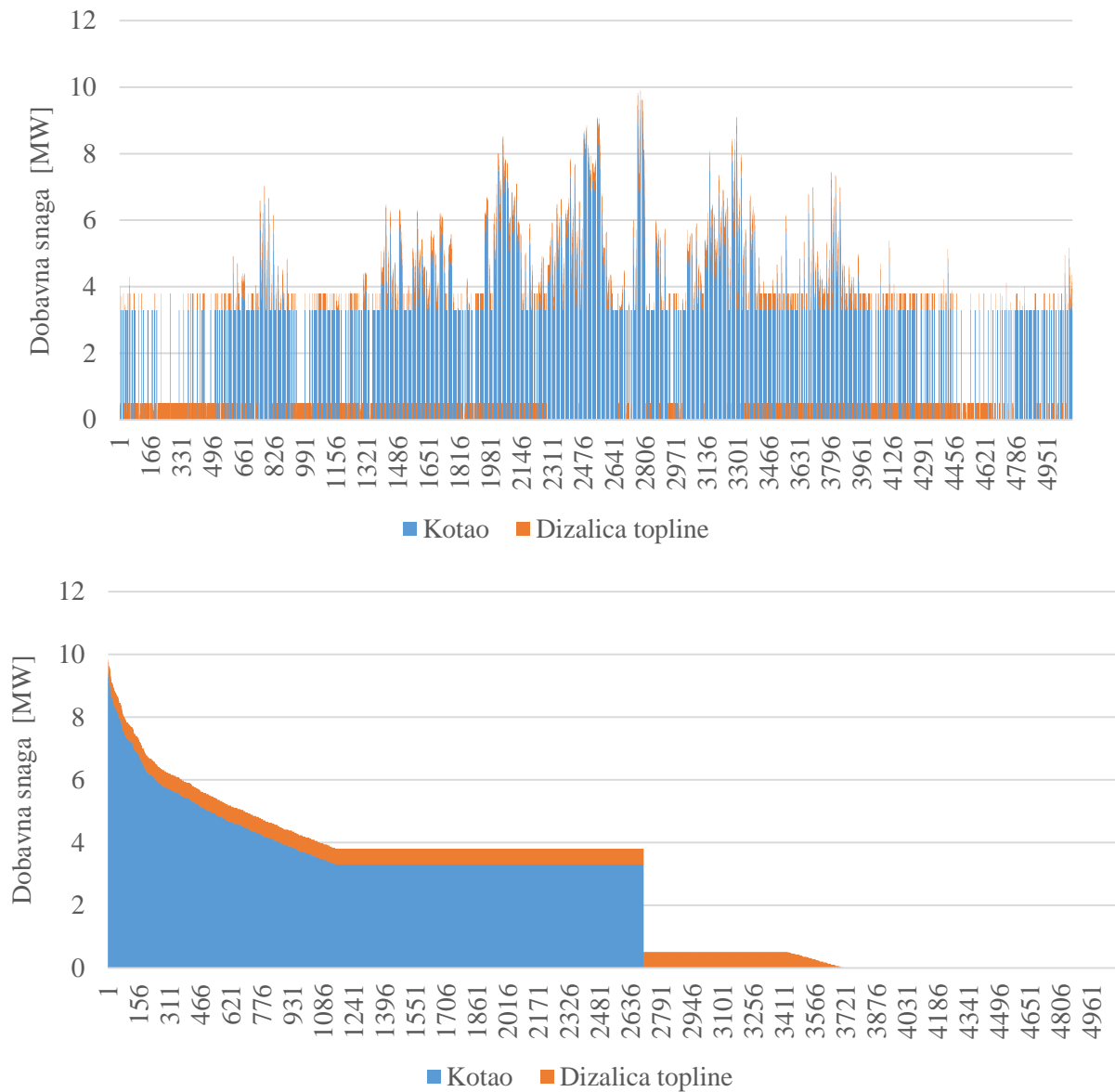
Sljedeće slike prikazuju rad CTS-a za Kombinaciju 1 ($f_{kolektor} = 10\%$) i Kombinaciju 4 ($f_{kolektor} = 30\%$).



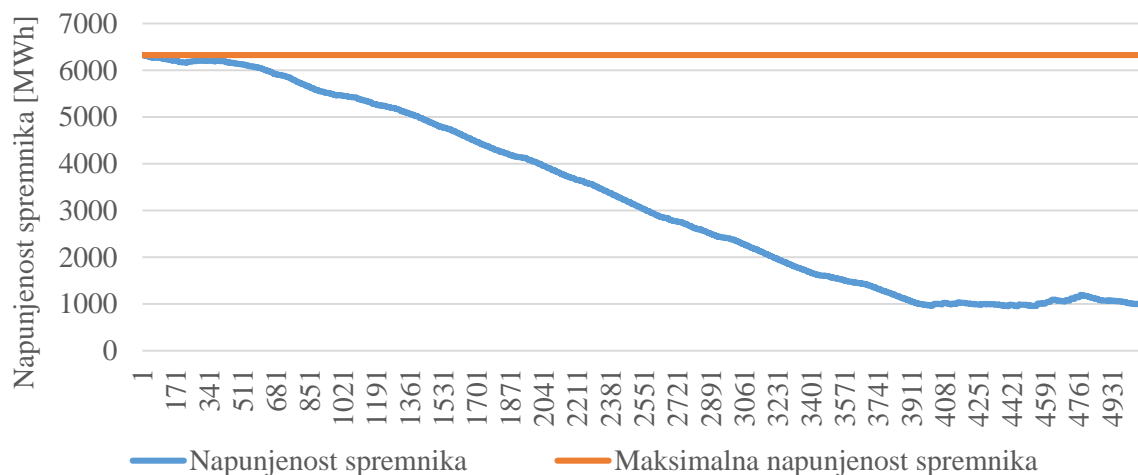
Slika 43. Prikaz rada kotla i dizalice topline za Scenarij 3, Kombinaciju 1



Slika 44. Prikaz rada spremnika topline za Scenarij 3, Kombinaciju 1



Slika 45. Prikaz rada kotla i dizalice topline za Scenarij 3, Kombinaciju 4



Slika 46. Prikaz rada spremnika topline za Scenarij 3, Kombinaciju 4

Optimizacija Scenarija 3 podrazumijeva samo optimizaciju rada CTS-a kako bi se minimalizirali troškovi proizvodnje toplinske energije. Toplinski spremnik se većinu vremena prazni tijekom srednjeg perioda (1272.-3816. sata). Očito je da se povećanjem proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora smanjuje vrijeme rada kotla pa čak i dizalice topline. Pri udjelu od 30% toplinske energije iz solarnih kolektora, kotao oko 50% vremena radi na minimalnoj tehničkoj snazi.

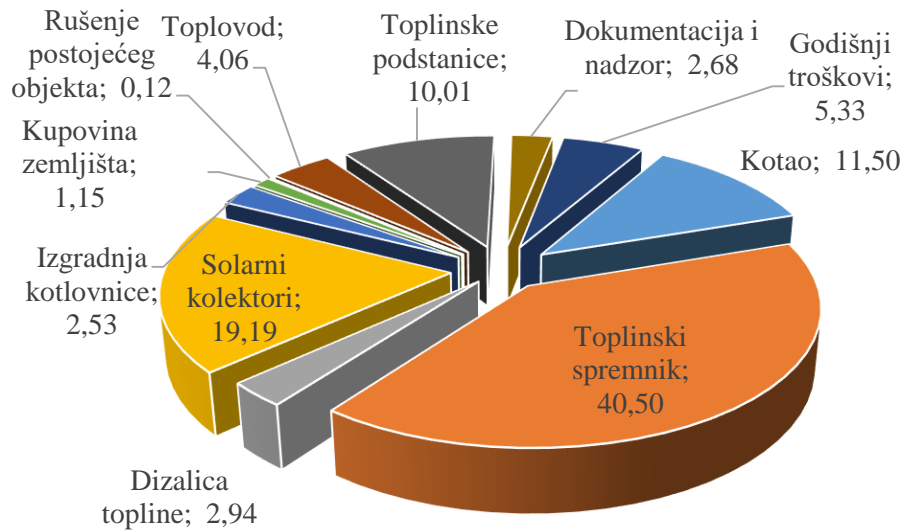
Toplinski se spremnik također i puni preko sezone grijanja pomoću solarnih kolektora, ali ta je toplinska energija nezamjetna i ne predstavlja veliki udio u proizvodnji. Premda ugradnja toplinskog spremnika smanjuje rad kotla i DT, tehnno-ekonomska analiza pokazuje da investicija u takav sustav na ovome primjeru nije isplativa (Tablica 30.).

Tablica 30. Rezultati tehnno-ekonomske analize, Scenarij 3

Kombinacija	NPV [€]	IRR [%]	PP [g]	Potrebni poticaju za NPV=0 [%]	Tarifa za kućanstva pri NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]	Tarifa za poslovne potrošače pri NPV=0 [€/kWh] / [HRK/kWh]
Kombinacija 1 – 10%	-3.036.719,77	0,492	19,60	28,8	0,0621 / 0,4659	0,0815 / 0,6116
Kombinacija 2 – 15%	-5.373.635,63	-0,951	22,34	38,77	0,0715 / 0,5365	0,0939 / 0,7044
Kombinacija 3 – 20%	-7.754.750,34	-1,955	24,51	45,1	0,0811 / 0,6086	0,1065 / 0,7990
Kombinacija 4 – 30%	-12.671.680,94	-3,349	27,90	52,9	0,1010 / 0,7574	0,1326 / 0,9943

Tablica 30. pokazuje kako je ovakva investicija neisplativa za bilo koju od kombinacija. Kako bi se dobio NPV jednak nuli potrebni su poticaji od 28,8% za najmanju kombinaciju do 52,9% za najveću kombinaciju. Ako dobivanje poticaja ne bi bilo moguće tada je potrebno povećati cijene tarifa toplinske energije od 1,25 puta za najmanju kombinaciju do 2,03 za najveću izvedbu solarnog CTS-a. Takve tarife toplinske energije dovode u pitanje izvođenje tog projekta zato jer je velika mogućnost da kupci neće pristati na tako visoke cijene toplinske energije.

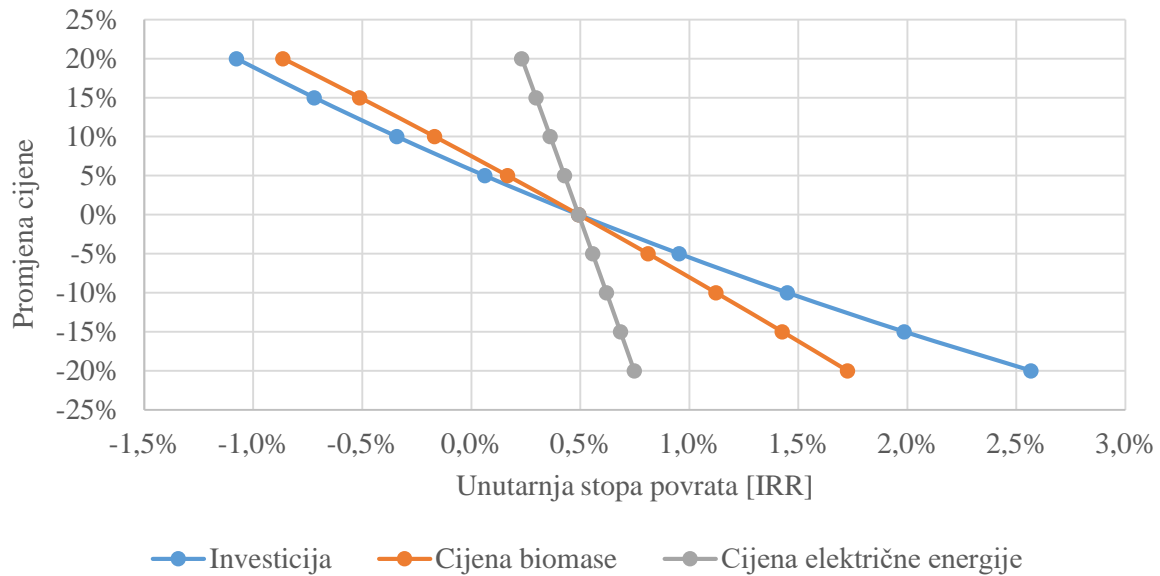
Kao najbolja izvedba solarnog CTS-a je izabrana verzija 1 koja može ponuditi najmanje cijene, a također su joj potrebni najmanji poticaji kako bi projekt bio isplativ s referentnim cijenama toplinske energije. Slika 47. Raspodjela investicijskih troškova i godišnjih troškova prikazuje raspodjelu troškova investicija i godišnjih troškova.



Slika 47. Raspodjela investicijskih troškova i godišnjih troškova, Scenarij 3, Kombinacija 1

Solarni sustav grijanja predstavlja veliku početnu investiciju, pogotovo ako uključuje sezonski toplinski spremnik. Slika 54. prikazuje kako za Scenarij 3, Kombinaciju 1, sezonski toplinski spremnik predstavlja najveći udio početne investicije od čak 40,5%. Radi usporedbe, za Scenarije 1 i 2, udio toplinskog spremnika u ukupnoj investiciji je iznosio oko 1%. Također solarni kolektori imaju udio od 19,19% dok kotao koji je u prijašnjim scenarijima predstavljao većinu, u Scenariju 3 iznosi tek 11,5%. Ovo pokazuje kako je solarni CTS vrlo investicijski zahtjevan projekt i izvediv je samo ako je nužno potreban. Solarni CTS ne treba biti nužno financijski neisplativ, što se može vidjeti prema velikom broju projekata koji su integrirali solarno grijanje u CTS [48]. Mogući razlozi ovakve financijske neisplativosti su sljedeći: CTS grada Ogulina ne pokriva proizvodnju toplinske energije za PTV što bi donijelo dodatna primanja, ali i smanjilo investicijsku cijenu toplinskog spremnika. Naime, ovako veliki toplinski spremnik je potreban zato što se tijekom ljetne sezone (vrijeme punjenja toplinskog spremnika) spremnik ne prazni, ako bi se uvela proizvodnja toplinske energije za PTV, većina te potrošnje bi se tijekom ljeta pokrila upravo iz kolektora; nema potrebe za tako velikim spremnikom. Razlog financijske neisplativosti se ne treba tražiti u meteorološkim uvjetima, sjeverne zemlje poput Danske i Finske imaju slične specifične efektivne toplinske snage solarnih kolektora [44]. Nadalje, sezonski toplinski spremnici su ovome slučaju napravljeni u obliku jama napunjenih s vodom, čest je slučaj da spremnik postoji u obliku već postojećih spilja ili kaverni koje je samo potrebno prilagoditi za korištenje [19]; dodatno je smanjena investicijska cijena toplinskog spremnika.

Kao i za sve scenarije, i za Scenarij 3 je provedena analiza osjetljivosti (Slika 48.)



Slika 48. Analiza osjetljivosti, Scenarij 3, Kombinacija 1

Za razliku od Scenarija 1 i 2 gdje je najveća promjena IRR-a bila posljedica cijena biomase, za Scenarij 3 najveću promjenu uzrokuje početna investicija zato jer je početna investicija veća od ostalih scenarija. Promjene IRR-a su relativno male, maksimalna promjena IRR-a je s 0,492% na -1% povećanjem cijena investicija za 20%, smanjenjem cijena investicija za 20% od referentne vrijednosti dobiva se IRR od 2,5%. Promjenom cijena biomase dobivaju se vrijednosti od 1,1%, odnosno 1,8%. Kao i u ostalim scenarijima promjena cijena električne energije ne pridonosi puno promjeni IRR-a, iznosi 0,3% odnosno 0,7% ovisno o promjeni cijena.

8. ZAKLJUČAK

Centralizirani toplinski sustav je vrlo učinkoviti alat za smanjenje potrošnje energije, emisija CO₂, ovisnosti o uvozu fosilnih goriva i povećanje energetske učinkovitosti. EU je prepoznala važnost korištenja CTS-a, što se vidi iz toga da su navedeni u prijedlogu Strategije za grijanje i hlađenje kao jedna od najvažnijih smjernica. Osim što predstavljaju rješenje vezano za energetske učinkovitost, predstavljaju i neizbježan dio budućih energetskih sustava koji imaju povećane udjele OIE jer je na taj način povećana fleksibilnost sustava; električna energija se može vrlo učinkovito pretvoriti u toplinsku pomoću dizalica topline ili elektrootpornih grijalica te na taj način smanjiti višak u proizvodnji.

U sklopu ovoga rada napravljeno je mapiranje potreba za toplinskom energijom u gradu Ogulinu i u skladu s time predložene su 3 konfiguracije distribucijskog sustava: najveća koja obuhvaća sve popisane objekte, najmanja koja sadrži samo objekte uz samu kotlovnice te konfiguracija u koju spadaju samo objekti koji već imaju instalacije potrebne za spajanje na centralizirani toplinski sustav; spojeni su na već postojeći centralizirani toplinski sustav ili imaju centralno grijanje. Koristio se pretpostavljeni iznos specifične potrošnje toplinske energije od 200 kWh/m², odnosno 40 W/m³ za vršno toplinsko opterećenje pri čemu se grije 90% neto površine, tj. volumena. Potrebe za potrošnom toplom vodom nisu pokrivene ovim sustavom. Nakon što su definirane distribucijske verzije izrađena su 3 scenarija proizvodnje toplinske energije koji obuhvaćaju kotao na biomasu, dizalicu topline, solarne kolektore i toplinski spremnik. Prvi scenarij sadrži samo kotao na biomasu i toplinski spremnik, drugi scenarij se nastavlja na prvi uvodeći dizalicu topline, a treći dodatno uvodi solarne kolektore i satni toplinski spremnik zamjenjuje sa sezonskim. Kako bi se odredilo satno opterećenje za pojedinu konfiguraciju korištena je metoda stupanj-sat. Najisplativija konfiguracija mreže i scenarij proizvodnje toplinske energije odredili su se optimizacijom veličine spremnika i rada sustava. Optimizacijski kod korišten u ovome radu razvijen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Katedri za energetska postrojenja i energetiku te kao ulazne varijable koristi distribuciju potražnje toplinske energije, snagu i učinkovitost proizvodnih jedinica, specifične troškove proizvodnje toplinske energije i specifičnu cijenu toplinskog spremnika. Kao rezultat optimizacije dobiva se veličina spremnika i proizvodnja toplinske energije na način kojim su minimalizirani ukupni troškovi. S tako dobivenim podacima napravljena je tehno-ekonomska analiza gdje je kao najvažniji pokazatelj isplativosti projekta odabrana cijena isporučene toplinske energije koja bi osigurala neto sadašnju vrijednost jednaku nuli. Kao referentne cijene toplinske energije odabrane su tarife centraliziranog toplinskog sustava u Karlovcu; 0,3740 HRK/kWh za kućanstva i 0,4910 HRK/kWh za ostale korisnike.

Optimizacija prvog scenarija napravljena je za sve konfiguracije mreže, čije ukupne potrebe za toplinskom energijom iznose: 18.211.320, 3.830.220, odnosno 6.517.980 MWh. Instalirani kapacitet kotla na biomasu iznosi 120% vršnog toplinskog opterećenja: 15, 3,2 i 5,5 MW ovisno o konfiguraciji. Kao najisplativija pokazala se najveća konfiguracija pri čemu kapacitet toplinskog spremnika iznosi 5,56 MWh (79,43 m³), a cijene isporučene toplinske energije se mogu smanjiti do 0,3293 HRK/kWh za kućanstva, odnosno 0,4320 HRK/kWh za ostale korisnike, što predstavlja smanjenje cijene za 12% u odnosu na referentnu. Drugi scenarij uvodi dizalicu topline snage 0,5 MW u najisplativiju konfiguraciju iz prvog scenarija pri čemu se ukupna instalirana snaga mijenja od 120% do 80% vršnog toplinskog opterećenja. Kao najisplativija verzija pokazala se ona čija je ukupna instalirana snaga jednaka 90% ukupnog vršnog opterećenja, pri čemu je dobavna snaga kotla tada jednaka 13,2 MW, a toplinski

spremnik je optimiziran na veličinu od 4,9 MWh (70 m³). Na ovaj način, moguće je smanjiti cijene toplinske energije do 0,3201 HRK/kWh za kućanstva, odnosno 0,4203 HRK/kWh, što predstavlja smanjenje cijene za 14% od referentne. Treći scenarij uvodi solarne kolektore i sezonski toplinski spremnik pri čemu su instalirani kapaciteti jednaki onima iz najisplativije kombinacije drugog scenarija. Napravljene su 4 verzije pri čemu se mijenjao udio proizvodnje iz solarnih kolektora (10, 15, 20 i 30%). Ovo je jedini scenarij gdje se veličina spremnika definira kao ulazni parametar. Sve kombinacije su se pokazale neisplativima ako se ne koriste bespovratni poticaji, pri čemu je najisplativija ona najmanja; udio proizvodnje iz solarnih kolektora jednak 10%, što zahtjeva instalaciju kolektora ukupne korisne površine od 6,375 m² i sezonski toplinski spremnik od 2.091 MWh (29.900 m³). Tada je potrebno osigurati 29% bespovratnih poticaja kako bi se postigla neto sadašnja vrijednost jednaka nuli ili povećati cijene toplinske energije na 0,4659 HRK/kWh za kućanstva, odnosno 0,6116 HRK/kWh za ostale korisnike što predstavlja povećanje cijene za 25% od referentnih. Dodatno je za svaki od scenarija napravljena i analiza osjetljivosti pri čemu se promatrala ovisnost unutarnje stope povrata na promjenu cijena investicija i energenata od $\pm 20\%$. Kod prva dva scenarija najveći utjecaj imala je promjena cijene biomase dok je kod trećeg scenarija, najveći utjecaj imala promjena cijene investicija.

Kao zaključak, može se reći kako je projekt uvođenja centraliziranog toplinskog sustava isplativ, posebice pri uvođenju dizalice topline. Kako bi korištenje solarnih kolektora i velikih sezonskih spremnika postalo isplativo potrebno je koristiti bespovratne investicije.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen u suradnji s Upravom Grada Ogulina i Regionalnom energetskekom agencijom sjeverozapadne Hrvatske (REGEA).

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekata STRATEGO (ugovor broj EE/13/650) financiranog od strane Europske komisije kroz program Intelligent Energy Europe, CoolHeating (projekt broj 691679) financiranog od strane Europske komisije kroz program Obzor 2020 i 4DH financiranog od strane Inovation Fund Denmark.

REFERENCE

- [1] C2ES (Center for Climate and Energy Solutions), Outcomes Of The U.N. Climate Change Conference In Paris, dostupno ovdje: <http://www.c2es.org/international/negotiations/cop21-paris/summary>
- [2] Paris Agreement, dostupno ovdje: http://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf
- [3] United Nations Treaty Collection, dostupno ovdje: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&lang=en
- [4] World Bank
- [5] Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015, Annex 1, dostupno ovdje: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf#page=30>
- [6] Climate Action Tracker, dostupno ovdje: <http://climateactiontracker.org/countries.html>
- [7] Submission by Latvia and the European Commission on behalf of the European Union and its member states, dostupno ovdje: <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Latvia/1/LV-03-06-EU%20INDC.pdf>
- [8] Communication From The Commission To The Council, The European Parliament, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions: Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius, The way ahead for 2020 and beyond, dostupno ovdje: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0002&from=RO>
- [9] Direktiva o promicanju uporabe energije iz OIE, Dostupno ovdje: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>
- [10] Direktiva o energetske učinkovitosti, dostupno ovdje: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1399375464230&uri=CELEX:32012L0027>
- [11] Komunikacija komisije europskom parlamentu, vijeću, europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija, Okvir za klimatsku i energetske politiku u razdoblju 2020. – 2030. dostupno ovdje: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52014DC0015>
- [12] Eurostat, Greenhouse gas emission statistics, dostupno ovdje: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics
- [13] Eurostat, Renewable energy statistics, dostupno ovdje: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- [14] Eurostat, Energy saving statistics, dostupno ovdje: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_saving_statistics
- [15] Komunikacija komisije Europskom parlamentu, vijeću, europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija, Strategija EU-a za grijanje i hlađenje, dostupno ovdje: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/hr/TXT/?uri=CELEX:52016DC0051>
- [16] Commission staff working document, Review of available information accompanying the document, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an

- EU Strategy for Heating and Cooling, dostupno ovdje:
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_autre_document_travail_service_part1_v6_0.pdf
- [17] The role of district heating in future renewable energy systems; H. Lund, B. Möller, B.V. Mathiesen, A. Dyrelund, 2010, dostupno ovdje:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420900512X>
- [18] Heat Roadmap Europe 2, Connolly, David; Mathiesen, Brian Vad; Østergaard, Poul Alberg; Møller, Bernd; Nielsen, Steffen; Lund, Henrik; Persson, Urban; Werner, Sven; Grözinger, Jan; Boermans, Thomas; Bosquet, Michelle; Trier, Daniel, 2013, dostupno ovdje:
[http://vbn.aau.dk/files/77342092/Heat Roadmap Europe Pre Study II May 2013.pdf](http://vbn.aau.dk/files/77342092/Heat_Roadmap_Europe_Pre_Study_II_May_2013.pdf)
- [19] District Heating and Cooling, Svend Frederiksen i Sven Werner, 2015
- [20] Lund H, et al., 4th Generation District Heating (4GDH), Energy (2014), dostupno ovdje:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002369>
- [21] Legionella Infection Risk from Domestic Hot Water, dostupno ovdje:
http://wwwnc.cdc.gov/eid/article/10/3/02-0707_article
- [22] GeoDH Europe, Geothermal District Heating, dostupno ovdje:
http://map.mfgi.hu/geo_DH/
- [23] STRATEGO, Enhanced Heating & Cooling Plans
- [24] Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016. – 2030., Energetski institut Hrvoje Požar, studeni 2015, dostupno ovdje:
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/DOC_88244.pdf
- [25] Godišnji energetski pregled, Energija uHrvatskoj 2013, Ministarstvo gospodarstva, dostupno ovdje: <http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2015/02/Energija2013.pdf>
- [26] ISOPLUS katalog
- [27] Technology data for energy plants, 2012
- [28] Herz katalog
- [29] M. Brčić, High temperature heat pumps applying natural fluids, 2014
- [30] Solar district heating guidelines, Collection of fact sheets, 2012
- [31] I. Dincer, M. A. Rosen, Thermal energy storage system and applications, Second edition, 2011
- [32] Akcijski plan energetski održivog razvitka rada Ogulina (SEAP)
- [33] Web stranica SKG d.o.o. Ogulin, dostupno ovdje: <http://www.skg-ogulin.hr/>
- [34] ISOPLUS katalog, dostupno ovdje: <http://www.isoplus-pipes.com/en/products/rigid-connection-systems/continuous-double-pipe/>
- [35] MATLAB, dostupno ovdje: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [36] OPTI Toolbox, dostupno ovdje: <http://www.i2c2.aut.ac.nz/Wiki/OPTI/index.php>
- [37] Meteororm, dostupno ovdje: <http://www.meteororm.com/>
- [38] Cropex – burza električne energije, dostupno ovdje: <http://www.cropex.hr/hr/>
- [39] Europska burza električne energije EEX, dostupno ovdje: <https://www.eex.com/en/>
- [40] REGEA, Priručnik o gorivima iz drvne biomase; Proizvodnja, zahtjevi kvalitete, trgovina, dostupno ovdje:
http://www.regea.org/assets/files/objavilismo2012/D32_Biofuel_hanbook_REGEA.pdf
- [41] PVGIS, dostupno ovdje: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [42] M. Gulin, M. Vršak, M. Baotić: Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces

- [43] SunEarth Tools, dostupno ovdje: <http://www.sunearthtools.com/solar/sunrise-sunset-calendar.php>
- [44] Simple method for Converting Installed Solar Collector to Annual Collector Output, dostupno ovdje: <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/documents/statistics/3-Nielsen-m2-kwh-webinar.pdf>
- [45] Institut für Solartechnki, dostupno ovdje: <http://www.spf.ch/Home.44.0.html?&L=6>
- [46] Hrvatska banka za obnovu i razvitak, dostupno ovdje: <http://www.hbor.hr/sec1406>
- [47] REGEA, troškovnik
- [48] SDH web stranica s podacima o postojećim projektima, dostupno ovdje: <http://solar-district-heating.eu/tabid/575/Default.aspx>

PRILOZI

- I. CD-R disc