

# Solarna toplana sa sezonskim spremnicima toplinske energije u gradu Zagrebu

---

**Vidović, Vladimir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:999140>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vladimir Vidović**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Vladimir Vidović

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se projektu Keepwarm sufinanciranom iz programa za istraživanje i razvoj Obzor 2020. (broj ugovora o sufinanciranju 784966) u sklopu kojeg je izrađen i ovaj diplomski rad.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Krajačiću na pomoći pri izradi diplomskog rada

Također se zahvaljujem Energetskom Institutu Hrvoje Požar za pomoć pri izradi diplomskog rada.

Najveće zahvale roditeljima za podršku tokom studija.

Vladimir Vidović



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: **Vladimir Vidović** Mat. br.: **0035196162**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Solarna toplana sa sezonskim spremnicima toplinske energije u gradu Zagrebu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Solar district heating plant with a seasonal heat storage in the city of Zagreb**

Opis zadatka:

Solarne toplane sa sezonskim spremnicima toplinske energije postaju sve češća rješenja za zadovoljavanje toplinskih potreba gradova i naselja s instaliranim centraliziranim toplinskim sustavima. U Danskoj su toplane instalirale više od 1.300.000 m<sup>2</sup> solarnih toplinskih kolektora u periodu 1988.-2018. te su sezonski spremnici toplinske energije sve zastupljeniji. U Austriji, u Grazu imaju planove gradnje solarne toplane s površinom kolektora od 150.000 do 650.000 m<sup>2</sup> te toplinskim spremnicima zapremnine vode od 100.000 do 2.000.000 m<sup>3</sup>.

Prema sličnim postrojenjima u Danskoj i Austriji u diplomskom radu potrebno je napraviti:

1. Za sadašnju potrošnju toplinske energije (grijanje prostora i potrošnu toplu vodu) u postojećem centraliziranom toplinskom sustavu grada Zagreba potrebno je dimenzionirati solarnu toplanu (odrediti potrebnu veličinu solarnih toplinskih kolektora te veličinu sezonskog toplinskog spremnika) da se zadovoljava između 40% do 80% toplinske energije. Uz dimenzioniranje treba odrediti i potrebne površine zemljišta te lokacije za solarne kolektore i sezonske spremnike.
2. Potrebno je isplanirati širenje centraliziranog toplinskog sustava na naselja urbane aglomeracije Zagreb, gdje je dovoljna gustoća potražnje za toplinskom energijom i tehniko-ekonomski je isplativo graditi spojne toplovođe. Za taj slučaj potrebno je odrediti duljinu, lokacije i dimenzije budućeg toplovođa te dimenzionirati solarne toplane i sezonske spremnike toplinske energije da zadovoljavaju 100% potražnje za toplinskom energijom. Potrebno je odrediti potrebne površine zemljišta i lokacije za solarne toplinske kolektore, toplinske spremnike te analizirati rad centraliziranog toplinskog sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.


Predvideni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
1.1. Opis zadatka i metode .....	1
2. Centralizirani solarni toplinski sustavi .....	4
2.1. Solarni kolektori.....	4
2.2. Toplinski spremnici.....	6
2.3. Primjeri dobrih praksi solarnih termoelektrana .....	8
2.3.1. Silkeborg .....	8
2.3.2. Vojens .....	8
2.3.3. Gram .....	9
2.3.4. BIG Solar Graz .....	10
2.3.5. Vukovar.....	10
3. Toplinski sustav Grada Zagreba .....	12
3.1. Izvori topline .....	12
3.2. Toplovodni sustav .....	14
3.3. Potrošnja toplinske energije .....	16
3.4. Solarna iradijacija u Zagrebu .....	20
3.5. Performanse solarnih kolektora .....	21
3.6. Odnos korisne površine kolektora i ukupne površine zemljišta .....	23
4. Lokacije za solarne toplane .....	25
4.1. Hotmaps .....	25
4.2. Krovovi .....	26
4.3. Jakuševac .....	28
4.4. Istočna petlja .....	29
4.5. Duboki Jarak .....	30
4.6. Jankomir jug.....	32
4.7. Donja Dubrava .....	33
4.8. Odabir lokacija .....	36
5. Solarne toplane .....	37
5.1. Solarna toplana Jankomir jug.....	37
5.2. Solarna toplana Donja Dubrava .....	39
6. Simulacija sustava u alatu <i>EnergyPLAN</i> .....	41
6.1. Ulazni podaci .....	41
6.2. Simulacija.....	42

6.3. Rezultati .....	43
7. Cijena energije .....	48
7.1. Cijena toplane bez spremnika .....	48
7.2. Cijena toplinskog spremnika.....	49
7.3. Godišnji troškovi održavanja .....	50
7.4. Trošak toplinske energije (LCOH) .....	50
7.5. Trenutni trošak za proizvodnju topline .....	52
8. Širenje CTS-a Urbane aglomeracije Zagreb.....	53
8.1. Urbana aglomeracija Zagreb .....	53
8.2. Zagreb istok.....	54
8.3. Dugo Selo.....	58
8.4. Lanište i okolni kvartovi .....	59
8.5. Sveta Nedelja .....	60
8.6. Samobor .....	61
8.7. Zaprešić.....	62
8.8. Velika Gorica .....	63
8.9. Buzin i Velika Mlaka .....	65
8.10. Prikaz cijele aglomeracije .....	66
9. Scenarij 1 - Jedna velika toplana za 100% potreba CTS-a.....	68
9.1. Solarna toplana – 100% potreba .....	68
9.2. Buduća toplovodna mreža.....	69
9.3. Ekonomska analiza .....	77
9.4. Osvrt na scenarij 1.....	79
10. Scenarij 2 – Više solarnih toplana .....	80
10.1. Solarne toplane.....	80
10.1.1. Velika Gorica .....	80
10.1.2. Brezovica .....	81
10.1.3. Zaprešić.....	82
10.1.4. Sesevski Kraljevec .....	83
10.1.5. Sveta Nedelja .....	83
10.1.6. Godišnja proizvodnja topline .....	84
10.1.7. Ostale potencijalne lokacije .....	84
10.2. Toplovodna mreža.....	86
10.3. Ekonomska analiza .....	93
10.4. Osvrt na scenarij 2.....	94
11. ZAKLJUČAK.....	95
LITERATURA.....	97
PRILOZI.....	100

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Sučelje energyPLAN-a[2] .....	2
Slika 2.	Shematski prikaz CSTS-a [4] .....	4
Slika 3.	Solarni kolektor s postoljem proizvođača <i>Arcon</i> [6].....	5
Slika 4.	Prikaz promjene troškova polja kolektora s porastom površine [6].....	5
Slika 5.	Kratkoročni spremnik topline u TE-TO Zagreb [7] .....	6
Slika 6.	Izgradnja toplinskog spremnika u Vojensu (203000 m <sup>3</sup> ) [8] .....	7
Slika 7.	Solarni kolektori u Silkeborgu [9].....	8
Slika 8.	Solarna toplana sa spremnikom topline u Vojensu [10].....	9
Slika 9.	Solarna toplana u Gramu [12] .....	9
Slika 10.	Karakteristike projekta BIG Solar Graz [13] .....	10
Slika 11.	Solarna toplana u Vukovaru [14] .....	11
Slika 12.	EL-TO [15].....	13
Slika 13.	TE-TO [15].....	13
Slika 14.	Zagreb zapad-sjever [17].....	14
Slika 15.	Zagreb istok-sjever [17] .....	14
Slika 16.	Zagreb istok-jug [17].....	15
Slika 17.	Temperatura polaza u EL-TO [18].....	15
Slika 18.	Temperatura polaza u TE-TO [18].....	16
Slika 19.	Satna potrošnja PTV-a kroz dan.....	17
Slika 20.	Model satne potrošnje toplinske energije za 2018. ....	19
Slika 21.	Podaci o sunčevoj iradijaciji za Zagreb [20] .....	20
Slika 22.	Prikaz specifične snage kolektora .....	22
Slika 23.	Minimalni razmak između redova kolektora [23].....	23
Slika 24.	Prikaz toplinskih potreba Zagreba (toplije boje predstavljaju veće toplinske potrebe) [3].....	25
Slika 25.	Prikaz raspoloživih neizgrađenih površina za montiranje solarnih kolektora [3].	26
Slika 26.	Prikaz raspoloživih krovnih površina za postavljanje solarnih kolektora [3] .....	27
Slika 27.	Prikaz potencijala u najurbanije dijelu Zagreba [3] .....	27
Slika 28.	Satelitska snimka saniranog odlagališta otpada površine 316547 m <sup>2</sup> [24] .....	28
Slika 29.	Površina oko istočne Petlje [24].....	29
Slika 30.	Satelitska snimka Dubokog Jarka ( <i>Brownfield</i> površina u GUP-u označena smeđom linijom) [24].....	31
Slika 31.	Površina u blizini Jankomirskog mosta [24] .....	32
Slika 32.	Navedena površina označena u HOTMAPS alatu [3].....	33
Slika 33.	Satelitska snimka neizgrađene površine u Dubravi [24].....	34
Slika 34.	Procjena potencijala za proizvodnju toplinske energije u alatu HOTMAPS [3] ..	35
Slika 35.	Površina namijenjena za toplinski spremnik – Jankomir jug [24] .....	37
Slika 36.	Površina namijenjena za spremnik – Donja Dubrava [24].....	39
Slika 37.	Prikaz ulaznih podataka za potražnju toplinske energije .....	41
Slika 38.	Prikaz ulaznih podataka za proizvodnju toplinske energije .....	41
Slika 39.	Prikaz ulaznih podataka za proizvodnju topline iz toplinskih kotlova.....	42
Slika 40.	Grafički prikaz rezultata unutar programa .....	43
Slika 41.	Proizvodnja topline za tjedan u siječnju.....	43
Slika 42.	Proizvodnja topline za tjedan u ožujku .....	44
Slika 43.	Proizvodnja topline za tjedan u travnju .....	44
Slika 44.	Pohranjena energija u spremnicima topline .....	45
Slika 45.	Proizvodnja topline za tjedan u rujnu .....	45
Slika 46.	Proizvodnja topline za tjedan u studenom.....	46



Slika 47.	Pohranjena energija u spremnicima topline .....	46
Slika 48.	Proizvodnja topline za tjedan u prosincu .....	46
Slika 49.	Pohranjena energija u spremnicima topline .....	47
Slika 50.	Udio troškova toplane bez spremnika [21].....	48
Slika 51.	Cijena kolektora [21].....	48
Slika 52.	Analiza osjetljivosti cijene energija .....	51
Slika 53.	Veći gradovi UAZ-a [32] .....	53
Slika 54.	Gustoća potreba za toplinskom energijom na promatranom području [3].....	54
Slika 55.	Prikaz maksimalne potrebne snage tokom godine za cijeli grad Zagreb [3].....	55
Slika 56.	Predloženo područje za širenje CTS-a na istoku grada Zagreba [3] .....	55
Slika 57.	Zona u okolici Radničke ulice [3] .....	57
Slika 58.	Gustoća potrebe za toplinom na području Dugog Sela [3] .....	58
Slika 59.	Toplinske potrebe navedenih područja [3].....	59
Slika 60.	Gustoća toplinskih potreba u Sv. Nedelji [3] .....	60
Slika 61.	Gustoća toplinske potražnje za Samobor [3].....	61
Slika 62.	Gustoća potražnje za toplinskom energijom u Zaprešiću [3].....	62
Slika 63.	Gustoća potražnje za toplinskom energijom u Velikoj Gorici [3] .....	64
Slika 64.	Gustoća potražnje na spojnom putu do Velike Gorice [3] .....	65
Slika 65.	Udjeli potražnje unutar CTS-a .....	66
Slika 66.	Područje predloženo za izgradnju solarne toplane – s potencijalnom proizvodnjom topline [3] .....	68
Slika 67.	Područje predloženo za solarnu toplanu [24].....	69
Slika 68.	Produženje toplovodne mreže – Zapad [24].....	70
Slika 69.	Prikaz jugoistočne grane – toplovod koji bi spajao postojeći zagrebački CTS, Veliku Goricu i buduću solarnu toplanu [24].....	73
Slika 70.	Dio istočne grana planirane mreže toplovoda do Sesveta i Dugog Sela [24] .....	74
Slika 71.	Ogranak koji povezuje okolicu Radničke ceste [24].....	74
Slika 72.	Odvojci jugozapadne grane toplovoda [24] .....	76
Slika 73.	Dijagram s analizom osjetljivosti za predloženu toplovodnu mrežu (bez toplovoda prema Velikoj Gorici i toplani) .....	78
Slika 74.	Zemljište za izgradnju solarne toplane kod Velike Gorice [24].....	80
Slika 75.	Zemljište za solarnu toplanu u Brezovici [24] .....	81
Slika 76.	Zemljište solarne toplane u Zaprešiću [24] .....	82
Slika 77.	Zemljište solarne toplane u Sesvetskom Kraljevcu [24] .....	83
Slika 78.	Zemljište solarne toplane u Svetoj Nedelji [24].....	84
Slika 79.	Predložena površina za solarnu toplanu kod Buzina [25] .....	85
Slika 80.	Zapadna grana – Scenarij 2 [24].....	86
Slika 81.	Jugoistočna grana – scenarij 2 [24] .....	88
Slika 82.	Istočna grana – scenarij 2 [24] .....	90
Slika 83.	Jugozapadna grana – scenarij 2 [24] .....	92
Slika 84.	Ovisnost transmisijskih troškova o diskontnoj stopi.....	94
Slika 85.	Kapaciteti solarnih toplana u Danskoj kroz zadnjih 10 godina [39] .....	96

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Procijenjeni troškovi izgradnje većeg sezonskog spremnika [6] .....	7
Tablica 2. Predviđanja potrošnje toplinske energije u Zagrebu [15] .....	12
Tablica 3. Potencijalna proizvodnja topline - Jakuševac .....	29
Tablica 4. Potencijalna proizvodnja topline – Istočna petlja.....	30
Tablica 5. Potencijalna proizvodnja topline – Duboki jarak .....	31
Tablica 6. Potencijalna proizvodnja topline - Jankomir.....	33
Tablica 7. Potencijalna proizvodnja topline – Dubrava (Ukupna površina) .....	34
Tablica 8. Potencijalna proizvodnja topline – Dubrava – bez šume .....	35
Tablica 9. Moguće lokacije za postavljanje solarnih kolektora .....	36
Tablica 10. Površina i proizvodnja topline solarne toplane Jankomir jug .....	38
Tablica 11. Karakteristike solarne toplane Jankomir jug .....	38
Tablica 12. Površina i proizvodnja topline solarne toplane Donja Dubrava.....	39
Tablica 13. Karakteristike solarne toplane Donja Dubrava .....	40
Tablica 14. Toplinske potrebe predloženog područja [3].....	56
Tablica 15. Parametri toplinskih potreba Dugog Sela [3] .....	58
Tablica 16. Parametri potreba za toplinom u Laništu i okolnim naseljima [3].....	59
Tablica 17. Parametri toplinskih potreba Sv. Nedelje [3] .....	60
Tablica 18. Parametri toplinske potražnje za Samobor [3] .....	62
Tablica 19. Parametri potražnje za toplinom u Zaprešiću [3][33].....	63
Tablica 20. Parametri potražnje topline u Velikoj Gorici [3][33].....	64
Tablica 21. Parametri potražnje za toplinom za Buzin i okolna mjesta [3] .....	65
Tablica 22. Parametri sadašnjih i budućeg predloženog CTS-a.....	66
Tablica 23. Parametri toplovoda - Zapad .....	70
Tablica 24. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad.....	71
Tablica 25. Parametri troškova izgradnje toplovoda [37] .....	72
Tablica 26. Parametri toplovoda – Jugoistok .....	73
Tablica 27. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad.....	73
Tablica 28. Parametri istočne grane .....	75
Tablica 29. Parametri istočne grane s troškovima izgradnje.....	75
Tablica 30. Parametri jugozapadne grane toplovoda .....	76
Tablica 31. Parametri jugozapadne grane s troškovima izgradnje.....	77
Tablica 32. Prikaz cijene toplovodne mreže za pojedine grane/etape svedene na MWh.....	77
Tablica 33. Trošak proširenja toplinske mreže .....	78
Tablica 34. Karakteristike solarne toplane Velika Gorica .....	81
Tablica 35. Karakteristike solarne toplane u Brezovici .....	81
Tablica 36. Karakteristike solarne toplane u Zaprešiću .....	82
Tablica 37. Karakteristike solarne toplane u Sesevskom Kraljevcu .....	83
Tablica 38. Karakteristike solarne toplane u Sv. Nedelji .....	84
Tablica 39. Parametri potencijalne solarne toplane kod Buzina .....	85
Tablica 40. Parametri toplovoda zapadne grane – scenarij 2 .....	86
Tablica 41. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad.....	87
Tablica 42. Parametri toplovoda jugoistočne grane – scenarij 2.....	88
Tablica 43. Parametri toplovoda jugoistočne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2 .....	89
Tablica 44. Parametri toplovoda istočne grane – scenarij 2.....	90
Tablica 45. Parametri toplovoda istočne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2 .....	90
Tablica 46. Parametri toplovoda jugozapadne grane – scenarij 2.....	92
Tablica 47. Parametri toplovoda jugozapadne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2 .....	92
Tablica 48. Troškovi proširenja toplinske mreže .....	93



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
SS(t)	Kh	Stupanj-sat, temperaturna razlika u pojedinom satu
T <sub>in</sub>	°C	Projektna temperatura grijane prostorije
T <sub>out</sub> (t)	°C	Vanjska temperatura
Q(t)	MWh	Potrebna toplina u pojedinom satu
Q <sub>d</sub>	GWh	Godišnja potražnja za toplinskom energijom
P <sub>g</sub> (t)	W	Snaga kolektora u pojedinom satu
A <sub>c</sub>	m <sup>2</sup>	Korisna površina kolektora
A <sub>s</sub>	m <sup>2</sup>	Površina spremnika
η <sub>0</sub>	-	Optička efikasnost kolektora
a <sub>1</sub>	W/(K*m <sup>2</sup> )	Toplinski gubici prvog reda
a <sub>2</sub>	W/(K <sup>2</sup> *m <sup>2</sup> )	Toplinski gubici drugog reda
G(t)	W/m <sup>2</sup>	Satno sunčevo zračenje okomito na kolektorsku površinu
T <sub>m</sub>	°C	Srednja temperatura grijanog medija
f	-	Sigurnosni faktor zbog ostalih gubitaka
R	-	Omjer površine cijelog kolektora i zemljišta
k	-	Omjer korisne kolektorske površine i zemljišta
Z	m <sup>2</sup>	Ukupna površina zemljišta
Z <sub>c</sub>	m <sup>2</sup>	Preostala površina zemljišta namijenjena za kolektore
x	m	Duljina kolektora
L <sub>min</sub>	m	Potrebni razmak između redova kolektora
ω	°	Kut nagiba kolektora
α	°	Najniži kut upada sunčevog zračenja
V <sub>s</sub>	m <sup>3</sup>	Volumen spremnika
h	kWh/m <sup>3</sup>	Volumni toplinski kapacitet toplinskog spremnika
H <sub>s</sub>	GWh	Toplinski kapacitet spremnika
C <sub>kol</sub>	EUR	Ukupna cijena kolektora
c <sub>kol</sub>	EUR/m <sup>2</sup>	Cijena kolektora po jedinici površine
C <sub>spr</sub>	EUR	Ukupna cijena spremnika
c <sub>spr</sub>	EUR/m <sup>3</sup>	Cijena spremnika po jedinici volumena
C <sub>ost</sub>	EUR	Ostali troškovi izgradnje solarne toplane
C <sub>odr</sub>	EUR/god.	Godišnji troškovi održavanja
d <sub>t</sub>	m	Promjer toplovodne cijevi
Q <sub>s</sub>	TJ	Godišnji iznos topline koji se opskrbljuje toplovodom
L	m	Duljina toplovoda

---

q	kWh/m <sup>2</sup> /god.	Specifična površinska godišnja toplina kolektora
p	W/m <sup>2</sup>	Specifična površinska snaga kolaktora

**SAŽETAK**

Solarne toplane se zadnjih godina sve češće koriste u centraliziranim toplinskim sustavima. Sve češće se pojavljuju solarne toplane s većim kapacitetima, poglavito u Danskoj. S obzirom da je sunčevo zračenje najintenzivnije tokom ljeta, a potrošnja toplinske energije najveća tokom zime – potrebno je pohraniti toplinsku energiju u sezonskim spremnicima. U blizini Zagreba postoji projekt solarne toplane u izgradnji, u Grazu gdje su klimatski uvjeti slični našima. Hrvatska ima veće razine sunčeve insolacije od Austrije i Danske, tako da sigurno postoji potencijal za korištenje solarnih toplana u hrvatskom energetsom sustavu. Jedini primjer solarne toplane za veće sustave se nalazi u Vukovaru.

U prvom dijelu rada su predložene 2 solarne toplane koje bi pokrivale oko polovice toplinskih potreba, predložene su površine i lokacije za solarne kolektore i spremnike toplinske energije. Prikazani su satni udjeli proizvedene topline iz pojedinih izvora tokom godine i nivo pohranjene topline u spremnicima. Napravljena je analiza troškova izgradnje i uprosječenog troška toplinske energije iz takvih toplana. Za usporedbu su analizirani troškovi proizvodnje topline iz plinskih kogeneracijskih postrojenja, kakva se najčešće koriste u Zagrebu, ali i u ostatku Hrvatske.

U drugom dijelu su povezana toplovodnom mrežom naseljena područja izvan Zagreba koja imaju dovoljnu gustoću toplinskih potreba za opravdavanje investicije izgradnje toplovoda. Prikazano je za koja područja unutar Urbane aglomeracije Zagreb je to isplativo i koji bi bili troškovi izgradnje po jedinici potrošene topline. Također su predložene rute kojima bi išli toplovodi. Za takav nadograđeni centralizirani toplinski sustav su predložena 2 scenarija – prvi sa velikom solarnom toplanom koja bi pokrivala 100% potreba cijelog sustava i drugi sa više manjih solarnih toplana koji bi bili raspoređeni diljem aglomeracije. Za solarne toplane su određene lokacije i dizajnirani konekcijski toplovodi.

Ključne riječi: CTS, solarna toplana, solarni kolektor, sezonski toplinski spremnik, LCOH

---

**SUMMARY**

Solar heating plants exist for many years, but they were not used for big district heating systems until lately. Today, implementation of this technology is more often than ever for big heating systems, especially in Denmark. Knowing that solar irradiation is more intense during the summer, and that heating demand is greater during the winter, it is necessary to store the heat in the seasonal storage. Near Zagreb, there is a solar heating plant project just being built, in Graz, where climate conditions are similar to the ones in Zagreb. Croatia has more solar insulation than Denmark and or Austria, so there is definitely potential for implementation of solar heating plants in Croatian energy system. Currently there is only one solar heating plant used in bigger heating system, and it is located in town called Vukovar.

In first part of this paper there were proposed 2 solar heating plants that would cover approximately half of the heating demand in current district heating system of Zagreb. Also, there were proposed areas and locations to fit solar collector fields and seasonal heat storages. There are shown hourly shares of heat, defined by the energy source and amount of heat being accumulated in heat storages. Cost analysis was made to determine the investment cost for solar plants and to determine levelized cost of heat (LCOH). In comparison, it was analyzed what would be the cost of energy produced in gas *combined heat and power* (CHP) plants, that are being used mostly today for heat production in Zagreb and the rest of Croatia.

In the second part, most populated areas around Zagreb were connected by the heating network. It was shown for which areas it is feasible to connect them to the existing district heating system and what would be the cost per unit of served heat. Routes for connection lines are also proposed. For the new, expanded heating system, there were created two scenarios – first one with proposed one big solar heating plant, that would cover all the demand from the mentioned system and the second scenario with many smaller solar heating plants that would be positioned in different locations around Zagreb. For the plants, there are proposed locations with needed area and also connecting lines to the rest of the system.

Key words: district heating, solar heating plant, seasonal heat storage, solar collector, LCOH

## 1. UVOD

Zagreb je grad sa umjerenom kontinentalnom klimom i hladnim zimama, zbog čega postoji značajna potreba za toplinskom energijom. Za te potrebe je u Zagrebu razvijen centralizirani toplinski sustav koji je u 2017. godini isporučio 1526,37 GWh toplinske energije krajnjim korisnicima. Toplinska energija centraliziranog sustava je dobivena iz prirodnog plina i loživog ulja koji su osim što predstavljaju problem za ekologiju, vrlo skup energent sa nepredvidivom cijenom u budućnosti. Osim cijene i ekologije navedeni energenti ne doprinose energetske neovisnosti i održivosti Republike Hrvatske jer ih se potrebe za prirodnim plinom i naftom pokrivaju pomoću uvoza [1].

Alternativa fosilnim gorivima za proizvodnju toplinske energije može biti energija sunca za čije iskorištavanje nam je potrebna solarna toplana. Solarne toplane se za centralizirane toplinske sustave se sve više koriste u svijetu, sa najraširenijom primjenom u Danskoj.

Solarne toplane bi za slučaj grada Zagreba, poput većine primjera u Danskoj, trebale uključivati i sezonske toplinske spremnike. Na taj način bi se sunčeva energija pohranjena za vrijeme ljeta mogla koristiti tokom zime kad su znatno manja sunčeva insolacija i veće potrebe za toplinskom energijom.

### 1.1. Opis zadatka i metode

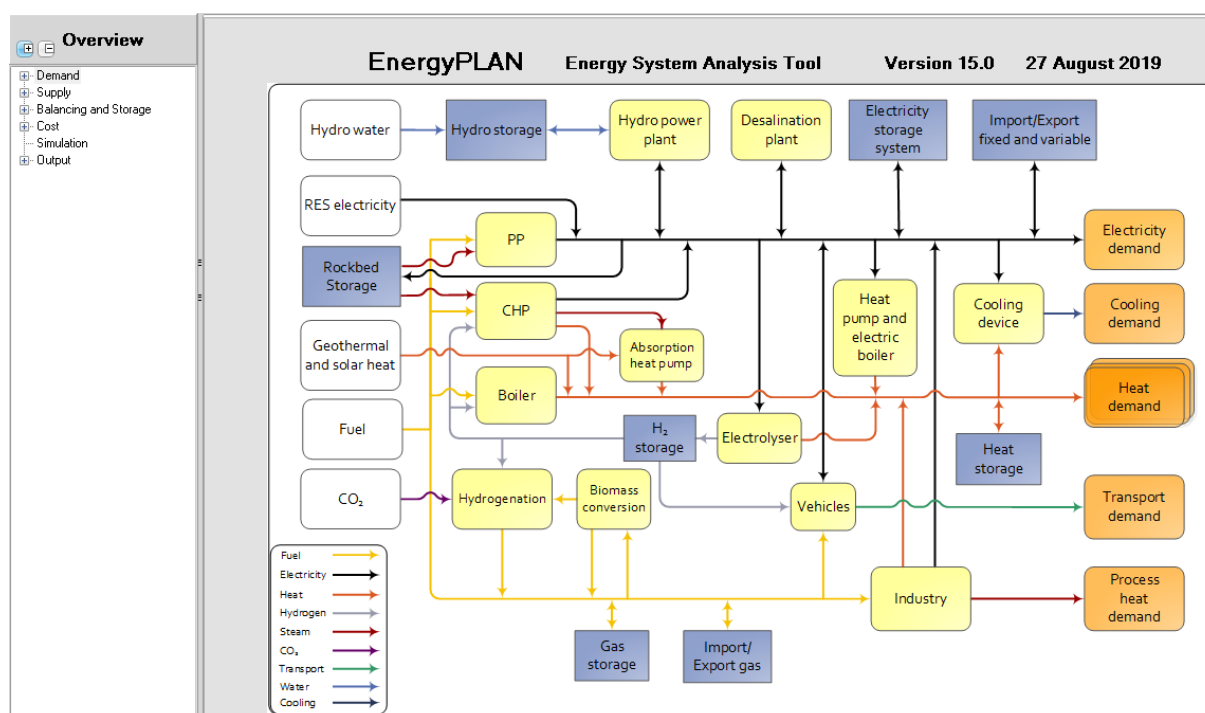
Cilj ovog diplomskog rada je dimenzionirati solarnu toplanu koja bi pokrivala 40 do 80% današnjih toplinskih potreba grada Zagreba. Potrebno je odrediti i lokacije gdje bi se smjestile navede toplane.

Naknadno na to je potrebno isplanirati širenje toplinskog sustava na ostala područja Urbane aglomeracije Zagreb, gdje gustoća potražnje za toplinskom energijom top opravdava. Za takav prošireni CTS je potrebno odrediti lokacije za solarnu elektranu. Za navedene zadatke su korišteni *EnergyPLAN* i *Hotmaps*. Također za prikaz i mjerenje površina je korišten *Google Maps*.



## EnergyPLAN

EnergyPLAN je računalni model koji je namijenjen za simulaciju energetske sustava. U njemu je moguće analizirati energetski sustav koji uključuje i tokove električne energije i toplinske energije za grijanje, odnosno hlađenje. Za ovaj zadatak je promatran samo sustav toplinarstva, te je model prilagođen današnjem stanju Zagreba. Pomoću EnergyPLAN-a je dobiven potrebni kapacitet toplinskih spremnika u prvom dijelu zadatka. Prikazana je procjenu ispunjenosti navedenih spremnika tokom godine i satna potrošnju toplinske energije iz relevantnih izvora topline [2].



Slika 1. Sučelje energyPLAN-a[2]

## Hotmaps

Hotmaps je besplatni alat namijenjen javnim ustanovama, energetske agencijama i urbanistima koji rade na projektiranju i planiranju sustava grijanja i hlađenja na lokalnim, regionalnim i nacionalnim nivoima. U trenutnoj verziji su dostupne funkcije mapiranja zona i podataka o grijanju i hlađenju za te zone [3].

Glavna namjena ovog alata je procjena toplinski potreba promatranih područja. Moguće je promatrati NUTS regije, županije ili gradove. Također je moguće točno označiti željena područja koja se sastoje od kvadratnih jedinica površine 1 ha.

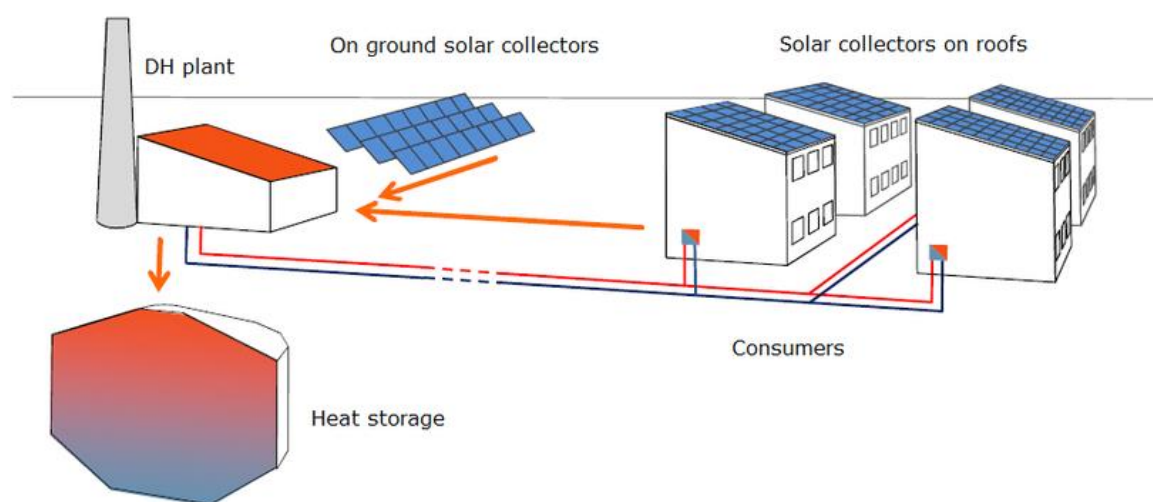
Osim toplinskih potreba mapirane su mnoge druge karakteristike europski područja, od čega je za ovaj rad najkorisniji potencijal za proizvodnju toplinske energije pomoću solarnih kolektora. Nedostatak *Hotmapsa* za određivanje ovog potencijala je neprecizan i konzervativan pristup koji za Zagreb pretpostavlja manju produktivnost od stvarne. Glavni razlog za to je pretpostavka da je iskoristivost površine za postavljanje kolektora svugdje jednaka i da ona iznosi:

$$k = 0,25$$

Hotmaps će u ovom radu biti korišten prvenstveno za procjenu toplinskih potreba promatranih područja.

## 2. Centralizirani solarni toplinski sustavi

Centralizirani solarni toplinski sustavi (CSTS) skupljaju toplinsku energiju sunčevog zračenja putem solarnih kolektora, te ju mogu odmah isporučivati u toplinski sustav ili skladištiti u toplinskim spremnicima za kasnije potrebe. Tokom ljeta su potrebe za toplinskom energijom najmanje, a solarna insolacija je najveća, stoga solarne toplane mogu u potpunosti zadovoljavati potrebe sustava u tom periodu. Zimi je situacija obrnuta, te je insolacija najmanja sa najvećim potrebama za toplinskom energijom. Kako bi riješili navedeni problem, potreban nam je dovoljno velik spremnik topline sa što manjim gubicima.

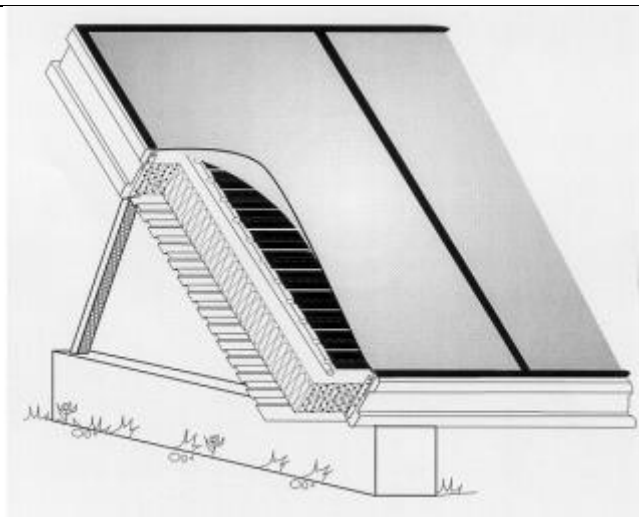


Slika 2. Shematski prikaz CSTS-a [4]

### 2.1. Solarni kolektori

Solarni kolektori su uređaji za prikupljanje toplinske energije sunca. Solarni kolektori se koriste za grijanje potrošne tople vode (PTV), grijanje građevina i u solarnim elektranama.

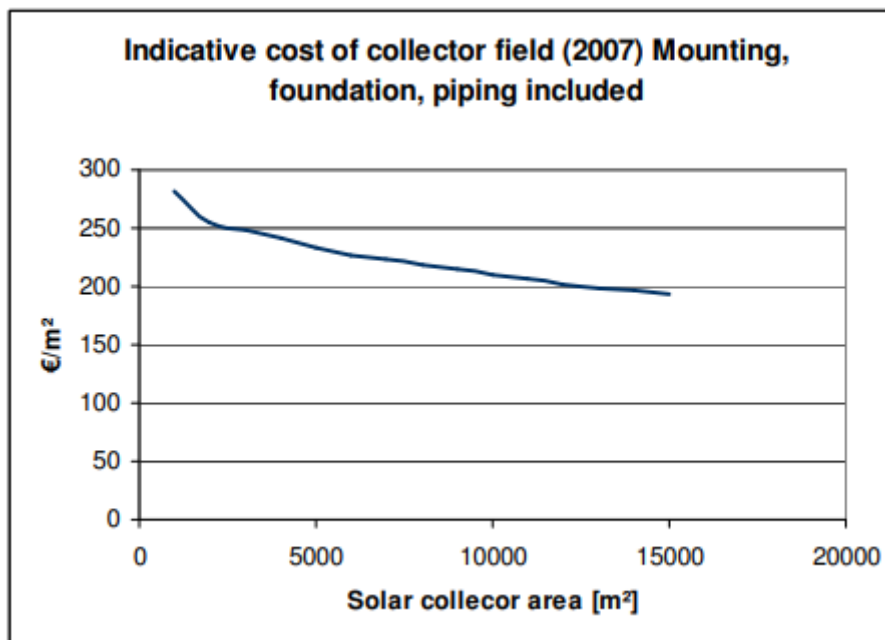
Postoji više vrsta solarnih kolektora od koji su najčešće primjenjivani ravni pločasti kolektori (eng. Flat Plate Collectors), kolektori u vakuumskoj tubi (eng. Evacuated Tube Collectors) i parabolični kolektori (eng. Parabolic Trough Collector) [5].



**Slika 3. Solarni kolektor s postoljem proizvođača *Arcon* [6]**

Za centralizirane solarne toplinske sustave se pretežito koriste ravni pločasti kolektori, iako se mogu koristiti i parabolični kolektori, naročito ako postoji potreba za većom temperaturom tople vode.

Kolektori su predstavljaju najveći dio investicijskog troška prilikom izgradnje solarnih toplana. Generalno, sa porastom površine troškovi polja solarnih kolektora su manji po jedinici snage (površine) [6].



**Slika 4. Prikaz promjene troškova polja kolektora s porastom površine [6]**

## 2.2. Toplinski spremnici

Toplinski spremnici se dijele na kratkoročne (dnevne) i sezonske. Kratkoročni spremnici pohranjuju energiju do nekoliko dana, za potrebe kada ne radi toplana i za prikupljanje otpadne topline.



Slika 5. Kratkoročni spremnik topline u TE-TO Zagreb [7]

Za solarne toplane, s obzirom da je najveću proizvodnja toplinske energije tokom ljeta, a najveća potražnja tokom zime, potrebno je skladištiti proizvedenu energiju na duže periode. Stoga su potrebni sezonski spremnici većeg kapaciteta.

Za sezonske spremnike se koriste 4 tipa spremnika:

- Toplinski čelični spremnik (TTES)
- Toplinski spremnik u obliku izolirane jame (eng. Pit Thermal Energy Storage - PTES)
- Toplinski spremnik u obliku bušotine (BTES)
- Toplinski spremnik u obliku vodonosnika (ATES)

### Toplinski spremnik u obliku izolirane jame (PTES)

Za uporabu spremnika u ovom radu, najrelevantnija vrsta spremnika je u obliku izolirane jame jer ima najveći specifični kapacitet pohrane toplinske energije ( $60-80 \text{ kWh/m}^3$ )<sup>[23]</sup>, te najmanji trošak izgradnje po jedinici volumena.



**Slika 6. Izgradnja toplinskog spremnika u Vojensu (203000 m<sup>3</sup>) [8]**

Nedostatak izgradnje ovakvog spremnika je potreba za velikim zemljištem, dok je glavna prednost niska cijena koja se kreće od 20 do 40 €/m<sup>3</sup> [8].

**Tablica 1. Procijenjeni troškovi izgradnje većeg sezonskog spremnika [6]**

	Trošak (EUR/m <sup>3</sup> )
Kopanje jame	7,6
Izolacija tla i bočnih strana	1,8
Poklopac	15,2
Drenaža	0,3
Usis i ispust vode	2,7
Kontrolni sustav	0,8
Ostali troškovi	2,8
UKUPNO	31

### 2.3. Primjeri dobrih praksi solarnih termoelektrana

Solarne toplane za centralizirane toplinske sustave se najraširenije u Danskoj, te se tamo nalaze sve 3 najveće toplane. Gradovi u kojima se koriste su Silkeborg, Vojens i Gram.

#### 2.3.1. Silkeborg

Silkeborg je grad sa 46179 stanovnika. U njemu se nalazi trenutno najveća solarna toplana na svijetu površine solarnih kolektora  $156694 \text{ m}^2$  i godišnjom proizvodnjom topline od 80 GWh čime pokriva 20% gradskih potreba za toplinom[9].

Toplana u Silkeborgu ima 4 spremnika volumena  $16000 \text{ m}^3$  i maksimalnu snagu kolektora 110 MW. Spremnik topline je relativno mali, ali gradu Silkeborgu nije potreban veći sezonski spremnik s obzirom da ima visoku potražnju za toplinskom energijom tokom cijele godine.



Slika 7. Solarni kolektori u Silkeborgu [9]

Za izgradnju toplane je bilo potrebno samo 7 mjeseci.

#### 2.3.2. Vojens

Vojens je mali grad sa 7655 stanovnika. U njemu je izgrađena solarna toplana s najvećim spremnikom topline volumena  $200000 \text{ m}^3$  i sa kolektorima efektivne površine  $70000 \text{ m}^2$  vršne snage 49 MW. Toplana u Vojensu godišnje proizvodi 28000 MWh što je dovoljno za pokrivanje 45% toplinskih potreba [10].



**Slika 8. Solarna toplana sa spremnikom topline u Vojensu [10]**

### 2.3.3. Gram

Gram je mali grad, također u Danskoj, sa 2526 stanovnika. Solarna toplana u Gramu je 2015. godine povećala površinu solarnih kolektora sa prvotnih 10000 m<sup>2</sup> na 44000 m<sup>2</sup>, te je izgrađen sezonski toplinski spremnik volumena 120000 m<sup>3</sup>. Uz navedena proširenja, udio potražnje toplinske energije koji zadovoljava solarna energija je porastao sa 16% na 61% [11].



**Slika 9. Solarna toplana u Gramu [12]**

Cijena spremnika je iznosila 2,8 miliona EUR, a procijenjeni trošak proizvedene toplinske energije iznosi 40 €/MWh [11].



### 2.3.4. *BIG Solar Graz*

Toplinski sustav u Grazu je u 2013. godini imao potrošnju od 935 GWh s tendencijom rasta zbog proširivanja sustava. Čak 66% topline u Grazu dolazi iz kogeneracija Mellach koja kao pogonsko gorivo koristi ugljen. Navedeno postrojenje će biti ugašeno u 2020. godini. Također postoje male solarne toplane koje godišnje proizvedu manje od 0,5% toplinske energije [36][37].

U 2016. je planiran projekt za izgradnju solarne toplane koja bi zadovoljavala 25% potreba toplinskog sustava. U 2018. su karakteristike projekta promijenjene kako bi se zadovoljilo 10% potreba [13].

	Planirani projekt (2016.)	Specifikacije postrojenja (2018.)
Investicija [€]	196.000.000	100.000.000
Kapacitet sezonskog spremnika [m <sup>3</sup> ]	1.800.000	900.000
Površina solarnih kolektora [m <sup>2</sup> ]	450.000	200.000
Udio solarne energije	25%	10%
Kapacitet dizalice topline [MW]	n/a	30MW
Prosječna temperatura solarne toplinske energije	85°C	85°C

**Slika 10. Karakteristike projekta BIG Solar Graz [13]**

Zaključak je da je izgradnja ovakvog postrojenja tehnički i ekonomski izvediva uz financijsku potporu vlade u iznosu od 20-30%.

2018. godine je osigurano zemljište za izgradnju postrojenja površine 50 ha.

### 2.3.5. *Vukovar*

U Vukovaru je 14.6.2019. puštena u rad prva solarna kotlovnica. Solarna kotlovnica se sastoji od 160 solarnih kolektora te je planirano proširenje na 600 pločastih kolektora – time bi površina solarnih kolektora bila 1200 m<sup>2</sup> [14].



**Slika 11. Solarna toplana u Vukovaru [14]**

Očekivani povrat investicije je između 6 i 8 godina, ovisno o cijeni prirodnog plina.

### 3. Toplinski sustav Grada Zagreba

Toplinski sustav Zagreba je dio Urbane aglomeracije Zagreb (UAZ) koja obuhvaća cijelu Zagrebačku županiju. Osim CTS-a u Zagrebu, dijelovi UAZ-a su toplinski sustavi u gradovima Samoboru, Velikoj Gorici i Zaprešiću.

Glavni opskrbljivač toplinske energije u Zagrebu je *HEP Toplinarstvo d.o.o.* sa 101175 krajnjih kupaca u 2017. godini. Tada je potrošačima isporučeno 1526,37 GWh toplinske energije, uz proizvodnju 1836,6 GWh. Vidi se da su gubici u sustavu vrlo visoki sa 16,9% te se zbog toga očekuju ulaganja u učinkovitost i revitalizaciju toplinskog sustava. S tom namjerom je kreiran *Operativni program konkurentnost i kohezija* za period od 2014. do 2020. (OPKK) koji predviđa ulaganja u obnovu vrelodnog sustava u Zagrebu koja bi iznosila približno 100 milijuna EUR [1].

Prema predviđanjima će potrošnja topline u Zagrebu padati. Projekcije su rađene za svakih 5 godina te se u 2030 očekuje da potražnja bude 19% manja nego u 2015. godini [15]

**Tablica 2. Predviđanja potrošnje toplinske energije u Zagrebu [15]**

Godina	2015.	2020.	2025.	2030.
Potražnja toplinske energije $Q_d$ [GWh]	3882,46	3679,98	3434,89	3153,52
Promjena potražnje u odnosu na 2015.	0%	-5%	-12%	-19%

#### 3.1. Izvori topline

Izuzev malih kotlovnica, većina toplinske energije za Zagreb se proizvodi u postrojenjima EL-TO i TE-TO.

##### EL-TO

EL-TO je postrojenje koje je pušteno u pogon 1907. godine pod nazivom *Munjara*. Nalazi se na Trešnjevci u blizini velikih potrošača električne i toplinske energije. Današnje postrojenje ima kapacitet proizvodnje 50 MW električne energije, 200 MW toplinske i 180 tona na sat tehnološke pare. Kao gorivo koristi prirodni plin i loživo ulje [16].



**Slika 12. EL-TO [16]**

### **TE-TO**

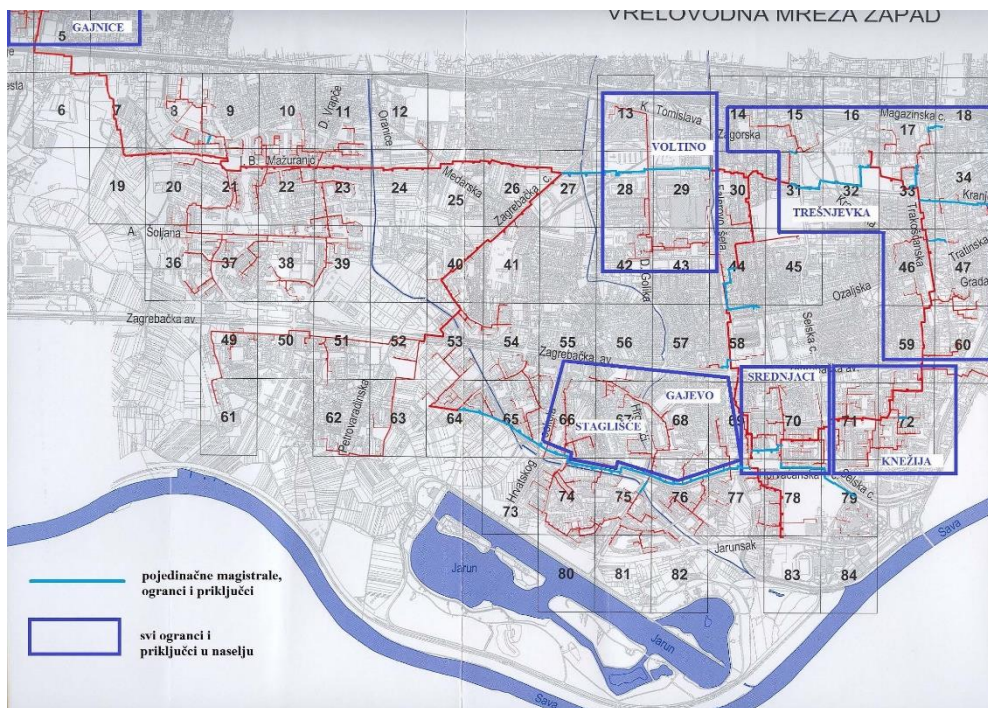
Termoelektrana-toplana Zagreb je smještena na lijevoj obali rijeke Save, na području Žitnjaka. Puštena je u pogon 1962. s dva bloka snage  $2 \times 32$  MW. Danas ima kapacitet proizvodnje 300 MW električne energije, 508 MW toplinske i 334 tone na sat tehnološke pare. Kao gorivo koristi prirodni plin i loživo ulje [16].



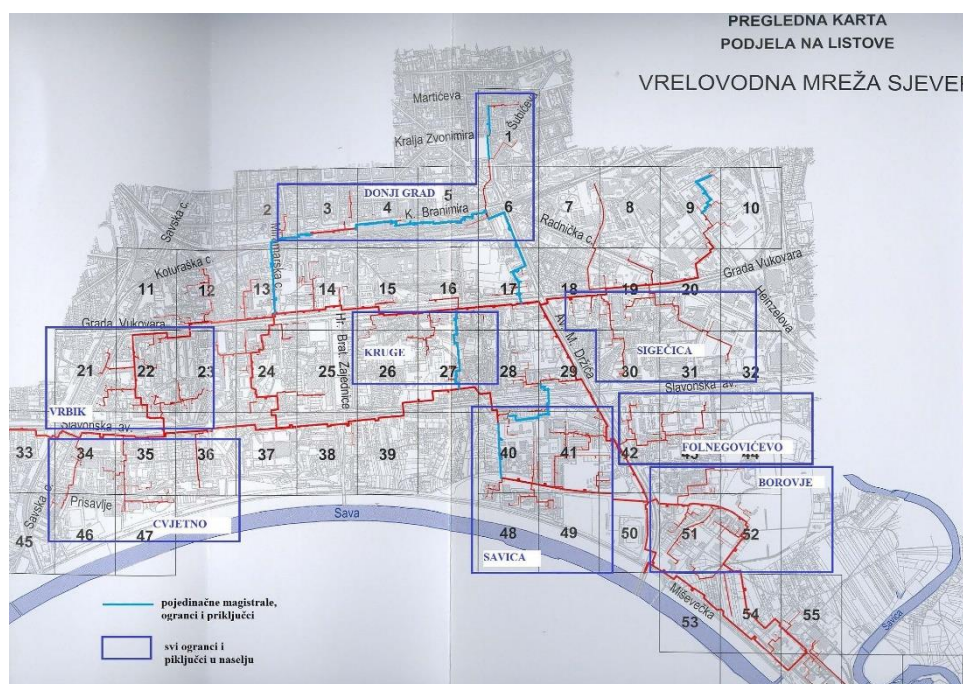
**Slika 13. TE-TO [16]**

### 3.2. Toplovodni sustav

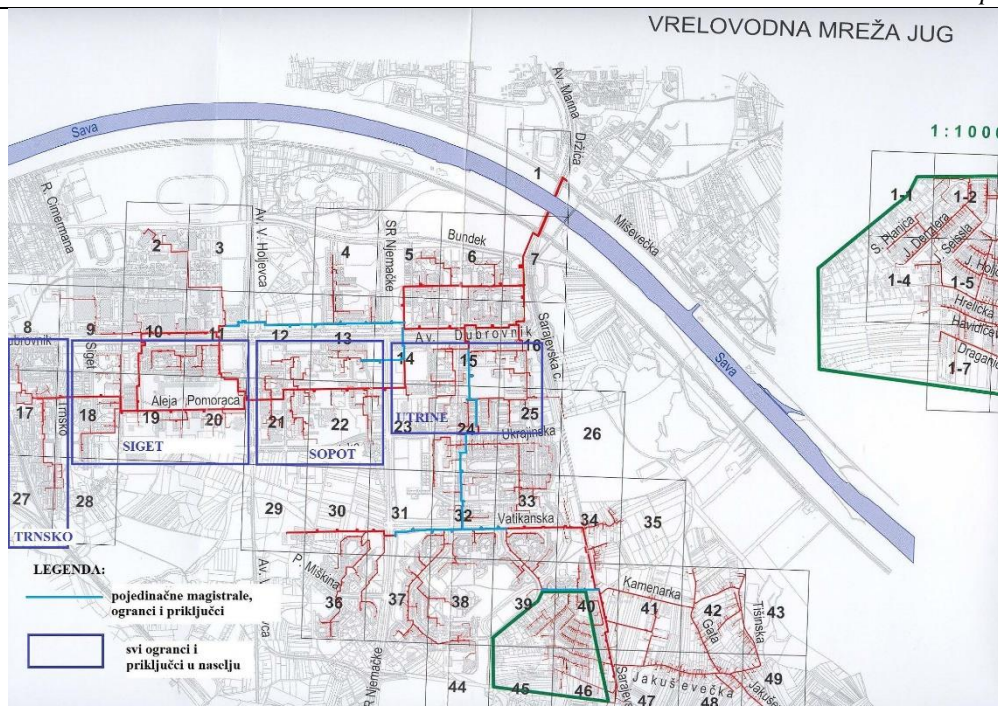
Dužina cijevi toplovodnog sustava u Zagrebu iznosi 274,74 km i dijeli se na mrežu zapad-sjever, istok-sjever i istok-jug [17].



Slika 14. Zagreb zapad-sjever [18]

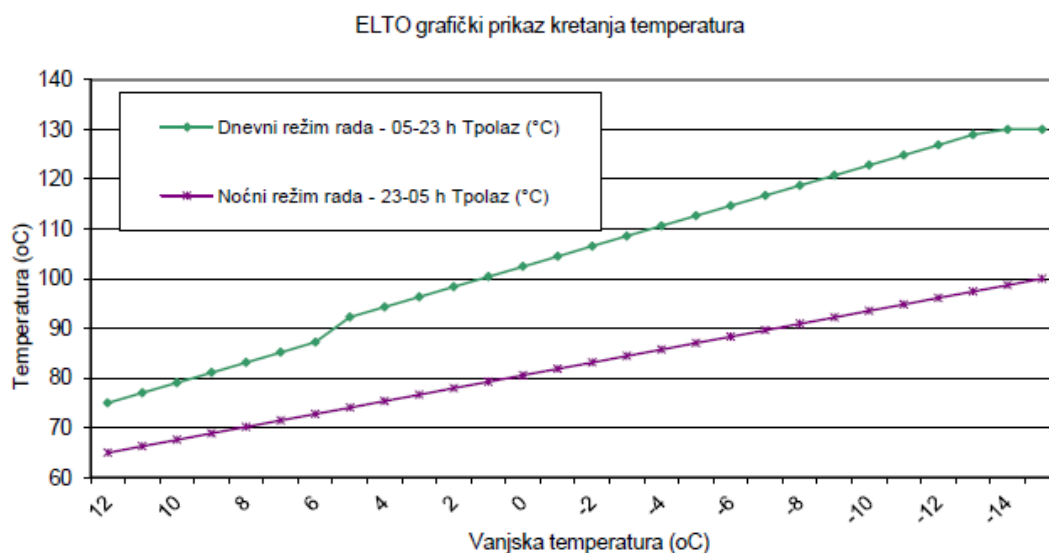


Slika 15. Zagreb istok-sjever [18]

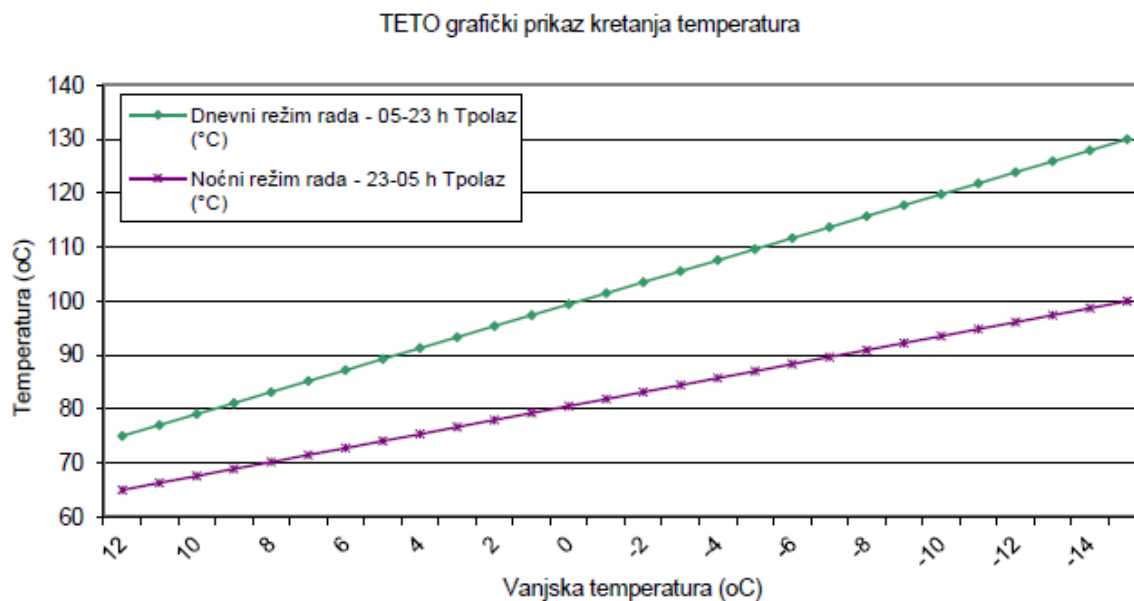


Slika 16. Zagreb istok-jug [18]

U toplinskom sustavu se koristi voda s temperaturom polaza često preko  $100^{\circ}\text{C}$  i rjeđe pregrijanom vodenom parom. Prema tim parametrima se Zagrebački toplinski sustav smatra CTS-om druge generacije. Vodena para se većinom koristi za potrebe industrije i u manjoj mjeri za potrebne grijanja.



Slika 17. Temperatura polaza u EL-TO [19]



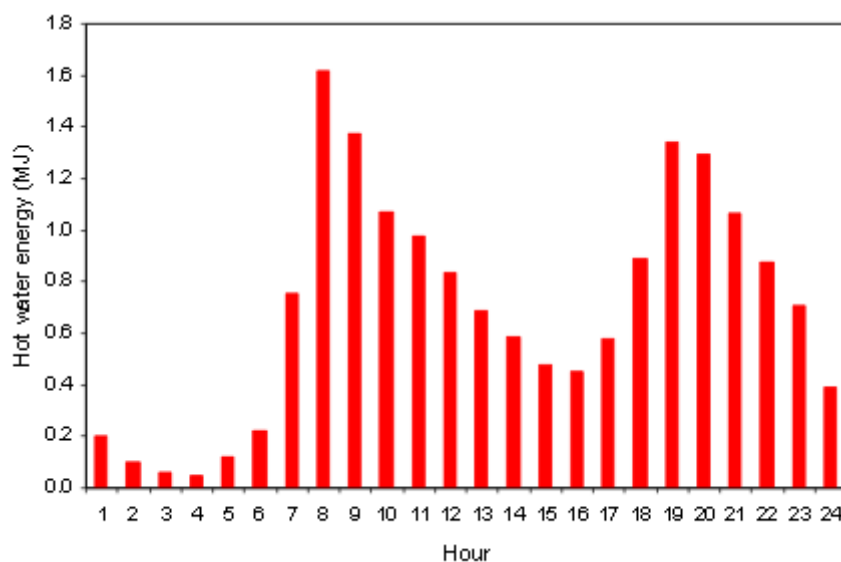
**Slika 18. Temperatura polaza u TE-TO [19]**

U slikama 14 i 15 su prikazane temperature polaza u toplovodima i njihova ovisnost o vanjskoj temperaturi. Vidi se da se temperature tople vode vrlo visoke s iznosima preko  $120^{\circ}\text{C}$  što dovodi do većih gubitaka u toplovodnoj mreži ali također potencijalno predstavlja problem za korištenje solarne toplane ili ostalih izvora topline s nižim temperaturnim režimom. Za unaprjeđenje toplovodne mreže i rad s nižim temperaturama je potrebno unaprijediti termalnu izolaciju zgrada i građevina, te eventualno napraviti preinake ogrjevnih tijela. Nove građevine imaju bolja izolacijska svojstva i u njima se može koristiti niskotemperaturno grijanje. Najveći je problem kod neobnovljenih starih zgrada, ali zadnjih godina sve veći broj zgrada prolazi kroz subvencioniranu energetska obnovu.

### 3.3. Potrošnja toplinske energije

Već je spomenuto da je prema izvješću Hrvatske energetske regulatorne agencije za 2018. godinu potrošnja toplinske energije u Gradu Zagrebu iznosila  $Q_d = 1526,37 \text{ GWh}$ . Podaci o potrošnji toplinske energije po mjesecima su nedostupni, te je stoga izrađen model prema kojem potrebe za toplinskom energijom prate klimatske uvjete.

Prema satnim podacima o temperaturi zraka su dobiveni podaci o potrebama za grijanje (stupanj-sat) i potrebna toplinska energija za svaki sat u godini [20]. U modelu se pretpostavlja da 20% potrošnje toplinske energije otpada na pripremu potrošne tople vode (PTV) i da je njena potrošnja ista za svaki dan u godini:



**Slika 19. Satna potrošnja PTV-a kroz dan**

Za potrebe grijanja model pretpostavlja da je unutrašnja temperatura grijanih prostorija  $21^{\circ}\text{C}$ . Izvan sezone grijanja koja traje od 1. listopada do 1. svibnja se smatra da su toplinske potrebe za grijanje jednake 0. Također u noćnom režimu od 23 do 5 sati se grijanje isključuje, osim ako je vanjska temperatura zraka niža od  $-15^{\circ}\text{C}$ . U tom slučaju se grijanje uključuje uz unutrašnju projektanu temperaturu  $15^{\circ}\text{C}$ .



Potrebe za toplinskom energijom su računane prema modelu *stupanj-sat*:

$$SS(t) = T_{in} - T_{out}(t) \quad (1)$$

Gdje su:

$T_{in}$  – Pretpostavljena unutrašnja temperatura grijanih prostorija – 21°C

$T_{out}(t)$  – Vanjska temperatura prema podacima [20]

$SS(t)$  – Stupanja sat – razlika temperatura vani i unutra u svakom satu

Za noćni režim vrijedi:

a) Ako je  $T_{out}(t) < -15^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{in} = 15^{\circ}\text{C}$

b) Ako je  $T_{out}(t) < -15^{\circ}\text{C}$ ,  $SS = 0$

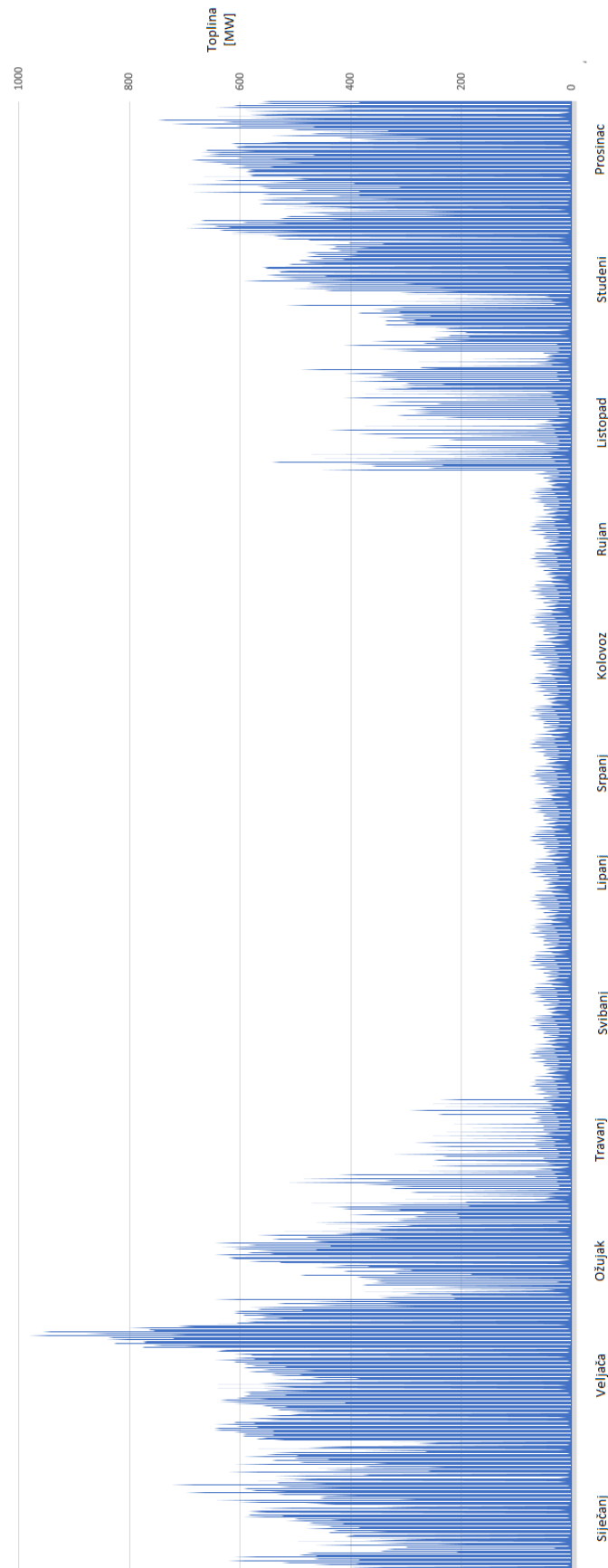
Satne potrebe za toplinom se računaju prema:

$$Q(t) = \frac{SS(t)}{\sum_{t=0}^{8784} SS(t)} \cdot 0,8 \cdot Q_d \quad (2)$$

Gdje je  $Q_d$  – ukupna godišnja potreba za toplinom

Na slici 20. se vidi da je izvan sezone grijanja za PTV potrebna toplinska energija do 78 MWh, dok u sezoni grijanja potrebe najčešće iznose oko 600 MWh. U 2018. najveća potrebna toplina je iznosila 982,77 MWh.

Satna potrošnja toplinske energije (2018.)

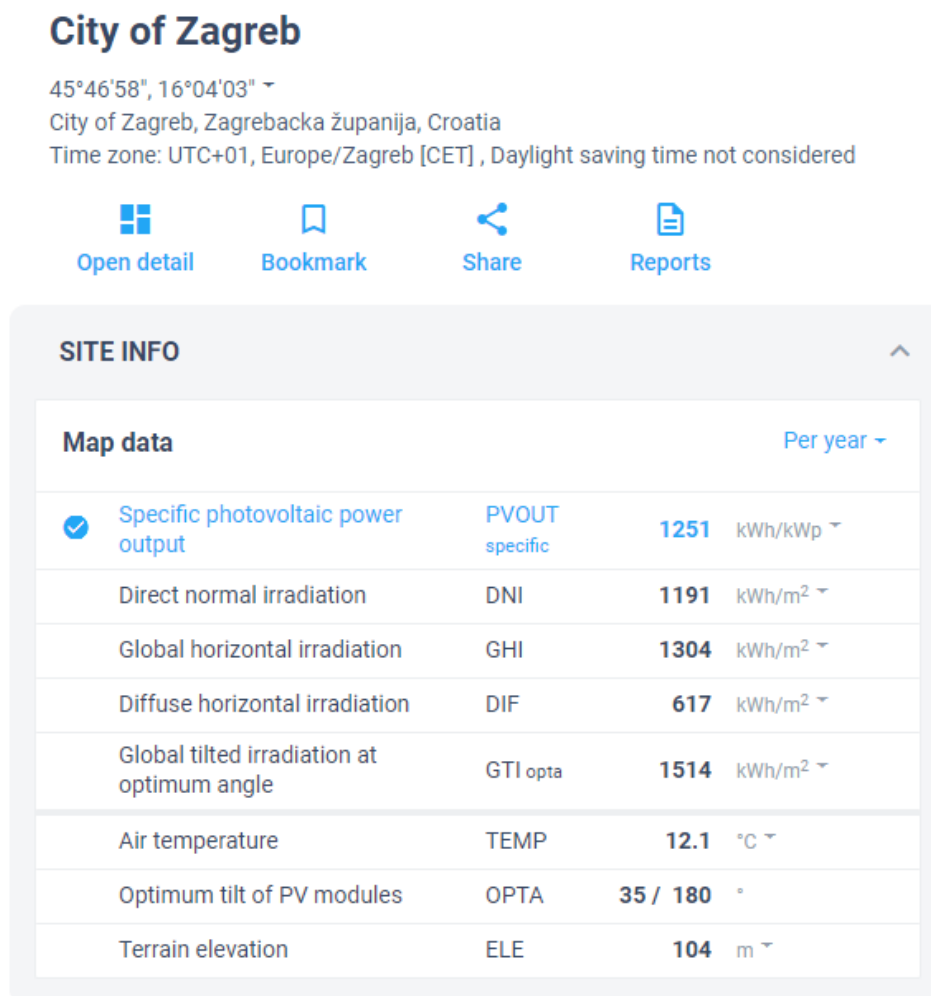


Slika 20. Model satne potrošnje toplinske energije za 2018.

### 3.4. Solarna iradijacija u Zagrebu

Za podatke o sunčevoj iradijaciji su korišteni podaci stranice *Global Solar Atlas* koja sadrži podatke o prosječnim godišnjim vrijednostima sunčevog zračenja [21]. Za solarne kolektore koji bi bili postavljeni pod optimalnim kutom nam je potrebna vrijednost prosječne godišnje iradijacije za optimalni kut. Nagib optimalnog kuta, kod kojeg je okomita iradijacija na plohu solarnog kolektora najveća kroz godinu, iznosi 35°.

*Ukupna iradijacija za optimalni kut* (eng. Global tilted irradiation - GTI) u Zagrebu iznosi 1514 kWh/m<sup>2</sup> godišnje. Za usporedbu, u Danskoj koja je predvodnik u razvoju i korištenju solarnih toplana, GTI varira od 1138 do 1323 kWh/m<sup>2</sup> ovisno o lokaciji. Prema tome solarne toplane bi u Hrvatskoj za istu površinu solarnih kolektora proizvodile 14% do 33% više toplinske energije.



Slika 21. Podaci o sunčevoj iradijaciji za Zagreb [21]

### 3.5. Performanse solarnih kolektora

Produktivnost solarnih kolektora ponajviše ovisi o intenzitetu sunčevog zračenja i upadnom kutu sunčevih zraka. Osim toga ovisi o efikasnosti kolektora i gubicima topline zbog razlike u temperaturi između radnog medija i okoline. Zbog navedenih uvjeta je najveća proizvodnja toplinske energije tokom ljeta kad je sunčevo zračenje najintenzivnije i kad su toplinski gubici prema okolišu najmanji [22].

Snagu kolektora za svaki sat se može računati prema sljedećoj formuli:

$$P_g(h) = A_c \cdot [\eta_0 \cdot G(h) - a_1 \cdot (T_m - T_a(h)) - a_2 \cdot (T_m - T_a(h))^2] \cdot f \quad (3)$$

U kojoj su:

$P_g$ :	Snaga kolektora u pojedinom satu	[W]
$A_c$ :	Površina kolektorskih površina	[m <sup>2</sup> ]
$\eta_0$ :	Optička efikasnost kolektora	[-]
$a_1$ :	Toplinski gubici prvog reda	[W/(K*m <sup>2</sup> )]
$a_2$ :	Toplinski gubici drugog reda	[W/(K <sup>2</sup> *m <sup>2</sup> )]
$G$ :	Sunčevo zračenje okomito na kolektorsku površinu u pojedinom satu	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_a$ :	Temperatura okoliša u pojedinom satu	[°C]
$T_m$ :	Srednja temperatura grijanog medija	[°C]
$f$ :	Sigurnosti faktor koji uzima u obzir toplinske gubitke u spojnim cijevima kolektora	

Optička efikasnost kolektora ovisi o vrsti i kvaliteti kolektora. Za pločaste kolektore će se pretpostaviti sljedeće vrijednosti:

- $\eta_0 = 0,8$
- $a_1 = 3 \text{ W/(K*m}^2\text{)}$
- $a_2 = 0,008 \text{ W/(K}^2\text{*m}^2\text{)}$
- $f = 0,98$

Za satnu razdiobu sunčevog zračenja su korišteni podaci iz baze podataka programa EnergyPLAN i Global Solar Atlas

Ukupna toplina se dobije sljedećom formulom:

$$Q = \int_0^{8784} P_g(h) \quad (4)$$

Nakon uvrštavanja:

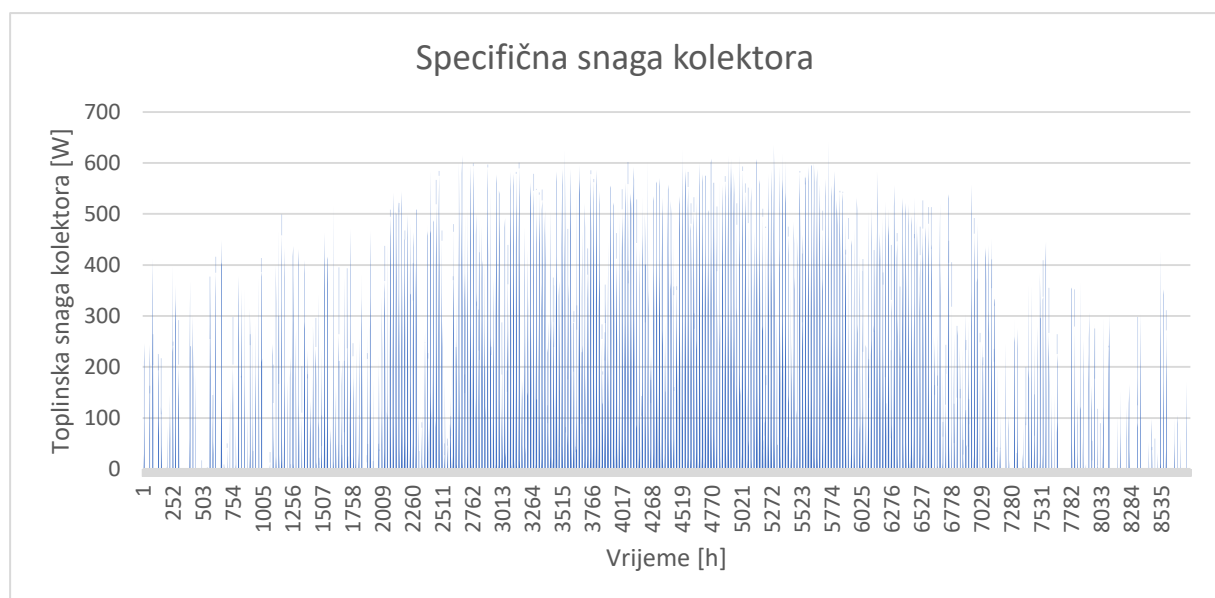
$$Q = A_c \cdot 730358 \quad (5)$$

Iz čega se vidi da je specifična godišnja toplina kolektora:

$$q = 730,36 \text{ kWh/m}^2.$$

Usporedbe radi, obližnji Zaprešić ima  $q = 741,72 \text{ kWh/m}^2$ , Zaragoza u Španjolskoj  $869,21 \text{ kWh/m}^2$ , a Danska oko  $500 \text{ kWh/m}^2$  [23].

Maksimalna specifična snaga za pojedini sat iznosi  $p = 641,72 \text{ W/m}^2$



**Slika 22. Prikaz specifične snage kolektora**

### 3.6. Odnos korisne površine kolektora i ukupne površine zemljišta

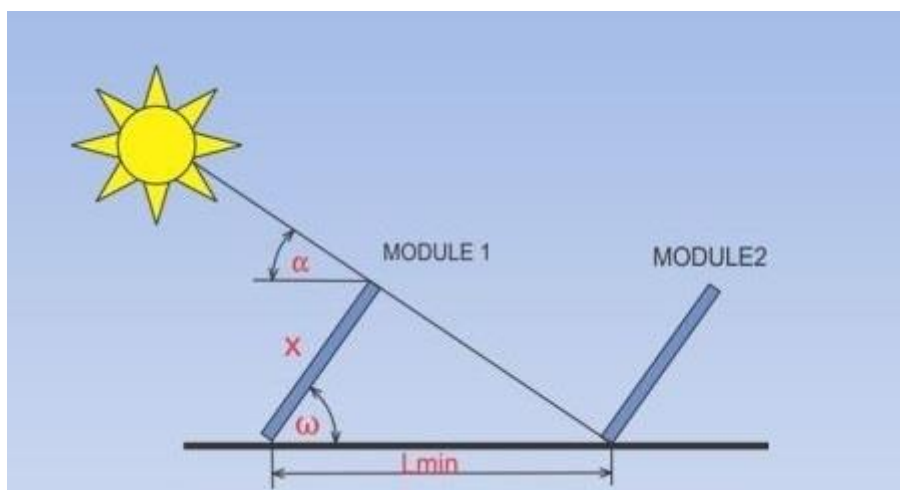
Potrebno je odrediti koliko korisne kolektorske površine stane na odabrana zemljišta.

Neiskorištena površina ostaje zbog:

- a) Potrebnih razmaka između kolektorskih redova
- b) Okvira kolektora
- c) Rasporeda kolektora na zemljištu

#### a) Potrebni razmak između kolektorskih površina

Korisna površina je znatno manja jer je potrebno izbjeći međusobna zasjenjivanja. Ti razmaci ovise o kutu nagiba kolektora, te o najnižem kutu upada sunčevih zraka kod kojeg je radijacija dovoljno intenzivna za stvaranje toplinske energije.



Slika 23. Minimalni razmak između redova kolektora [24]

Odnos površina kolektora i zemljišta kako bi se izbjeglo međusobno zasjenjivanje se računa:

$$R = \frac{x}{L_{min}} \quad (6)$$

Gdje je:

$x$  - duljina kolektora

$L_{min}$  – najmanji potrebn razmak između redova kolektora

Minimalni razmak između kolektora se računa kao:

$$L_{min} = x \cdot \left[ \frac{\sin(\omega)}{\operatorname{tg}(\alpha)} + \cos(\omega) \right] \quad (7)$$

Gdje su kutovi:

$\omega$  – kut nagiba solarnih kolektora

$\alpha$  – minimalni kut upada iskoristivog sunčevog zračenja

Za Zagreb te vrijednosti iznose  $\omega = 35^\circ$  i  $\alpha = 20^\circ$ <sup>[17]</sup>.

Prema tim vrijednostima je  $R = 0,417469$ , odnosno da je udio korisne površine zbog problema zasjenjivanja 41,7469% na području Zagreba.

### b) Okviri kolektora

U korisnu kolektorsku površinu ne ulaze konstrukcijski dijelovi kolektora. Za kolektor *HT-HEATboost* proizvođača ARCON SUNMARK su navedeni podaci prema kojima je bruto površina prednje plohe 13,57 m<sup>2</sup> dok je korisna površina 12,60 m<sup>2</sup>. To nam govori da je korisni dio prednje plohe kolektora 92,8519% [9]

### c) Raspored kolektora na zemljištu

Kod dizajniranja kolektorskog polja teško je postaviti kolektore bez gubitka površine. Potrebno je ostaviti određeni razmak između ruba zemljišta i kolektora te optimalno rasporediti kolektore na zemljištu. Što je veće kolektorsko polje – veća je i iskoristivost površine vezana uz raspored kolektora. Pretpostavljena vrijednost za ovaj faktor iskoristivosti je:

$$r = 0,95$$

Ukupna iskoristivost površine kad se uzmu svi faktori u obzir ostaje samo 36,8246 %.

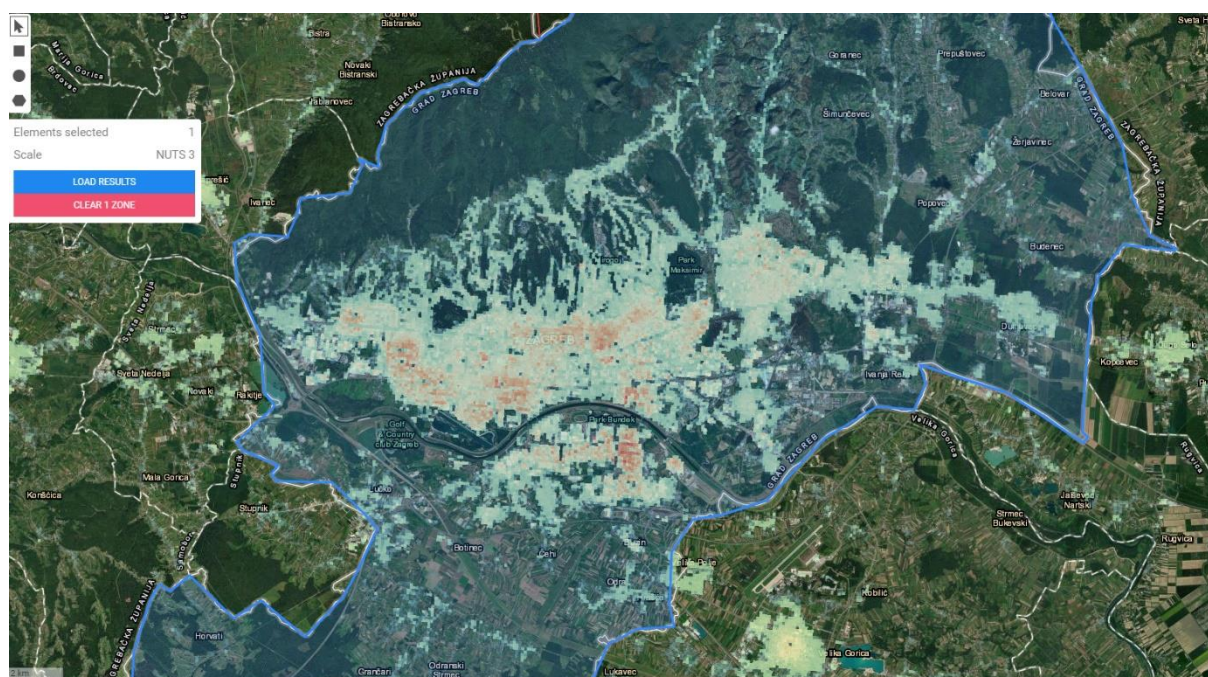
$$k = 0,368246$$

## 4. Lokacije za solarne toplane

Za solarne toplane su potrebne velike površine, što predstavlja problem u Zagrebu zbog velike gustoće izgrađenosti i vrijednosti zemljišta. Prvenstveno su odabrana zemljišta niže vrijednosti i područja koja se ne mogu koristiti za izgradnju vrijednijih objekata. Također prednost solarnih toplana je što se lako mogu razmontirati bez ostavljanja značajnijih tragova, te se zemljište naknadno može koristiti za druge potrebe.

### 4.1. Hotmaps

Pomoću *open source* alata Hotmaps je moguće vidjeti ukupne potrebe za toplinom grada Zagreba, te također raspoložive površine za postavljanje solarnih kolektora [3].

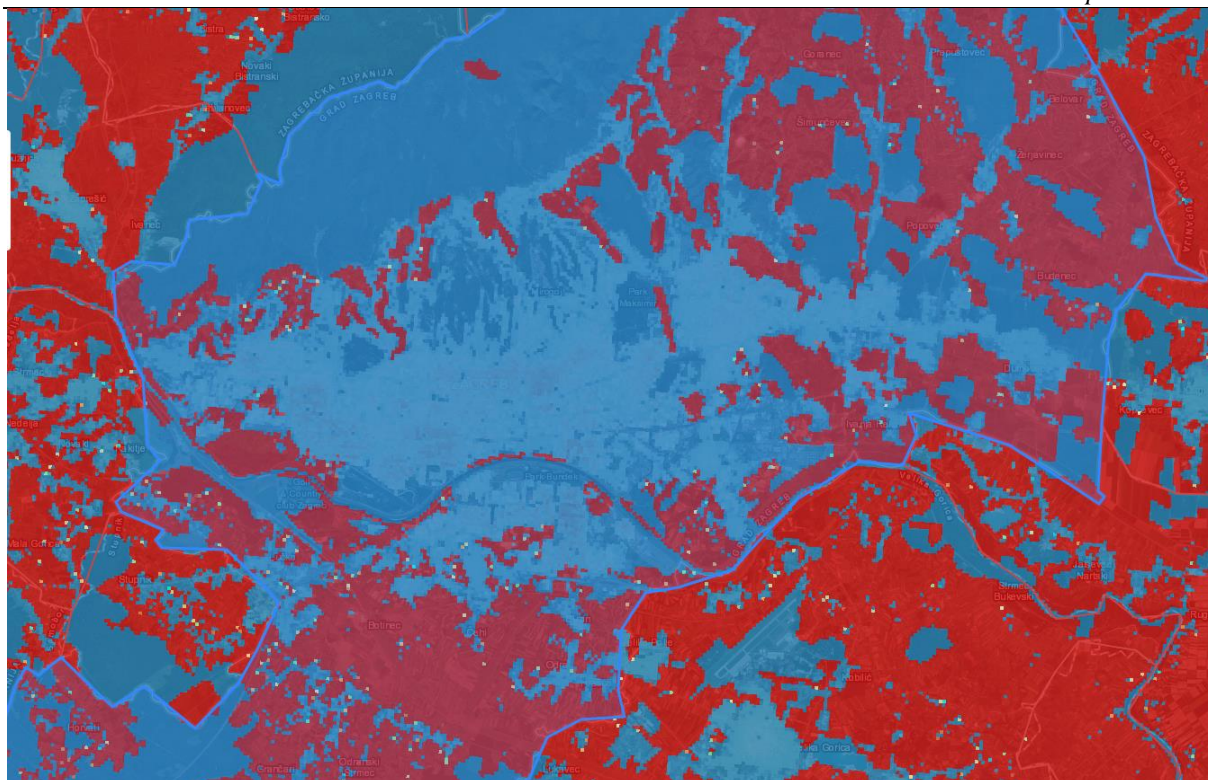


Slika 24. Prikaz toplinskih potreba Zagreba (toplije boje predstavljaju veće toplinske potrebe) [3]

Na slici 24. je prikazano koje zone imaju najveće toplinske potrebe. Područje cijelog grada Zagreba treba 4170.46 GWh toplinske energije godišnje.

Uz to je prikazano na slici 25. koje neizgrađene površine su raspoložive za montiranje solarnih kolektora te da je ukupni potencijal za proizvodnju toplinske energije iz solarnih kolektora na području grada Zagreba 29880,07 GWh godišnje. U poglavlju 4.2. je prikazan potencijal za proizvodnju toplinske energije iz kolektora postavljenih na krovovima.





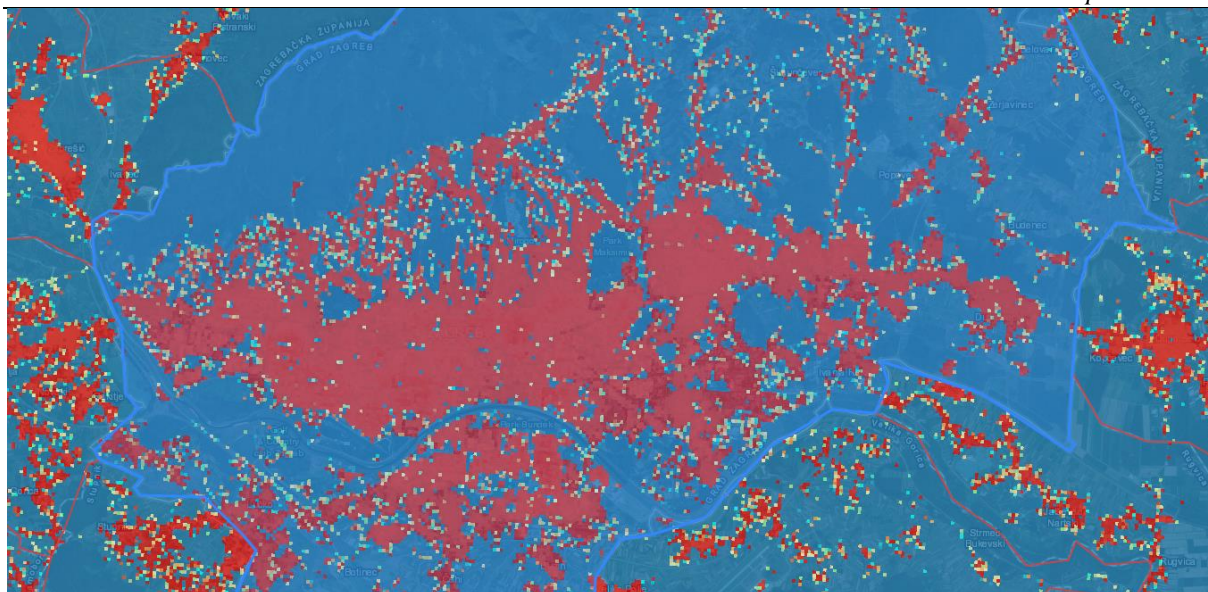
Slika 25. Prikaz raspoloživih neizgrađenih površina za montiranje solarnih kolektora [3]

## 4.2. Krovovi

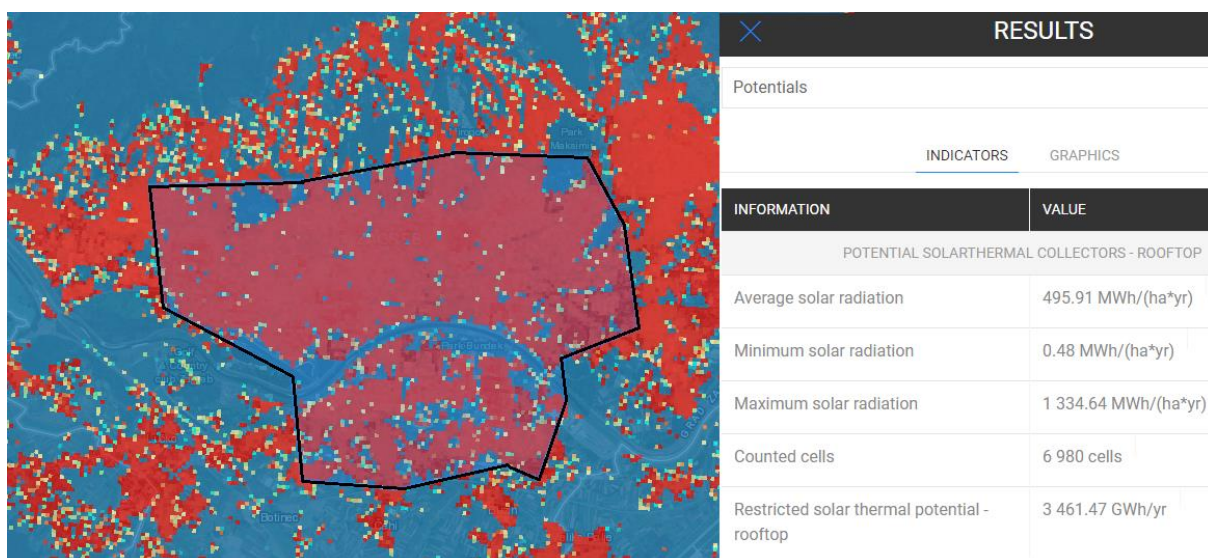
Postavljanje solarnih kolektora na krovove je dobra solucija jer se na taj ne zauzima korisna površina. Nažalost na pojedinačnim zgradama je nemoguće imati veće površine solarnih kolektora. Dodatna prednost, kao što se vidi na slici 26., je što su potencijalne lokacije točno na mjestima najveće potrošnje – u urbanim sredinama.

Kada bi se postavili solarni kolektori na sve krovove u gradu Zagrebu proizvodnja toplinske energije bi iznosila 8089,01 GWh godišnje – iznos skoro duplo veći od toplinskih potreba Zagreba i 5 puta veći od današnjih potreba Zagrebačkog CTS-a.

Kada se u obzir uzme samo urbana jezgra Zagreba, potencijal solarnih kolektora postavljenih na krovovima iznosi 3461,47 GWh godišnje (slika 23.)



Slika 26. Prikaz raspoloživih krovnih površina za postavljanje solarnih kolektora [3]



Slika 27. Prikaz potencijala u najurbanije dijelu Zagreba [3]

Pokrivanjem 3% krovova solarnim kolektorima u urbaniziranom dijelu Zagreba bi se godišnje proizvodilo **103,8 GWh** toplinske energije godišnje.

### 4.3. Jakuševac

Zagrebačko odlagalište otpada Jakuševac se nalazi na jugoistoku grada i zauzima više od 30 hektara površine. Odlagalište je sanirano te se otpad odlaže na odlagalištu Prudinec koje je tik do njega.



Slika 28. Satelitska snimka saniranog odlagališta otpada površine 316547 m<sup>2</sup> [25]

Buduća namjena Jakuševca je problem jer je gotovo nemoguće izgraditi išta na takvoj površini niti je privlačna za društveno korištenje. Dodatna prednost Jakuševca je što se područje nadzire i osigurava konstantno.

Nedostatak je nagib sjeverne strane odlagališta zbog kojeg bi bila manja korisna površina za solarne kolektore, iako je s južne strane nagib povoljan.

Zbog nepovoljnog nagiba na sjevernoj strani odlagališta potreban je veći razmak za kolektore na toj strani. Stoga iskoristiva površina bude 40% manja. Ukupno stane 66259,27 m<sup>2</sup> korisne kolektorske površine koja bi godišnje proizvodila **48,39 GWh**.

Tablica 3. Potencijalna proizvodnja topline - Jakuševac

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,6$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
316547	66259,27	48,39

#### 4.4. Istočna petlja

Petlja kod Ivanje Reke je najveće zagrebačko cestovno križanje koje s okolnim površinama zauzima 1,13 km<sup>2</sup>. S obzirom da dobar dio površine otpada na cestovnu infrastrukturu manja je iskoristiva površina za solarne kolektore. Uzeta je pretpostavku da je 80% površine dostupno za postavljanje solarnih kolektora.



Slika 29. Površina oko istočne Petlje [25]

Za navedenu lokaciju je moguće postavljanje 315373,8 m<sup>2</sup> korisne kolektorske površine koji bi godišnje proizveli **230,34 GWh**.

Prednost ove lokacije je što vrijednost zemljišta nije povoljna za izgradnju stambenih i visokovrijednih nekretnina. Potencijalni problem je izloženost prašini koju uzrokuje konstantni promet. Zbog prašine se kolektorske površine moraju češće čistiti, te im ona smanjuje učinkovitost.

**Tablica 4. Potencijalna proizvodnja topline – Istočna petlja**

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,8$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
1130000	315373,8	230,34

#### 4.5. Duboki Jarak

Duboki Jarak je bivše spremište oružja u kojem je došlo do eksplozije 1994. godine. Od tada se ta površina ne koristi te je u zagrebačkom GUP-u označena kao *brownfield* površina. Sam Duboki Jarak zauzima površinu od 19 hektara, dok ukupna odabrana površina zauzima 614804,54 m<sup>2</sup>.



**Slika 30. Satelitska snimka Dubokog Jarka (*Brownfield* površina u GUP-u označena smeđom linijom) [25]**

Na ovom području je moguće smjestiti 214483,7 m<sup>2</sup> korisne kolektorske površine iz koje bi se proizvodilo **156,65 GWh** toplinske energije godišnje.

**Tablica 5. Potencijalna proizvodnja topline – Duboki jarak**

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
614804	214483,7	156,65

#### 4.6. Jankomir jug

Površina na zapadu Zagreba, koja se nalazi između Ljubljanske avenije na sjeveru i rijeke Save na jugu je u potpunosti neizgrađena osim podzemnog spremnika plina površine 25000 m<sup>2</sup>.



Slika 31. Površina u blizini Jankomirskog mosta [25]

Površina ovog zemljišta iznosi 1,95 km<sup>2</sup>, odnosno 1925000 m<sup>2</sup> ako se izuzme površina plinskog spremnika. Na ovoj lokaciji je moguće postaviti 671564,9 m<sup>2</sup> korisne kolektorske površine, koja bi proizvela 490,48 GWh godišnje.

Zahtjev na ovoj površini su poljoprivredne površine za koje bi bilo potrebno provjeriti vlasništvo i riješiti imovinsko pravne odnose.



**Slika 32.** Navedena površina označena u HOTMAPS alatu [3]

Ista površina kada se označi u alatu *HOTMAPS* pokazuje da je potencijal na njoj za proizvodnju toplinske energije iz solarnih kolektora 260.15 GWh.

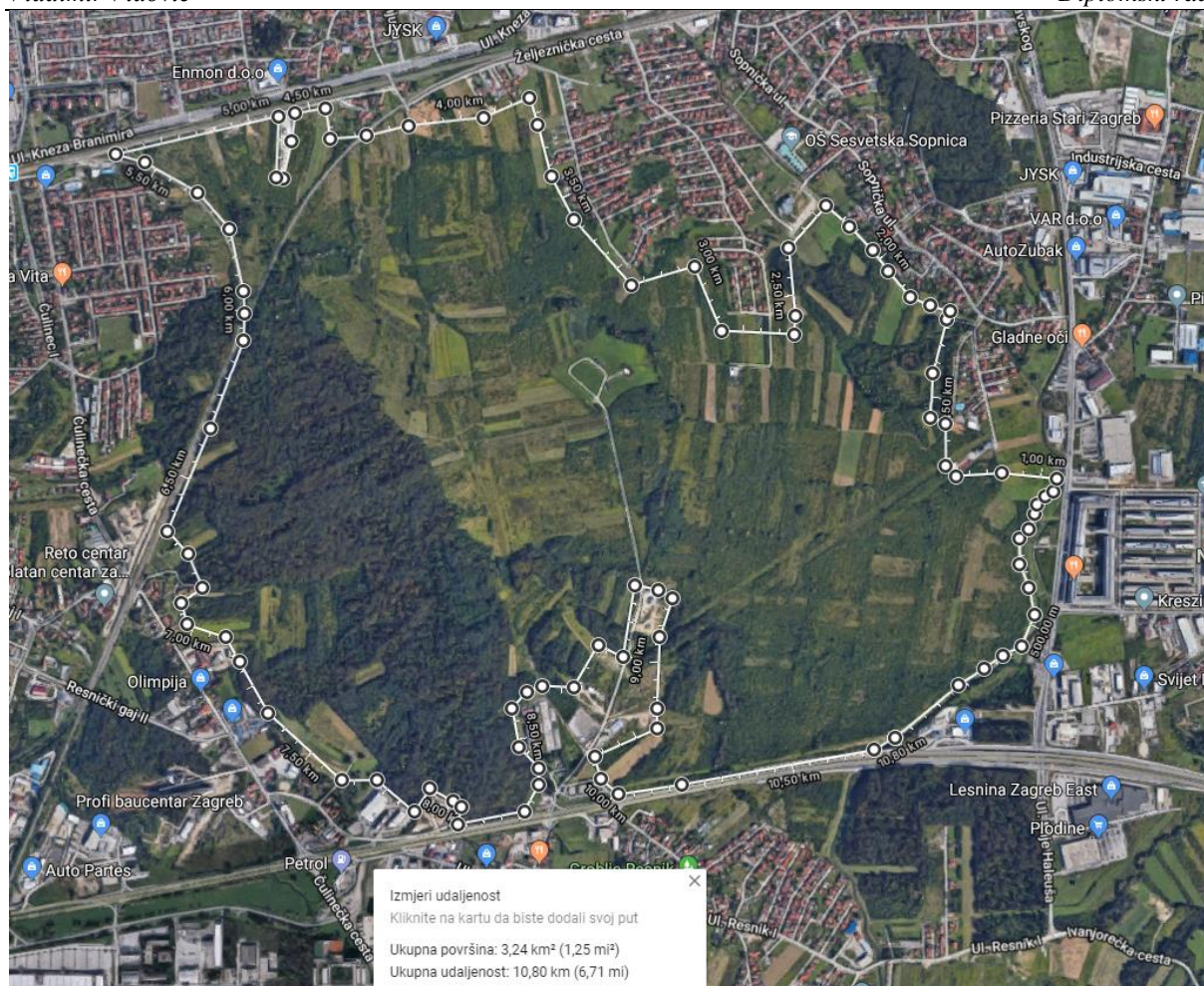
**Tablica 6.** Potencijalna proizvodnja topline - Jankomir

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
1925000	671564,9	490,48

#### 4.7. Donja Dubrava

Velika neizgrađena površina od 3,24 km<sup>2</sup> na istoku grada, između Slavonske avenije na jugu, željezničke pruge na sjeveru i zapadu, te ulice Ljudevita Posavskog na istoku sadrži poljoprivredna zemljišta, od kojih su mnoga neodržavana, šumovite dijelove i podzemni plinski spremnik koji zauzima 37312 m<sup>2</sup>.





Slika 33. Satelitska snimka neizgrađene površine u Dubravi [25]

Za ovu lokaciju se uzima u obzir da se na plinskom spremniku ne bi gradili kolektori i da zbog pruge na 10% površine ne bi bilo moguće postaviti kolektore. Uz te uvjete korisna kolektorska površina bi bila 1005575 m<sup>2</sup> iz kojih bi se godišnje proizvodilo **734,43 GWh**. Taj iznos je dovoljan za pokriti polovicu toplinskih potreba zagrebačkog CTS-a.

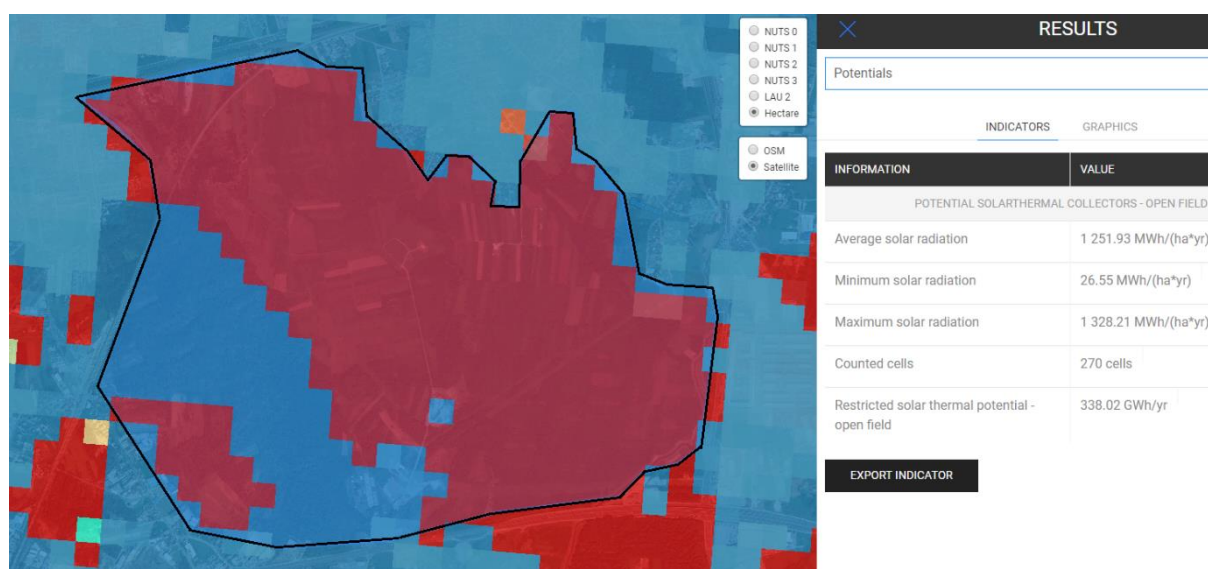
Tablica 7. Potencijalna proizvodnja topline – Dubrava (Ukupna površina)

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,9$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
3240000	1005575	734,43

Na ovom području značajan udio zemljišta zauzima šuma površine 858262 m<sup>2</sup>. Ukoliko ju se izuzme iz računice, korisna kolektorska površina je 776993,5 m<sup>2</sup> sa godišnjom proizvodnjom topline 567,48 GWh.

**Tablica 8. Potencijalna proizvodnja topline – Dubrava – bez šume**

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,9$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
2344426	736099,1	537,62



**Slika 34. Procjena potencijala za proizvodnju toplinske energije u alatu HOTMAPS [3]**

Prema alatu *HOTMAPS* potencijalna godišnja proizvodnja toplinske energije na ovom području je 338,02 GWh.

#### 4.8. Odabir lokacija

Kada bi se sve površine u potpunosti iskoristile za postavljanje solarnih kolektora, imali bi 1764,1 GWh toplinske energije, odnosno približan iznos za pokrivanje svih potreba CTS-a u Zagrebu.

Kao najpovoljnije lokacije su odabrane *Jankomir* i *Donja Dubrava – bez šume*. Na obje lokacije zajedno stane dovoljno kolektora za proizvodnju više od 1 GWh toplinske energije godišnje.

**Tablica 9. Moguće lokacije za postavljanje solarnih kolektora**

Lokacija	Površina zemljišta Z	Godišnja proizvodnje topline Q
	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
3% krovova	-	103,8
Jakuševac	316547	48,39
Istočna petlja	614805	230,34
Duboki jarak	1130000	156,65
Jankomir jug	1925000	490,48
Donja Dubrava	3202688	734,43
Donja Dubrava – bez šume	2344426	537,62

## 5. Solarne toplane

U kasnijim koracima je simulacijom u alatu *EnergyPLAN* dobiveno da je za odabrane toplane potrebna ukupna sezonska pohrana topline u iznosu od  $H_s = 373,053 \text{ GWh}$ .

S obzirom da su zamišljene 2 solarne toplane, svaka će imati svoj toplinski spremnik koji će pokrivati polovicu toplinske pohrane iznosa 186,53 GWh.

Za gustoću pohrane topline u spremniku je pretpostavljen faktor  $h = 70 \text{ kWh/m}^3$  [26].

Prema tome je potrebni volumen svakog pojedinog toplinskog spremnika:

$$V_s = \frac{185,53 \cdot 10^6}{70} = 2664664,29 \text{ m}^3 \quad (8)$$

Na odabranim lokacijama će površine za kolektore biti smanjene za površine koje je potrebno odvojiti za spremnike.

### 5.1. Solarna toplana Jankomir jug

Solarna toplana Jankomir jug bi se sastojala od solarnih kolektora i spremnika topline. Spremnik topline bio bi smješten na površini od  $159968 \text{ m}^2$ .



Slika 35. Površina namijenjena za toplinski spremnik – Jankomir jug [25]

Kad se od ukupne površine na lokaciji oduzme površina rezervirana za postavljanje spremnika, za postavljanje kolektora ostaje 1765032 m<sup>2</sup>.

**Tablica 10. Površina i proizvodnja topline solarne toplane Jankomir jug**

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,8$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
1765032	492606,1	359,78

Na lokaciji je potrebno smjestiti i pomoćne objekte i opremu za funkcioniranje solarne toplane. Zbog toga i vrlo velike površine pretpostavka je da se korisna površina kolektora smanjuje za dodatnih 20%.

**Tablica 11. Karakteristike solarne toplane Jankomir jug**

Maksimalna snaga P [MW]	320
Godišnja proizvodnja topline Q [GWh]	359,78
Kapacitet spremnika H [GWh]	186,53

## 5.2. Solarna toplana Donja Dubrava

Solarna toplana Jankomir jug bi se sastojala od solarnih kolektora i spremnika topline. Spremnik topline bio bi smješten na površini od 154467 m<sup>2</sup>.



Slika 36. Površina namijenjena za spremnik – Donja Dubrava [25]

Kad se od ukupne površine na lokaciji oduzme površina rezervirana za postavljanje spremnika, za postavljanje kolektora ostaje 2189959 m<sup>2</sup>.

Tablica 12. Površina i proizvodnja topline solarne toplane Donja Dubrava

Površina zemljišta $Z$	Korisna površina kolektora $A_c = k \cdot Z \cdot 0,8 \cdot 0,9$	Godišnja proizvodnje topline $Q = A_c \cdot q$
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[GWh]
2189959	550079,8	401,76

Kao što je prethodno navedeno, korisna površina će biti smanjena za 10% zbog pruge koja prolazi jednim dijelom zemljišta. Na lokaciji je potrebno smjestiti i pomoćne objekte i opremu za funkcioniranje solarne toplane. Zbog toga i vrlo velike površine pretpostavka je da se korisna površina kolektora smanjuje za dodatnih 20%.

**Tablica 13. Karakteristike solarne toplane Donja Dubrava**

Maksimalna snaga P [MW]	360
Godišnja proizvodnja topline Q [GWh]	401,76
Kapacitet spremnika H [GWh]	186,53

## 6. Simulacija sustava u alatu *EnergyPLAN*

U *EnergyPLAN*-u je simulirati rad sustava kako bi se vidjelo u kojim periodima i u kojem postotku se potrebe pokrivaju iz solarnih kolektora, te koliko se energije pohranjuje u toplinski spremnik tokom godine. Obje solarne toplane su promatrane zajedno, kao cjeloviti sustav.

### 6.1. Ulazni podaci

Od ulaznih podataka su unesene godišnje potrebe za toplinskom energijom i satna raspodjela iz poglavlja 3.3.

District Heating:						
	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Distribution:	
Production:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1,837"/>	1,84	<input type="button" value="Change"/>	ZG_Heating_demand_2018.txt
Network Losses:	<input type="text" value="0,2"/>	<input type="text" value="0,15"/>	<input type="text" value="0,169"/>			
Heat Demand:	0,00	0,00	1,53	1,53		

**Slika 37. Prikaz ulaznih podataka za potražnju toplinske energije**

Sve potrebe su svrstane u *Group 3* koja predstavlja velike centralizirane toplinske sustave. Grupe 1 i 2 se mogu koristiti za pojedinačne građevine, odnosno manje zatvorene sustave.

Na strani opskrbe su unesene vrijednosti proizvodnje topline i kapacitet toplinskog spremnika. Satna distribucija proizvodnje topline je unesena prema poglavlju 3.5.

	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Unit	Distribution:
<b>Solar Thermal</b>						
Production	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,761"/>		TWh/year	<input type="button" value="Change"/> ZG_Solar_thermal_irradiation.txt
Storage	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="400"/>		GWh	
Loss*	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		Percent	
Share*	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>			
Result	0,00	0,00	0,76	0,76	TWh/year	Use Solar Storage for Excess Heat
Annual accumulated heat in solar thermal storage:				0,00	TWh/year	<input type="button" value="Yes"/>

**Slika 38. Prikaz ulaznih podataka za proizvodnju toplinske energije**

Opet su svi podaci uneseni u grupu 3 – za velike centralizirane toplinske sustave.



Na strani opskrbe također je bilo potrebno unijeti koja postrojenja budu proizvodila ostatak potrebne energije. Zagreb ima kombinirana postrojenja koja istovremeno proizvode struju i toplinu, te toplinske kotlove koji proizvode isključivo toplinu. Kako bi se pojednostavo model i prikaz rezultata, oboje su stavljani u istu kategoriju – toplinskih kotlova.

	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Unit:
Electricity Production:					
District Heating Production:	0,00	0,00	1,84	1,84	TWh/year
<b>Boilers</b>					
Thermal Capacity		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="700"/>		MJ/s
Boiler Efficiency	<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0,9"/>		
Fixed Boiler share		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>		Percent

**Slika 39. Prikaz ulaznih podataka za proizvodnju topline iz toplinskih kotlova**

Pretpostavljeno je da ostala postrojenja nikad neće imati prioritet proizvodnje ispred solarnih kolektora i spremnika, sa svrhom kako bi se maksimizirala potrošnja iz solarnih kolektora. Zbog toga je potreban manji spremnik za pohranu topline proizvedene u kolektorima.

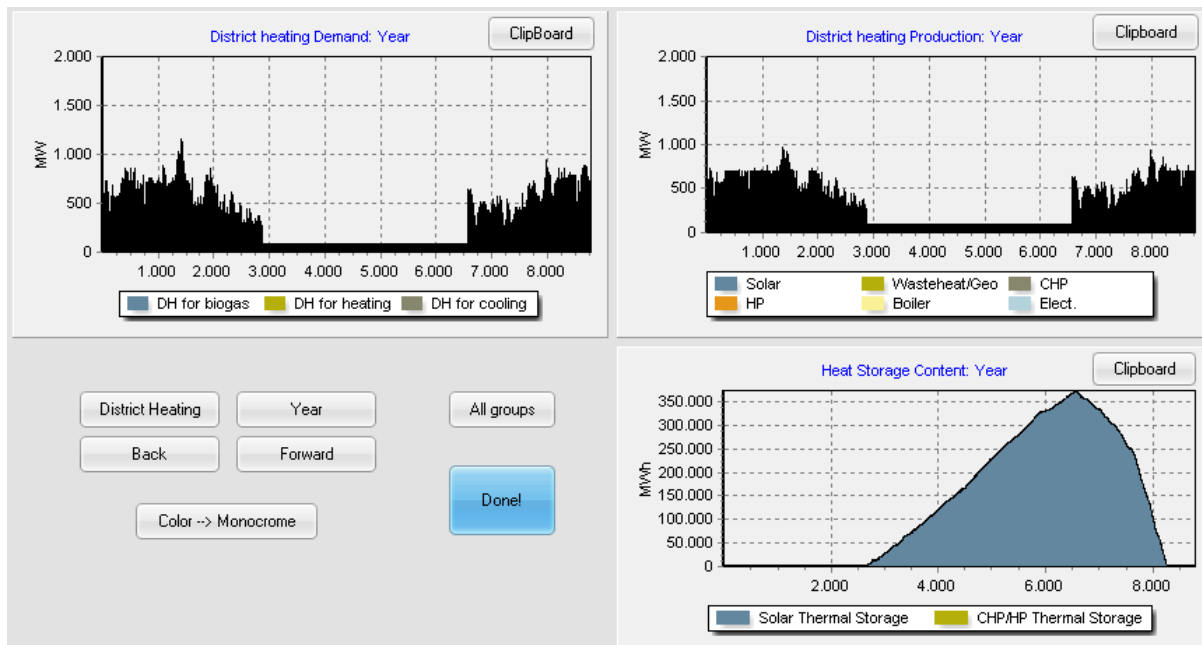
## 6.2. Simulacija

Simulacija neće razmatrati stabilnost električnog sustava, nego isključivo toplinskog. Iako u stvarnosti su električni i toplinski sustavi međusobno zavisni. To se najviše očituje kod kombiniranih postrojenja koja u isto vrijeme proizvode toplinsku i električnu energiju. Također u periodima vrlo niske ili čak negativne cijene električne energije je moguće koristiti dizalice topline za punjenje toplinskih spremnika.

Model u ovoj situaciji je relativno jednostavan i uključuje samo toplinski sustav – i to stranu potražnje i stranu proizvodnje u obliku solarnih kolektora s toplinskim spremnikom i toplinskim kotlovima.

### 6.3. Rezultati

Simulacijom je utvrđen potrebni kapacitet spremnika te je prikazana proizvodnja iz solarnih kolektora u svakom satu.

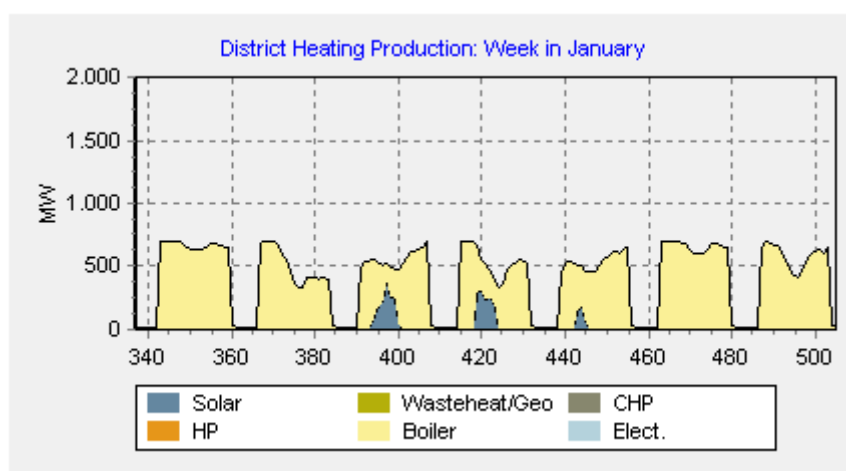


**Slika 40. Grafički prikaz rezultata unutar programa**

Uz navedene ulazne podatke se vidi na slici 40. da je potrebni kapacitet toplinskog spremnika 373,053 GWh.

#### Siječanj

Na slici 41. je prikazana proizvodnja topline za tjedan u siječnju. Potražnja je visoka zbog grijanja, te je solarna iradijacija vrlo niska zbog doba godine. Također spremnik topline je prazan u tom periodu.

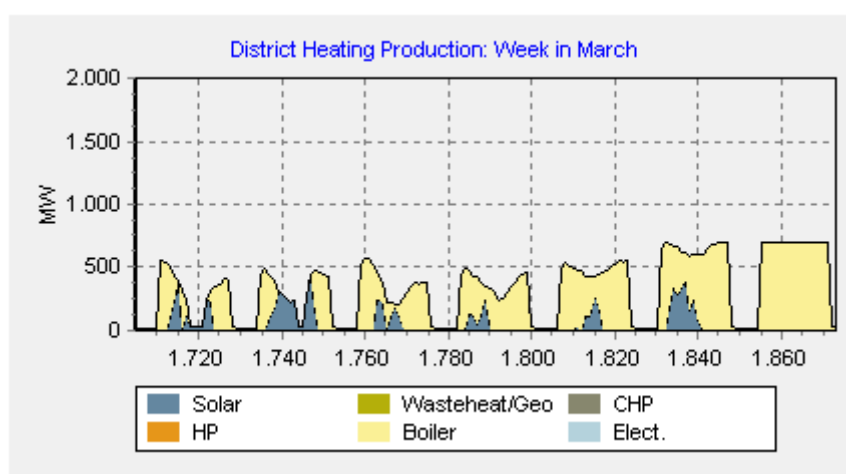


**Slika 41. Proizvodnja topline za tjedan u siječnju**

Zbog prethodno navedenih razloga, samo mali udio dolazi iz solarnih kolektora (plava boja), te u nekim danima solarni kolektori uopće ne proizvode toplinu. Ostatak topline bi dolazio iz ostalih izvora – plinska postrojenja koja se danas koriste.

### Ožujak

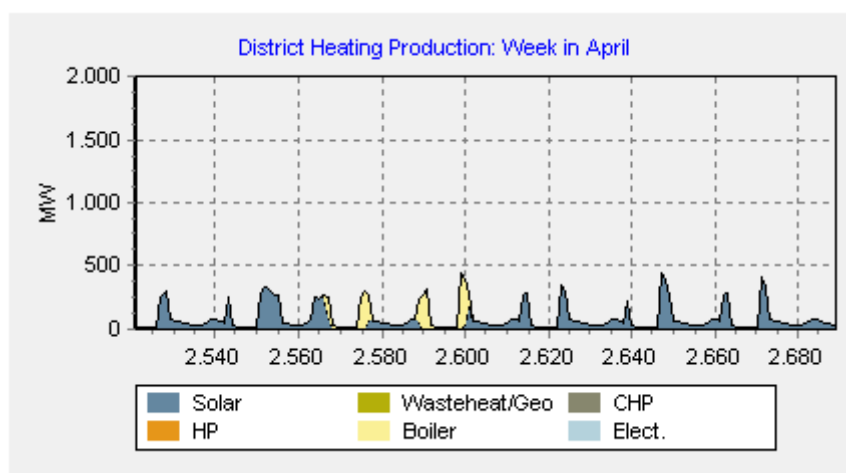
Za tjedan u ožujku je solarna iradijacija osjetno veća, te su potrebe za toplinskom energijom nešto manje – iako još uvijek traje sezona grijanja. Na slici 42. se vidi da je u odnosu na siječanj porastao udio topline proizvedene u solarnim kolektorima, ali i dalje većina topline dolazi iz ostalih izvora. Toplinski spremnik je i dalje prazan zbog nedovoljne solarne iradijacije i visoke potrošnje topline.



Slika 42. Proizvodnja topline za tjedan u ožujku

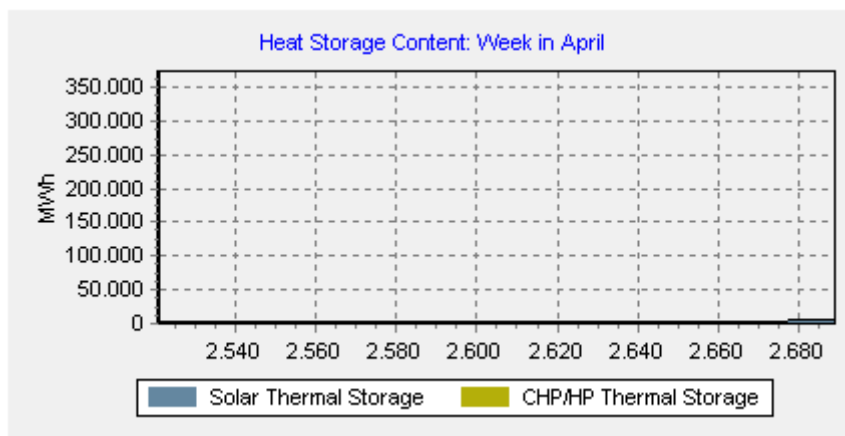
### Travanj

U travnju je solarna iradijacija još veća, a toplinske potrebe manje iako sezona grijanja i dalje traje. Na slici 43. se vidi da su gotovo sve potrebe za toplinom pokriveno iz solarnih kolektora, dok se samo mali udio pokriva iz ostalih izvora.



Slika 43. Proizvodnja topline za tjedan u travnju

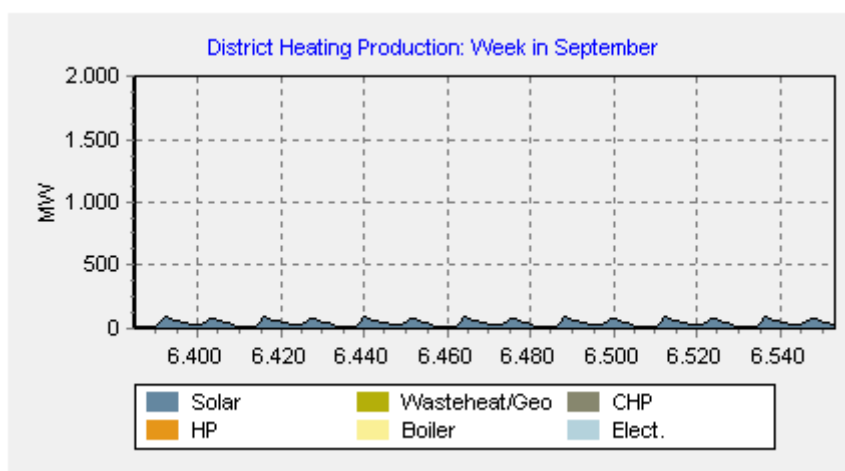
U travnju količina proizvedene energije iz solarnih kolektora premašuje toplinske potrebe, stoga se počinje podizati razina pohranjene energije u toplinskim spremnicima – slika 41.



Slika 44. Pohranjena energija u spremnicima topline

### Rujan

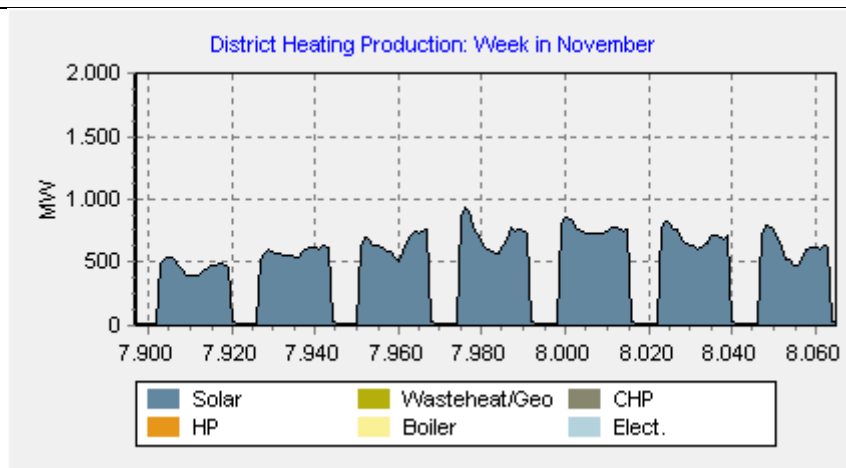
U rujnu je toplinski spremnik na vrhuncu popunjenosti, solarna insolacija je i dalje vrlo visoka, a potrebe za toplinskom energijom niske jer sezona grijanja još nije počela. Na slici 45. se vidi potrošnja, te da je sva toplina proizvedena u solarnim kolektorima.



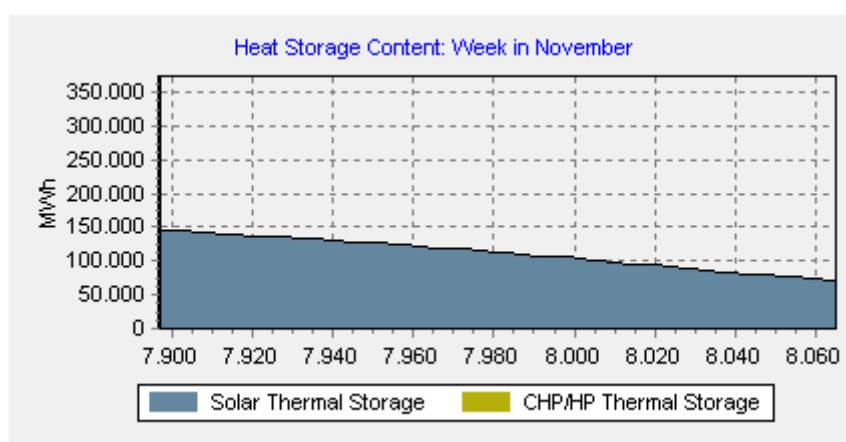
Slika 45. Proizvodnja topline za tjedan u rujnu

### Studeni

U studenom je potrošnja topline vrlo visoka zbog grijanja, a solarna iradijacija znatno manja. Bez obzira na to, nije potrebno koristiti druge izvore topline jer je u spremniku pohranjen dovoljno toplinske energije akumulirane tokom ljeta koja pokriva sve potrebe – slike 43. i 44.



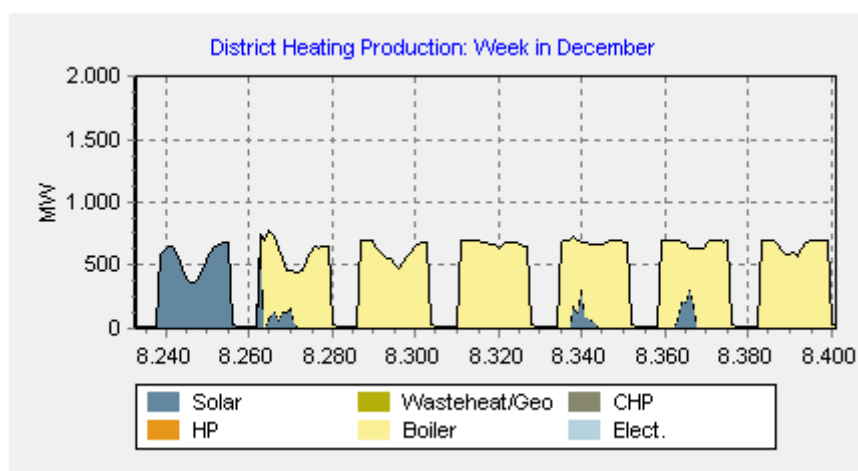
Slika 46. Proizvodnja topline za tjedan u studenom



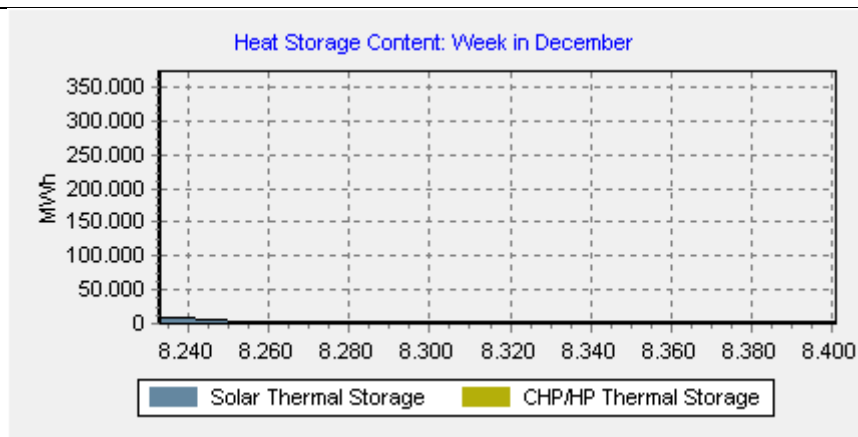
Slika 47. Pohranjena energija u spremnicima topline

## Prosinac

U prosincu se spremnik isprazni, nakon čega se gotovo sve potrebe počinju pokrivati iz drugih izvora topline. Solarna iradijacija je vrlo mala, te se samo vrlo mali dio potreba pokriva iz solarnih kolektora – slike 45. i 46.



Slika 48. Proizvodnja topline za tjedan u prosincu



**Slika 49. Pohranjena energija u spremnicima topline**

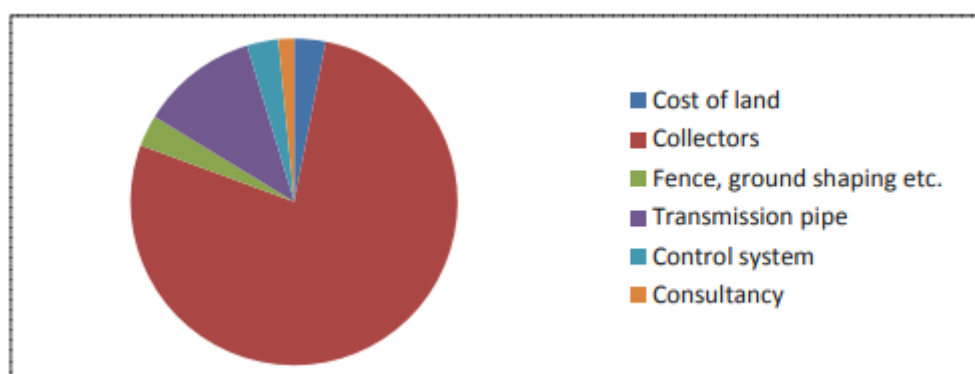
Nagli prestanak opskrbe topline iz spremnika je takav zbog modela u alatu EnergyPLAN. U realnom slučaju bi se zbog tehnoloških i fizikalnih ograničenja, znatno ranije počeli uključivati ostali izvori topline koji bi preuzimali udio u proizvodnji topline. Time bi toplina u spremniku duže ostajala pohranjena.

## 7. Cijena energije

Toplinska energija proizvedena u solarnih toplana ovisi gotovo isključivo o investicijskom trošku s obzirom da nije potrebno skupo gorivo, te da su troškovi održavanja sustava izrazito niski.

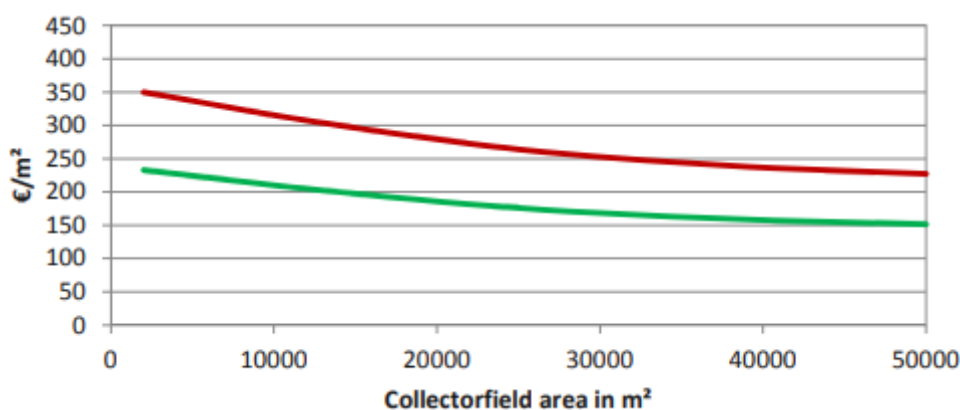
### 7.1. Cijena toplane bez spremnika

Cijena izgradnje solarne toplane se sastoji prvenstveno od cijene kolektora, zatim od cijene zemljišta, toplovodne mreže, kontrolnog sustava, cijene rada, detaljne pripreme projekta i ostalo. Od svega je najveći dio troška cijena kolektora, čak 80%, što se vidi iz dijagrama na slici 50.



Slika 50. Udio troškova toplane bez spremnika [22]

Cijena kolektora ovisi o veličini solarne toplane, tj. što je veća površina kolektora, niža je cijena po  $m^2$  što se vidi na slici 51.



Slika 51. Cijena kolektora [22]

Vidi se da cijena kolektora varira između 150 i 225 EUR/ $m^2$  za najveće solarne toplane. Prema tome je za proračun odabrana cijena 175 EUR/ $m^2$ .

Ukupno za obje solarne toplane je planirano 1042686 m<sup>2</sup> kolektorske površine. Prema tome cijena kolektora se računa prema:

$$C_{kol} = c_{kol} \cdot A_c \quad (9)$$

Gdje je:

$C_{kol}$  – ukupna cijena kolektora [EUR]

$c_{kol}$  – pretpostavljena cijena solarnih kolektora po m<sup>2</sup> kolektorske površine [EUR/m<sup>2</sup>]

$A_c$  – ukupna kolektorska površina [m<sup>2</sup>]

Prema tome cijena kolektora za obje solarne toplane iznosi:

$$C_{kol} = 182.470.036 \text{ EUR}$$

Preostali troškovi, izuzev toplinskog spremnika iznose:

$$C_{ost} = 45.617.509 \text{ EUR}$$

## 7.2. Cijena toplinskog spremnika

Spremnici topline će biti izvedeni u obliku izoliranih jama (PTES). Takav spremnik je praktički jedino rješenje za spremnike volumena navedenog u ovom slučaju. Također su cjenovno najpovoljniji po jedinici volumena.

Cijena toplinskog spremnika po jedinici volumena je manja što je spremnik veći. Za ovaj slučaj je pretpostavljena cijena od 31 EUR/m<sup>3</sup> [6].

Prema tome cijena toplinskih spremnika se računa prema:

$$C_{spr} = c_{spr} \cdot V_{spr} \quad (10)$$

Gdje je:

$C_{spr}$  – ukupna cijena kolektora [EUR]

$c_{spr}$  – pretpostavljena cijena spremnika topline po jedinici volumena [EUR/m<sup>3</sup>]

$V_{spr}$  – ukupni volumen spremnika [m<sup>3</sup>]

Ukupna cijena oba spremnika iznosi:

$$C_{spr} = 165.209.186 \text{ EUR}$$



Na kraju ukupni investicijski trošak iznosi:

$$C = 393.296.731 \text{ EUR}$$

### 7.3. Godišnji troškovi održavanja

Godišnji troškovi za pogon i održavanje se za ovakva postrojenja procjenjuju na 0,34 EUR/MWh<sup>[8]</sup>, što znači da bi za obje solarne toplane troškovi održavanja iznosili:

$$C_{odr} = 258.921,57 \text{ EUR/god.}$$

### 7.4. Trošak toplinske energije (LCOH)

S obzirom da solarne toplane ne trebaju skupo gorivo i da je trošak godišnjeg održavanje izrazito manji od investicijskog troška, potrebno je odrediti koliki je trošak toplane kroz njezin radni vijek uz primjenjivu diskontnu stopu.

Uprosječeni trošak toplinske energije se računa prema jednadžbi:

$$LCOH = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{(I_i + O\&M_i + F_i)}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+r)^i}} \quad (11)$$

Gdje su:

$I_i$  – Investicijski trošak u svakoj godini

$O\&M_i$  – godišnji troškovi održavanja

$F_i$  – Troškovi goriva

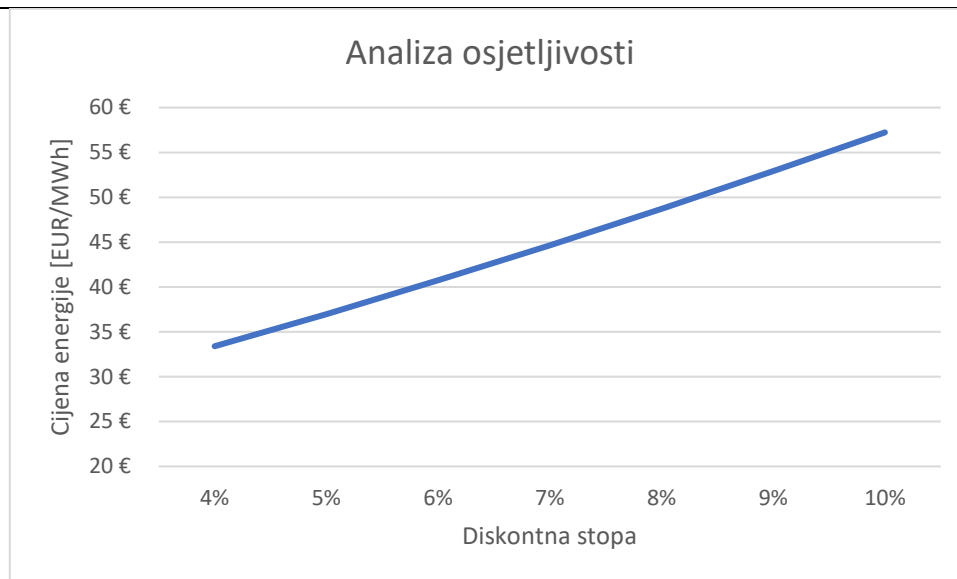
$Q_i$  – Toplina proizvedena u svakoj godini

$r$  – Diskontna stopa

$n$  – Period rada

Pretpostavka je da je radni vijek toplane 25 godina i da diskontna stopa iznosi 7%. Uz navedene uvijete cijena toplinske energije (LCOH) bi iznosila **44,66 EUR/MWh**.

Također, napravljena je analiza osjetljivosti cijene energije, te kako se ona mijenja s promjenom diskontne stope. Dijagram koji pokazuje promjenu je prikazan na slici 52.



**Slika 52. Analiza osjetljivosti cijene energija**

Za diskontnu stopu od 5% cijena topline iznosi 36,98 EUR/MWh. Ukoliko diskontna stopa iznosi 9% cijena topline je znatno veća, te iznosi 52,92 EUR/MWh.

## 7.5. Trenutni trošak za proizvodnju topline

U Hrvatskoj, tako i u Zagrebu je cijena toplinske energije niža od troškova proizvodnje toplinske energije, te se može reći kako se toplinska energija u današnjim sustavima subvencionira. Stoga je potrebno izračunati stvarni trošak proizvodnje topline u trenutno korištenim postrojenjima. U obzir će se uzeti isključivo cijena plina kao goriva koje predstavlja najveći trošak, te trošak za CO<sub>2</sub> emisije prema ETS shemi Europske Unije [28].

U Hrvatskoj cijena plina za industrijske korisnike iznosi 8,14 EUR/GJ odnosno 29,304 EUR/MWh [27]. Osim cijene plina, sve veći utjecaj na cijenu energije ima cijena emisija ugljikovog dioksida. Trenutna cijena emisija iznosi 25,90 EUR/t CO<sub>2</sub> [29]. Ako emisije CO<sub>2</sub> za plin iznose 0,2 tone po MWh, ukupna cijena plina, zajedno sa cijenom emisija iznosi 34,48 EUR/MWh [30]. Za izračun cijene su pretpostavljene sljedeće karakteristike CHP postrojenja:

- Električna efikasnost iznosi  $\eta_{el} = 42\%$  [31]
- Termička efikasnost iznosi  $\eta_t = 38\%$  [31]
- Cijena električne energije na tržištu iznosi 40 EUR/MWh [32]

Uz navedene parametre, kako bi se nadoknadila cijena utrošenog plina, trošak proizvodnje topline iznosi **46,54 EUR/MWh** – više od proračunate cijene iz solarnih toplana u poglavlju 7.4. Uz veću cijenu električne energije, CHP postrojenja mogu proizvoditi toplinu uz nižu cijenu toplinske energije. Ako bi cijena električne energije iznosila 50 EUR/ MWh, cijena topline bi bila 35,48 EUR/MWh.

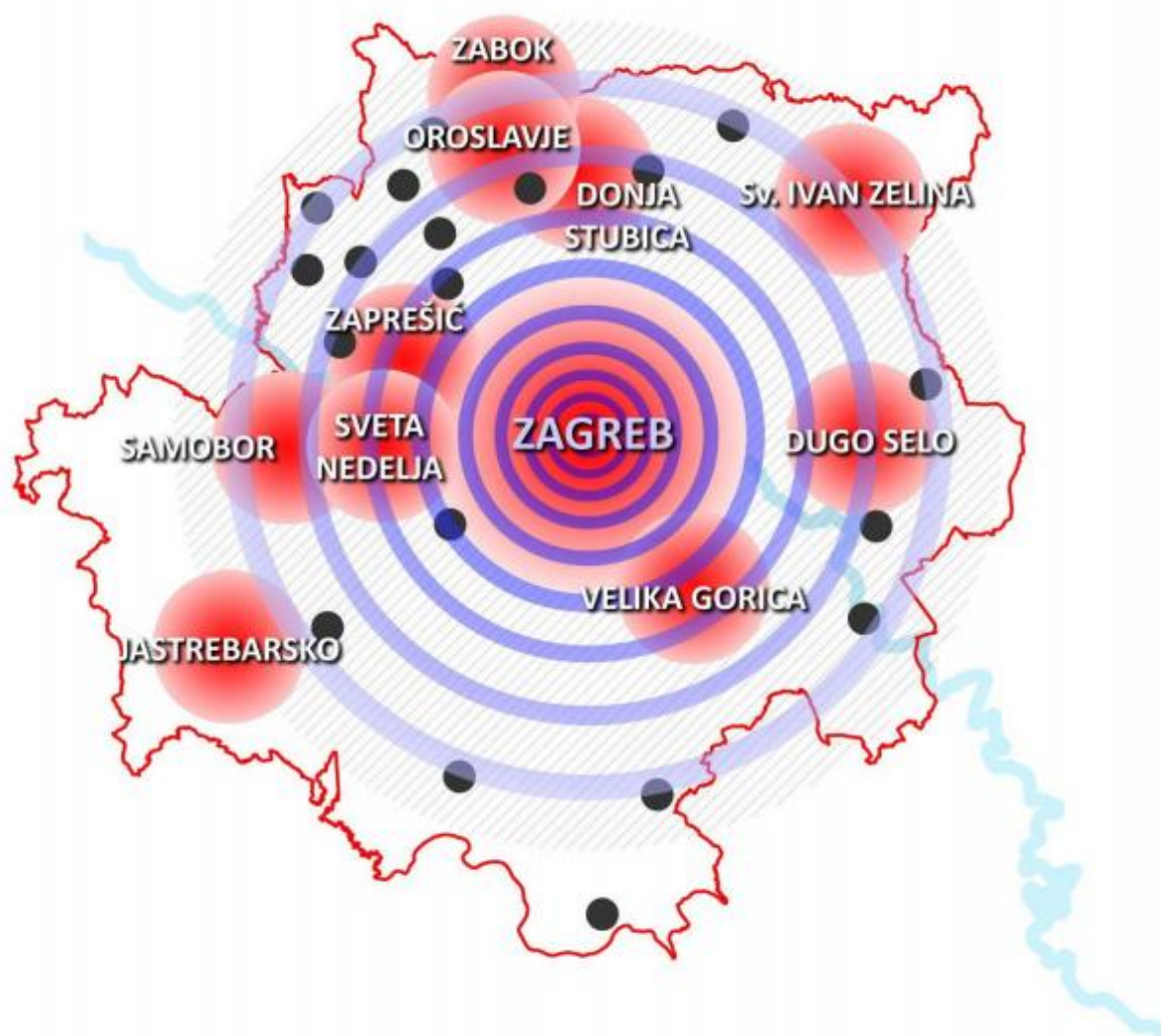
Prema završnom radu – *Toplinska mreža Zagreba* se također vidi da je trenutna cijena topline preniska, te da bi realna cijena prema svim troškovima trebala biti 0,411 HRK/kWh, odnosno 55,29 EUR/MWh [19].

## 8. Širenje CTS-a Urbane aglomeracije Zagreb.

Postavljen je zadatak proširiti toplinsku mrežu na sva naselja unutar UAZ koja imaju dovoljnu gustoću potražnje za toplinskom energijom.

### 8.1. Urbana aglomeracija Zagreb

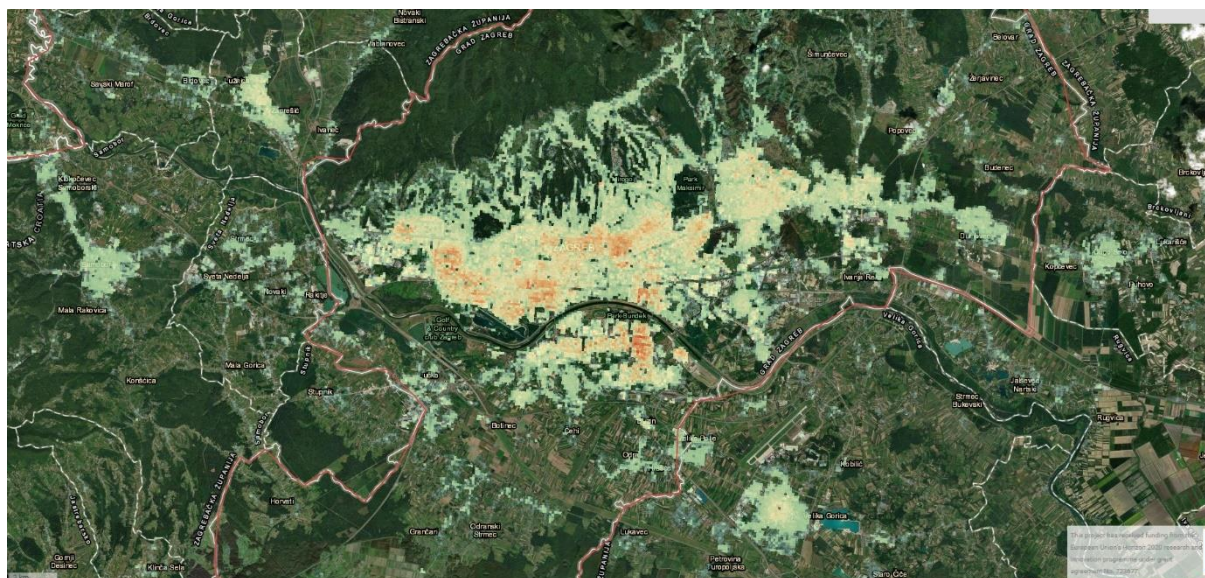
Urbana aglomeracija Zagreb se osim samog grada Zagreba proteže na cijelu Zagrebačku županiju. Veći gradovi koji su dio UAZ-a su: Velika Gorica, Zaprešić, Samobor, Sveta Nedjelja, Dugo Selo, Jastrebarsko, Oroslavje, Zabok, Donja Stubica i Sv. Ivan Zelina.



Slika 53. Veći gradovi UAZ-a [33]

Za spajanje na Zagrebački CTS osim visoke gustoće potreba za toplinskom energijom, bitan faktor je blizina postojećoj toplinskoj mreži. Neki gradovi su previše udaljeni od mreže, dok je također za neke gradove velika prepreka reljef – odnosno Medvednica koja preprečuje put od Zagreba do sjevera UAZ-a.

Prema tim uvjetima gradovi koje se može relativno jednostavno spojiti sa zagrebačkim CTS-om su Samobor, Sveta Nedjelja i Zaprešić na zapadu, Velika Gorica na jugoistoku i Dugo Selo na istoku.



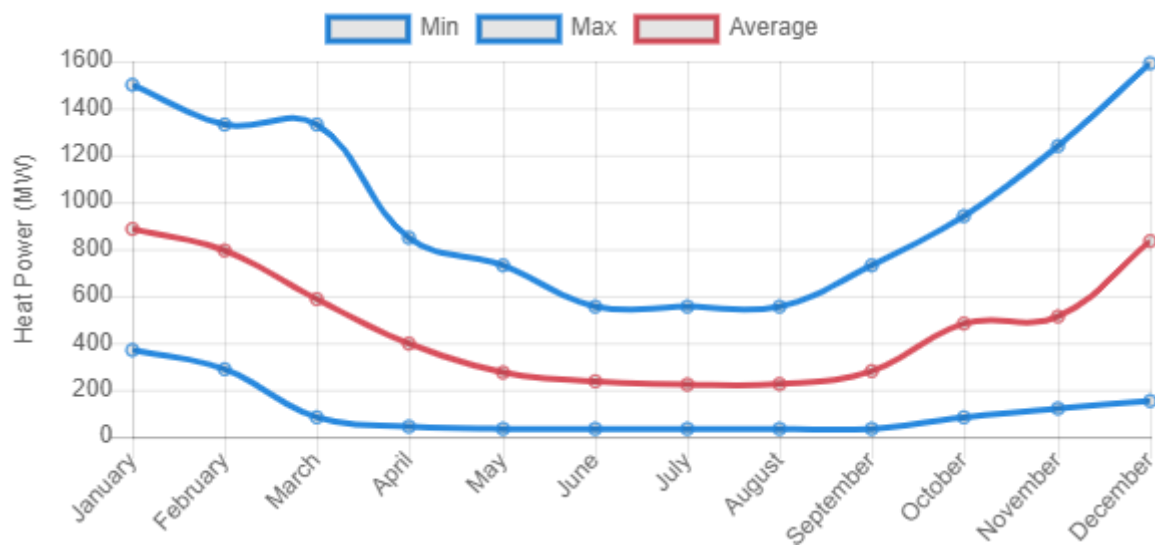
**Slika 54. Gustoća potreba za toplinskom energijom na promatranom području [3]**

Također unutar Zagreba postoji potencijal za širenje CTS-a, prvenstveno gradska četvrt Sesvete koja je na popisu stanovništva 2011. brojala 70009 stanovnika.

Područja u kojima postoji pristup CTS mreži i dalje je teško moguće pokriti 100% potreba za toplinom iz CTS-a. Zbog toga se uzima pretpostavka da u područjima gdje je provedena toplovodna mreža se pokriva 75% toplinskih potreba.

## 8.2. Zagreb istok

Kao što je već opisano u poglavlju 3. CTS grada Zagreba pokriva potrebe za toplinom u iznosu od oko 1500 GWh godišnje. Ali ta mreža ne obuhvaća sve zgrade u područjima koja obuhvaća, niti sve gradske četvrti. Cjelokupno područje grada Zagreba ima potrebe za 4170,46 GWh godišnje [3], što nam govori da CTS pokriva malo više od trećine toplinskih potreba u Zagrebu. Na slici 55. se vidi da je maksimalna toplinska snaga cijelog Zagreba tokom godine 1591,3 MW.

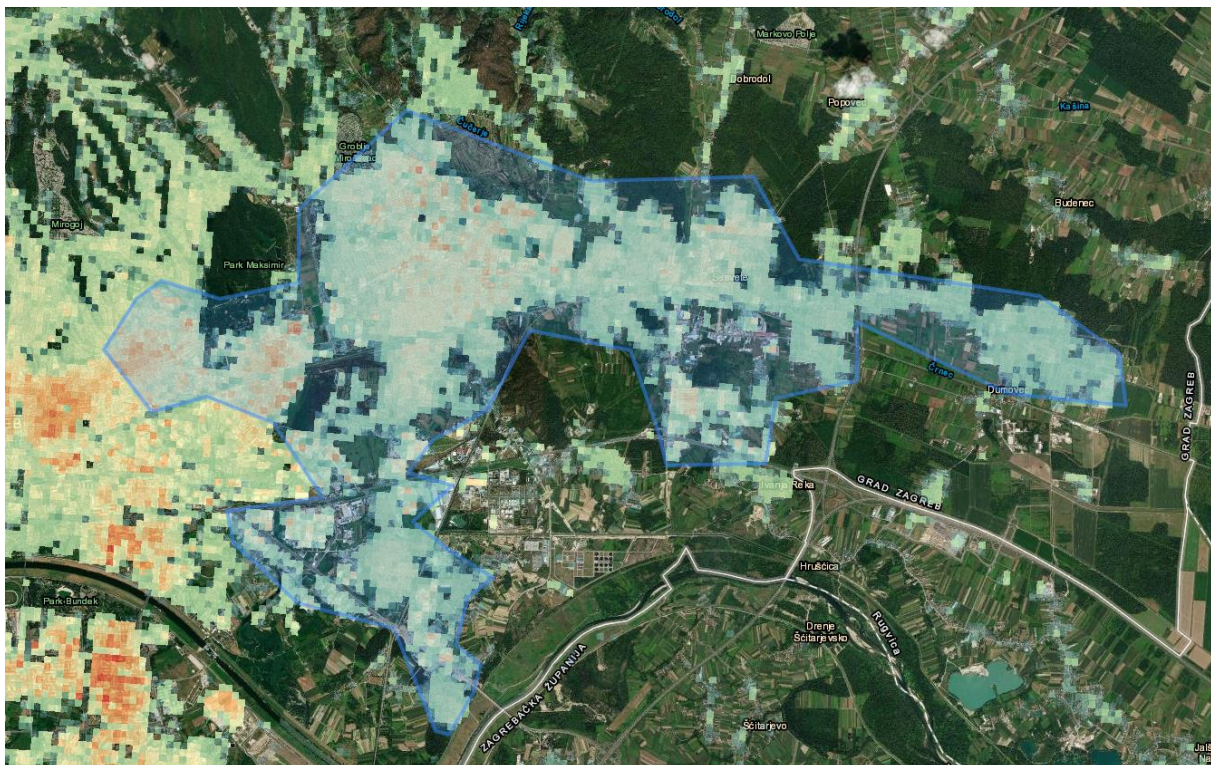


Slika 55. Prikaz maksimalne potrebne snage tokom godine za cijeli grad Zagreb [3]

Može se uzeti omjer maksimalne snage i godišnjih potreba za toplinom za određivanje maksimalne toplinske snage za potrebe CTS-a.

$$\frac{P_{max}}{Q_d} = \frac{1591,3}{4170,46} = 0,3816 \frac{MW}{GWh} \quad (12)$$

Gradske četvrti u kojima je plan proširiti CTS su Maksimir, Peščenica-žitnjak, Dubrava, Sesvete (sa Sesevskim Kraljcem).



Slika 56. Predloženo područje za širenje CTS-a na istoku grada Zagreba [3]

Na slici se vide područja na kojima je predloženo širenje CTS-a, te gustoća potražnje za toplinskom energijom. Za cijelo navedeno područje su toplinske potrebe 1288,88 GWh godišnje. Ostali parametri su prikazani na tablici 14.

**Tablica 14. Toplinske potrebe predloženog područja [3]**

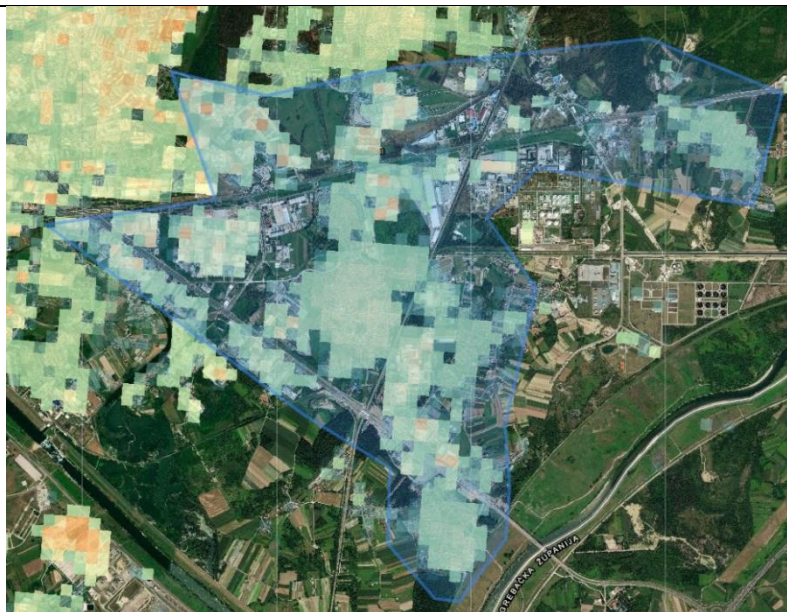
Godišnje potrebe za toplotom [GWh]	1288,88
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplotom [MWh/ha]	230,69
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplotom za 1 ha [MWh/ha]	1791,99
Dodatna potražnja za toplotom unutar CTS-a [GWh]	966,66
Maksimalna snaga [MW]	368,84

Zbog tehničkih okolnosti pojedinih građevina, nedostatka interesa za spajanje na CTS teško je očekivati da će 100% potražnje za toplotom biti pokriveno iz CTS-a. Uz pretpostavku da bi bilo moguće pokriti 75 % novih potreba, potražnja topline unutar CTS-a bi porasla za 966,66 GWh godišnje. Prema omjeru iz jednadžbe 12 je određena maksimalna potrebna snaga za navedeno proširenje.

U kvartovima Dubrava i Ferenčica već postoje CTS, zatvoreni toplinski sustavi (ZTS) i samostalni toplinski sustavi (STS) koji su u 2015. godini pokrivali 48,82 GWh toplinskih potreba [15]. Navedeni sustavi će biti dio predloženog CTS-a u budućnosti.

### **Radnička ulica**

U istočnom dijelu grada je potreban poseban toplovod za južni dio zone – Peščenica i okolica Radničke ulice. Potencijalni CTS u toj zoni bi imao potrebe za 116,75 GWh godišnje. Navedeno područje je prikazano na sljedećoj slici.

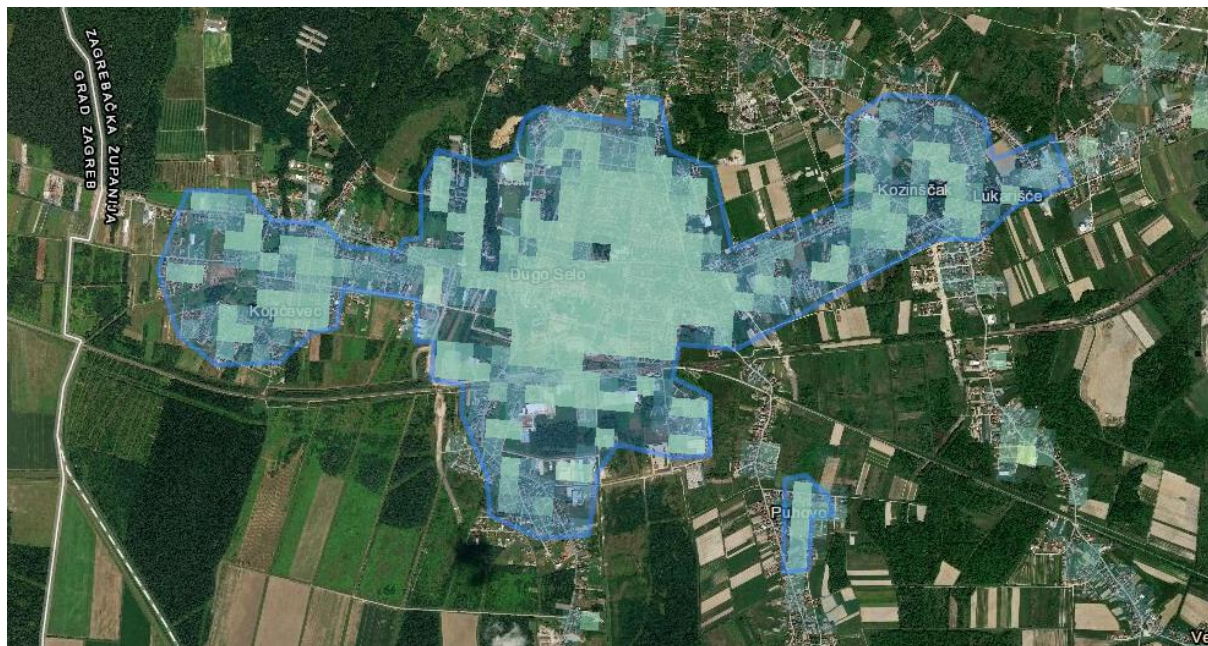


**Slika 57. Zona u okolici Radničke ulice [3]**



### 8.3. Dugo Selo

Dugo Selo se nalazi istočno od Zagreba i broji 17466 stanovnika prema posljednjem popisu stanovništva. Dugo Selo se nalazi istočno od Zagreba, tj. graniči s gradskom četvrti Sesvete. Gustoća toplinskih potreba je prikazana na slici 58.



**Slika 58. Gustoća potrebe za toplinom na području Dugog Sela [3]**

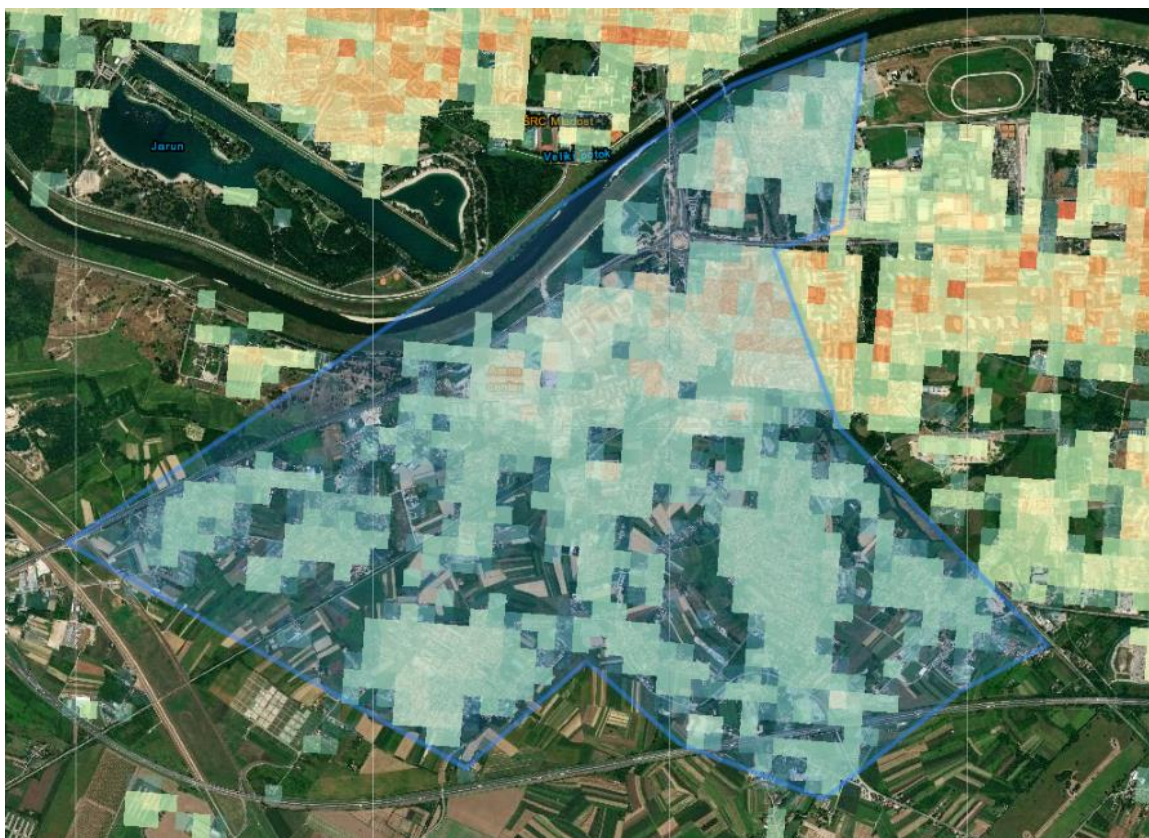
Ukupna potražnja za toplinskom energijom u Dugom Selu iznosi 41,32 GWh. Detaljni podaci su prikazani u tablici 15.

**Tablica 15. Parametri toplinskih potreba Dugog Sela [3]**

Godišnje potrebe za toplinom [GWh]	41,32
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplinom [MWh/ha]	88,29
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplinom za 1 ha [MWh/ha]	300,92
Dodatna potražnja za toplinom unutar CTS-a [GWh]	30,99
Maksimalna snaga [MW]	11,83

#### 8.4. Lanište i okolni kvartovi

Kvartovi na jugozapadu Zagreba, od kojih je najveći novoizgrađeni kvart Lanište, nisu uopće spojeni na CTS. O navedenoj zoni se nalaze kvartovi Trokut, Kajzerica, Lanište, Botinec, Sveta Klara i drugi manji kvartovi. S obzirom na blizinu postojeće mreže zagrebačkog CTS-a, nisu potrebni veliki transmisijski vodovi.



**Slika 59. Toplinske potrebe navedenih područja [3]**

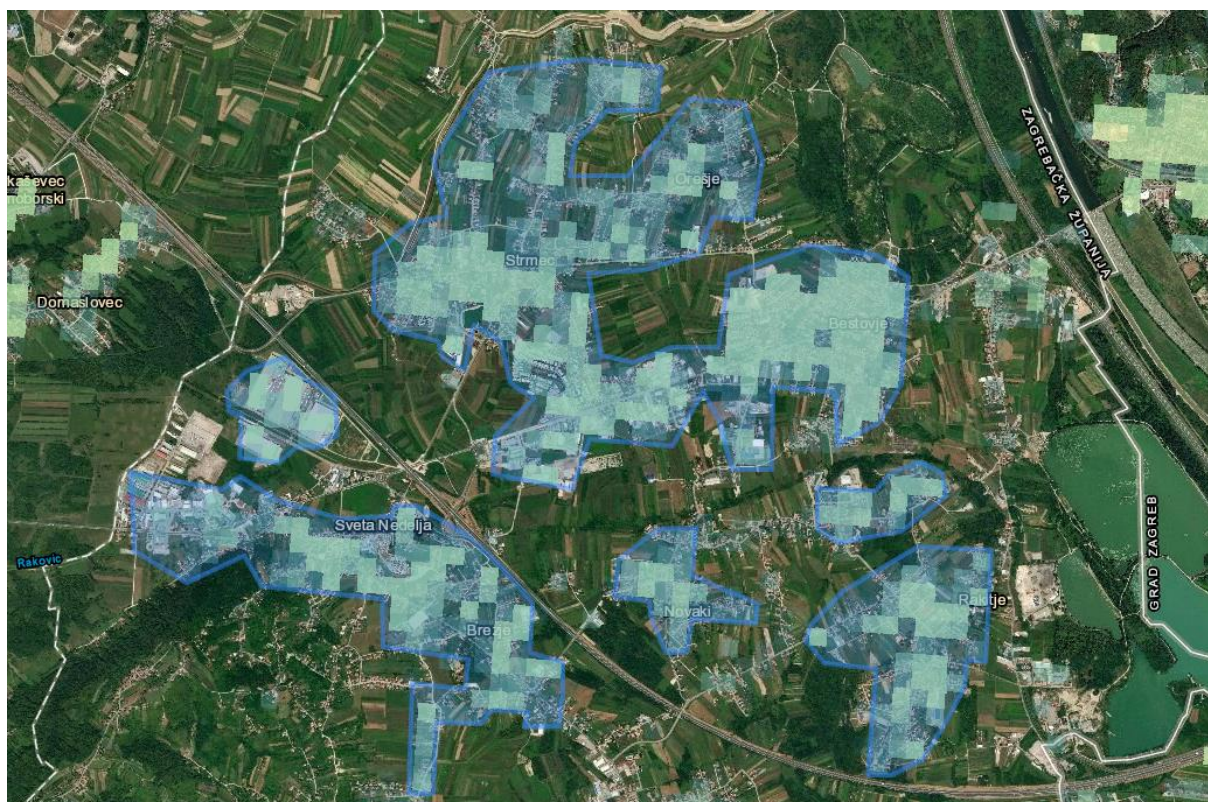
Navedena područja imaju toplinske potrebe od 173,84 GWh godišnje. Uz pretpostavku da je moguće pokriti 75% svih potreba, u ovom području bi se na CTS spojili korisnici s ukupnom potražnjom od 130,38 GWh.

**Tablica 16. Parametri potreba za toplinom u Laništu i okolnim naseljima [3]**

Godišnje potrebe za toplinom [GWh]	173,84
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplinom [MWh/ha]	154,52
Dodatna potražnja za toplinom unutar CTS-a [GWh]	130,38
Maksimalna snaga [MW]	49,75

## 8.5. Sveta Nedelja

Sveta Nedelja ima 18059 stanovnika i nalazi se zapadno od grada Zagreba. Gustoća potreba za toplinom je prikazana na sljedećoj slici.



**Slika 60. Gustoća toplinskih potreba u Sv. Nedelji [3]**

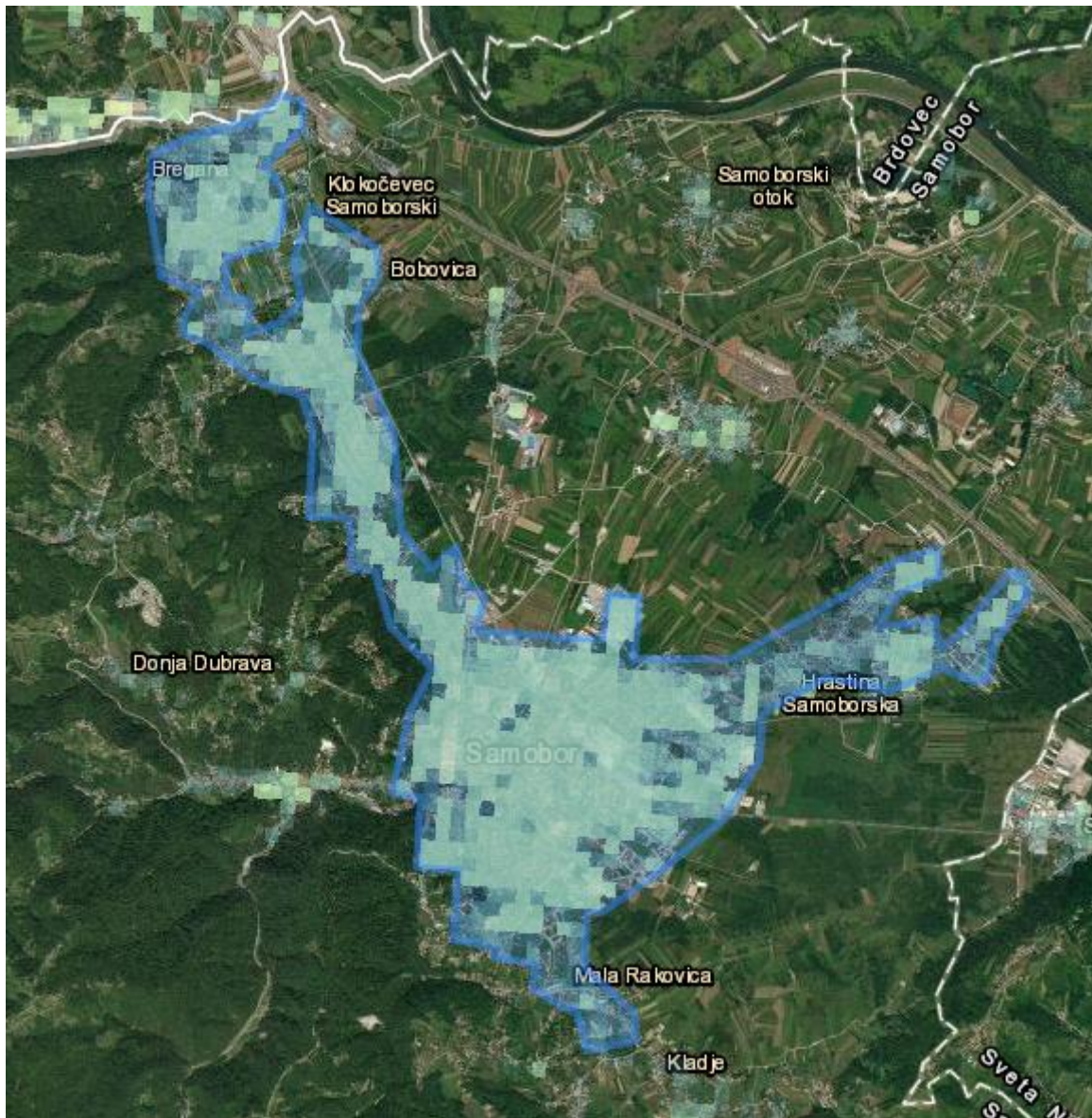
Ukupna potražnja za toplinskom energijom u Sv. Nedelji iznosi 47,34 GWh. Detaljni podaci su prikazani u tablici 17.

**Tablica 17. Parametri toplinskih potreba Sv. Nedelje [3]**

Godišnje potrebe za toplinom [GWh]	47,34
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplinom [MWh/ha]	71,4
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplinom za 1 ha [MWh/ha]	266,03
Dodatna potražnja za toplinom unutar CTS-a [GWh]	35,51
Maksimalna snaga [MW]	13,12

## 8.6. Samobor

Samobor broji 37633 stanovnika. Područje predloženo za proširivanje CTS-a je prikazano na slici 61. To područje bi sezalo sve do Bregane, odnosno granice sa Slovenijom.



Slika 61. Gustoća toplinske potražnje za Samobor [3]

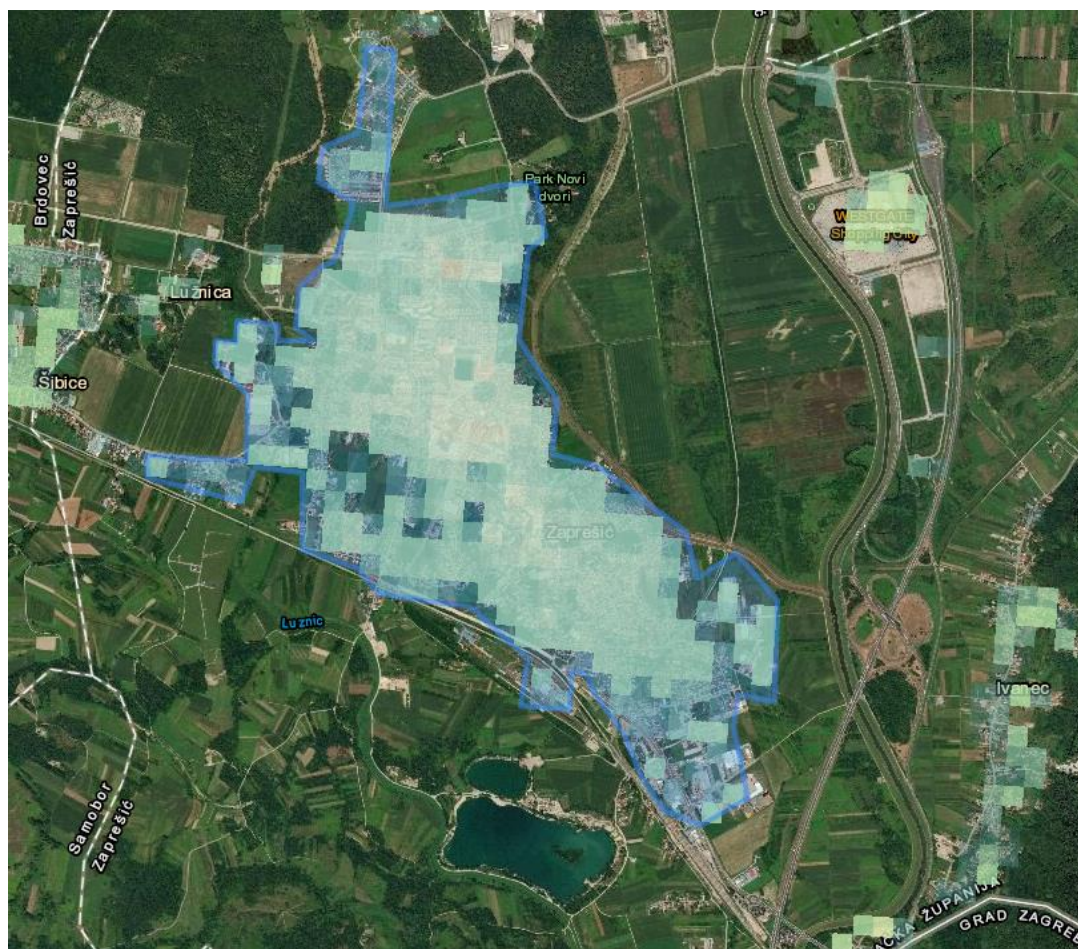
Ukupna toplinska potražnja za Samobor iznosi 85,14 GWh. Ostali podaci su izlistani u tablici 18.

**Tablica 18. Parametri toplinske potražnje za Samobor [3]**

Godišnje potrebe za toplinom [GWh]	85,14
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplinom [MWh/ha]	93,15
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplinom za 1 ha [MWh/ha]	402,59
Dodatna potražnja za toplinom unutar CTS-a [GWh]	63,86
Maksimalna snaga [MW]	24,36

### 8.7. Zaprešić

Zaprešić prema popisu 2011. ima 25223 stanovnika. Zaprešić već ima vlastiti centralizirani toplinski sustav, koji je prema izvještaju HERA-e u 2018. proizveo 16,11 GWh [34], sa potražnjom od 14,72 GWh. Na slici 62. je prikazana gustoća potreba za toplinskom energijom.



**Slika 62. Gustoća potražnje za toplinskom energijom u Zaprešiću [3]**

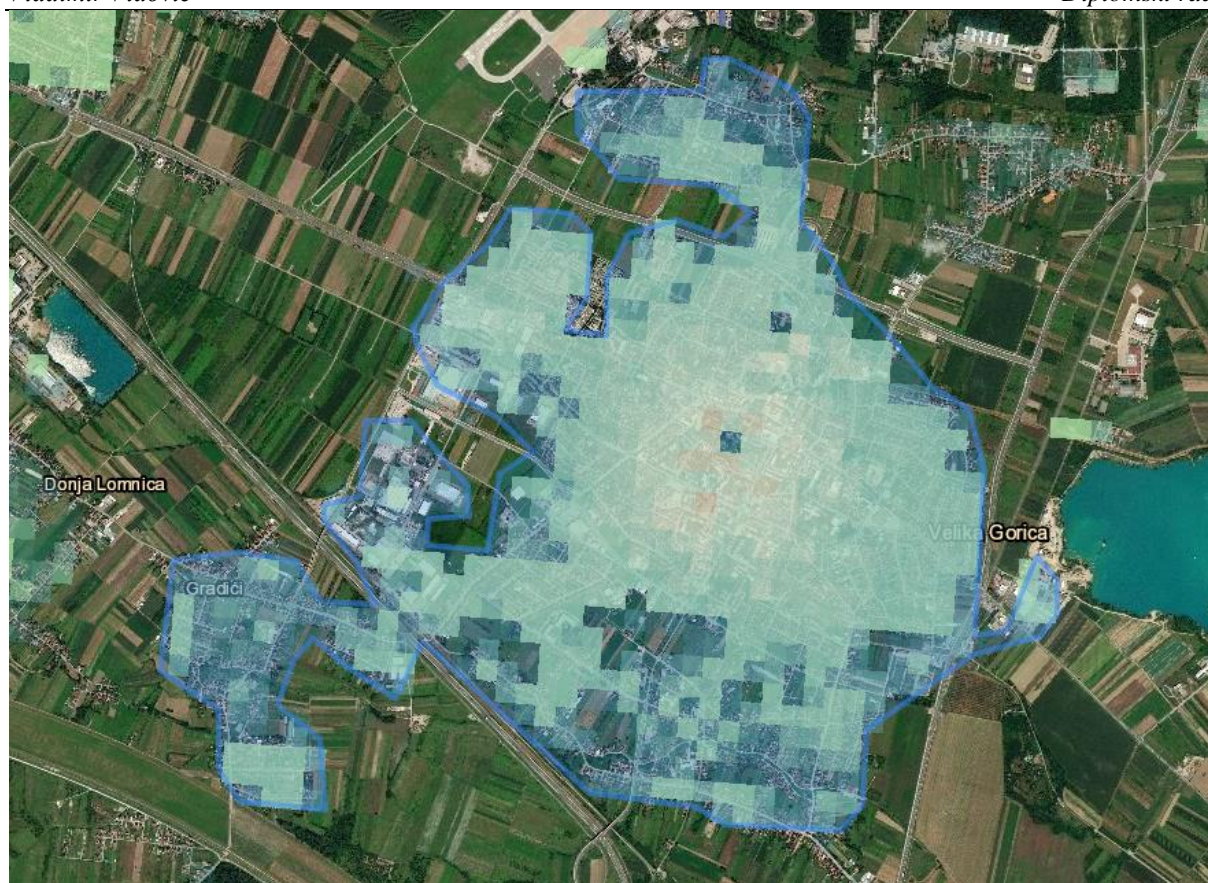
Toplinska potražnja cijelog Zaprešića iznosi 74,87 GWh godišnje. Procijenjen potencijal za spajanje na CTS iznosi 56,15 GWh, od čega je već 14,72 GWh pokriveno postojećim CTS-om. Detaljniji parametri su prikazani u tablici

**Tablica 19. Parametri potražnje za topline u Zaprešiću [3][34]**

Godišnje potrebe za topline [GWh]	74,87
Prosječna godišnja gustoća potreba za topline [MWh/ha]	186,25
Maksimalna godišnja gustoća potreba za topline za 1 ha [MWh/ha]	647,41
Opskrba topline iz postojećeg CTS-a [GWh]	14,72
Procijenjeni potencijal za opskrbu putem CTS-a [GWh]	56,15
Dodatna potražnja za topline unutar CTS-a [GWh]	41,43
Maksimalna snaga [MW]	21,46

## 8.8. Velika Gorica

Velika Gorica je najveći grad u Zagrebačkoj Županiji poslije grada Zagreba sa 63517 stanovnika. Također ima najvišu godišnju potražnju za toplinskom energijom sa 122,47 GWh. Velika Gorica već ima vlastiti CTS koji je u 2018. godini proizveo 52,10 GWh, za pokrivanje potreba od 48,70 GWh [34].



Slika 63. Gustoća potražnje za toplinskom energijom u Velikoj Gorici [3]

Tablica 20. Parametri potražnje topline u Velikoj Gorici [3][34]

Godišnje potrebe za toplineom [GWh]	122,47
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplineom [MWh/ha]	156,01
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplineom za 1 ha [MWh/ha]	721,84
Opskrba toplineom iz postojećeg CTS-a [GWh]	48,70
Procijenjeni potencijal za opskrbu putem CTS-a [GWh]	91,85
Dodatna potražnja za toplineom unutar CTS-a [GWh]	43,15
Maksimalna snaga [MW]	35,05

### 8.9. Buzin i Velika Mlaka

Na putu do Velike Gorice spojni dalekovod bi prolazio preko mjesta Buzin, Veliko Polje i Velika Mlaka. Također su u neposrednoj blizini i Hrašće, Odra i Mala Mlaka. Ti dijelovi imaju dovoljno visoku gustoću potražnje toplinske energije kako bi se i kod njih provela toplovodna mreža.



Slika 64. Gustoća potražnje na spojnom putu do Velike Gorice [3]

Navedena naselja zajedno imaju potražnju za toplinskom energijom od 44,01 GWh godišnje.

Tablica 21. Parametri potražnje za toplinom za Buzin i okolna mjesta [3]

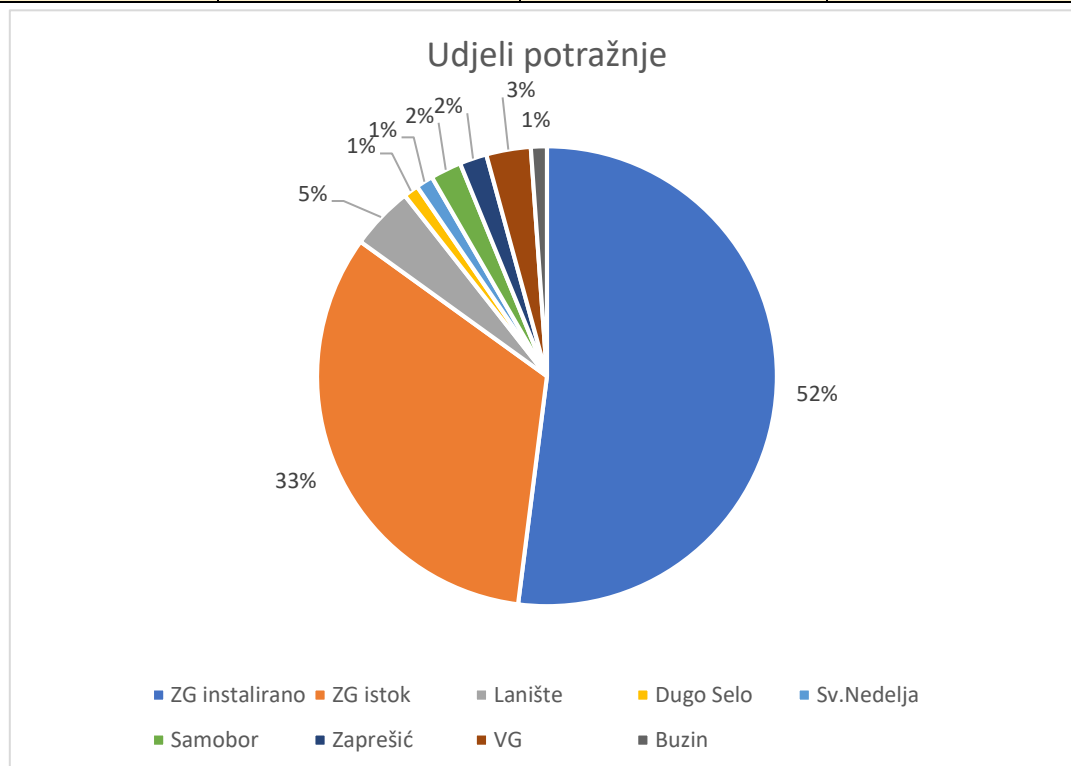
Godišnje potrebe za toplinom [GWh]	44,01
Prosječna godišnja gustoća potreba za toplinom [MWh/ha]	102,34
Maksimalna godišnja gustoća potreba za toplinom za 1 ha [MWh/ha]	626,21
Dodatna potražnja za toplinom unutar CTS-a [GWh]	33,01
Maksimalna snaga [MW]	12,59



## 8.10. Prikaz cijele aglomeracije

Tablica 22. Parametri sadašnjih i budućeg predloženog CTS-a

	Potražnja postojećih CTS-a	Potražnja neizgrađenih CTS-a	Ukupna potražnja CTS-a
	GWh/god.	GWh/god.	GWh/god.
Zagreb istok	1526,37	966,66	2493,03
Dugo Selo	-	30,99	30,99
Sv. Nedelja	-	35,51	35,51
Lanište	-	130,38	130,38
Samobor	-	63,86	63,86
Zaprešić	14,72	41,43	56,15
Velika Gorica	48,70	43,15	91,85
Buzin	-	33,01	33,01
<b>UKUPNO</b>	<b>1589,79</b>	<b>1408,40</b>	<b>2934,77</b>



Slika 65. Udjeli potražnje unutar CTS-a

---

U prethodnim podacima se vidi da Zagreb i dalje predstavlja glavninu potražnje – 90%. Kada bi se cijela aglomeracija povezala toplovodima imali bi CTS sa potrebama od 2934,77 GWh godišnje.

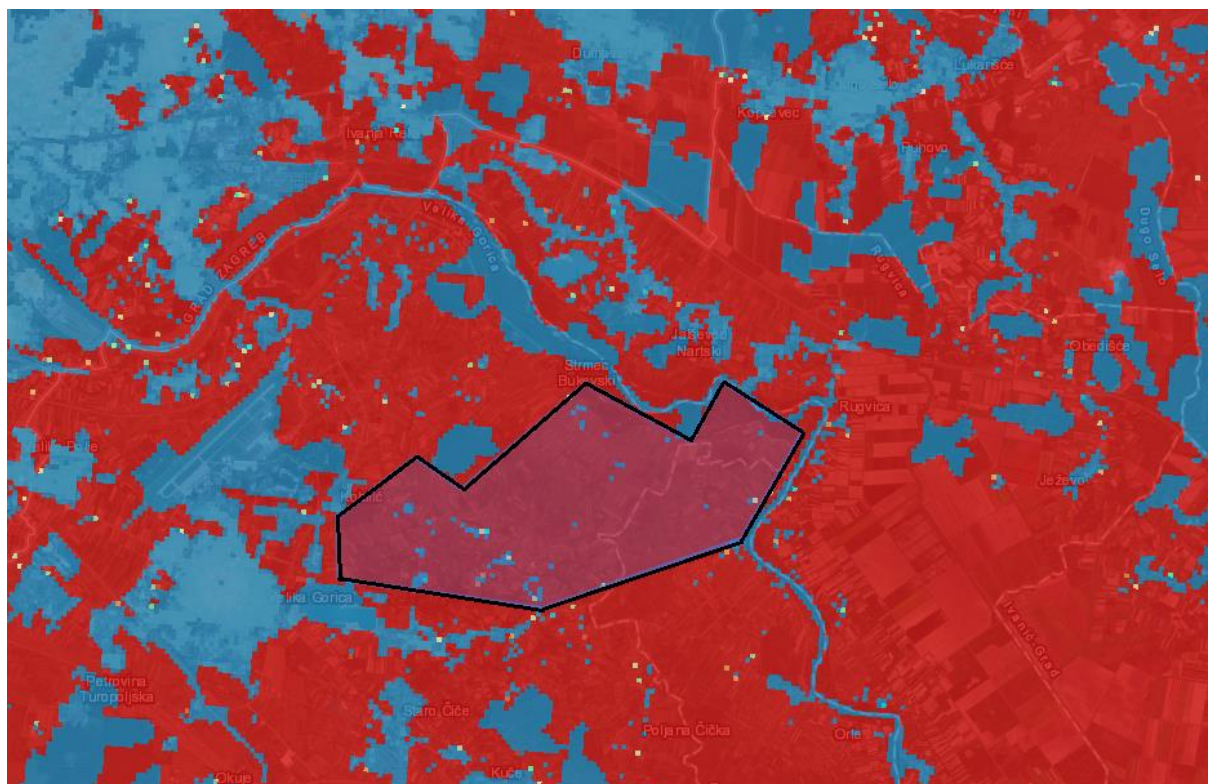
## 9. Scenarij 1 - Jedna velika toplana za 100% potreba CTS-a

Biti će napravljena 2 scenarija – prvi u kojem se sve potrebe novog CTS-a pokrivaju iz jedne toplane i drugi sa više toplana.

### 9.1. Solarna toplana – 100% potreba

Kao drugi dio diplomsko zadatka je potrebno potražnju navedenog proširenog CTS-a pokriti u potpunosti iz solarne energije. Za to treba odrediti na karti potrebnu površinu za smještaj solarnih kolektora i toplinskog spremnika.

Za određivanje površine je korišten alat *Hotmaps* u kojem su mapirane površine povoljne za instalaciju solarnih kolektora.



**Slika 66. Područje predloženo za izgradnju solarne toplane – s potencijalnom proizvodnjom topline [3]**

Predloženo područje na slici 66. se nalazi između Velike Gorice na zapadu i rijeke Save na istoku. Dovoljno je daleko od Zagreba za slučaj širenja grada i zračne luke. Ukupna površina predloženog zemljišta iznosi 2830 ha – za usporedbu to je površina otoka Čiova. Na označenom području se nalaze i manja naselja. Najbitnije – na navedenom području potencijal za proizvodnju solarne topline iznosi 3626,51 GWh/god. [3]



Slika 67. Područje predloženo za solarnu toplanu [25]

## 9.2. Buduća toplovodna mreža

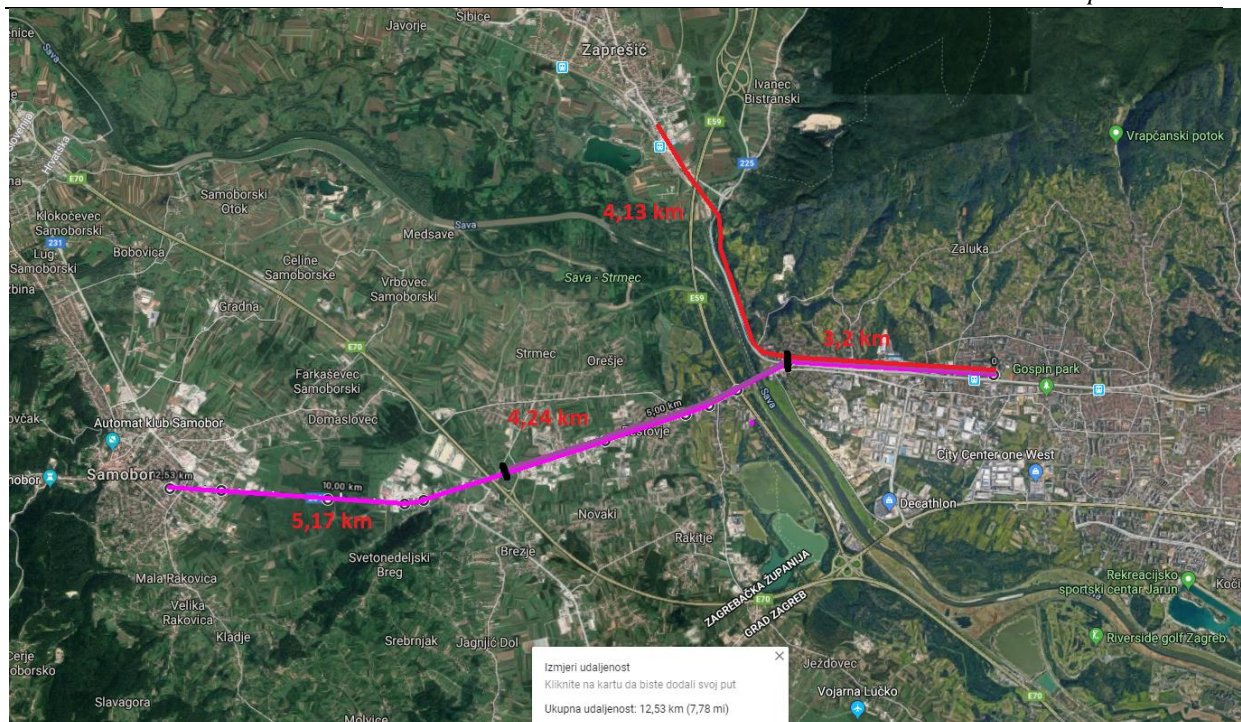
Nadogradnja CTS-a bi se granala u 3 smjera:

- a) Zapadna grana – Sveta Nedelja i Samobor, te odvojak prema Zaprešiću
- b) Jugoistočna grana – Buzin i Velika Gorica sa spajanjem na novu toplanu
- c) Istočna grana – Dubrava, Sesvete i Dugo Selo
- d) Jugozapadna grana – Lanište i okolna mjesta

Ukupno je potrebno izgraditi 53,65 km novih toplovoda za povezivanje svih navedenih dijelova aglomeracije.

### a) Zapadna grana

Zapadno od Zagreba bi bilo potrebno povezati Svetu Nedelju i Samobor jednim odvojkom toplovoda, te Zaprešić drugim.



**Slika 68. Produženje topl vodne mreže – Zapad [25]**

Novi toplovod bi se spajao na postojeću mrežu u Gajnicama. Nastavljao bi se do čvorišta u Podsusedu iz kojeg bi išle dvije grane toplovoda – jedna prema Sv. Nedelji i Samoboru, te jedna prema Zaprešiću. Parametri novih toplovoda su opisani u tablici.

**Tablica 23. Parametri toplovoda - Zapad**

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Maksimalna toplinska snaga $P_{max}$
	[km]	[TJ/god.]	[MW]
Gajnice - čvorište Podsused	3,2	559,85	83,70
Podsused – Sv. Nedelja	4,24	357,70	37,91
Sv. Nedjelja - Samobor	5,17	229,88	24,36
Podsused - Zaprešić	4,13	202,15	21,43

U tablici 23. su navedene maksimalne toplinske snage za svaku pojedinu etapu toplovoda. Toplovode je potrebno dizajnirati prema maksimalnoj snazi, kako bi mogli prenijeti potrebnu toplinu u ostatak CTS-a u svakom trenutku. Proračun potrebnog promjera je dan prema jednadžbi 14.

$$P_{max} = \frac{d_t^2 \cdot \pi}{4} \cdot v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

Gdje su:

$P_{max}$  – Maksimalna toplinska snaga koju je potrebno prenijeti

$d_t$  – promjer toplovoda

$v$  – brzina strujanja grijanog medija (vode) – 3 m/s

$\rho$  – Gustoća vode – 997 kg/m<sup>3</sup>

$c_p$  – Specifični toplinski kapacitet – 4187 J/(kgK)

$\Delta T$  – Razlika temperature polaza i povrata – 40°C

Temperaturna razlika polaznog i povratnog voda je u današnjim sustavima često 55°C ili više. Zbog niže maksimalne temperature koja se može postići u solarnim toplanama, razlika temperatura je smanjena na 40°C.

Kada se jednadžba 13 okrene, dobije se izraz za potrebni promjer cijevi:

$$d_t^2 = \sqrt{\frac{4 \cdot P_{max}}{\pi \cdot v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}} \quad (14)$$

**Tablica 24. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad**

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Gajnice - čvorište Podsused	0,461	500	1076,5	3.444.800,00
Podsused – Sv. Nedelja	0,31	350	817,75	3.467.260,00
Sv. Nedjelja - Samobor	0,249	250	645,25	3.335.942,50
Podsused - Zaprešić	0,233	250	645,25	2.664.882,50

Specifična cijena je izračunata prema sljedećoj jednadžbi [38]:

$$I_t = C_1 + C_2 \cdot d_t \quad (15)$$

Gdje su:

$I_t$  – Cijena izgradnje toplovoda po jedinici dužine [EUR/m]

$C_1$  – Konstantni dio troška izgradnje toplovoda [EUR/m]

$C_2$  – Koeficijent cijene izgradnje toplovoda [EUR/m<sup>2</sup>]

Parametri  $C_1$  i  $C_2$  su zadani u sljedećoj tablici:

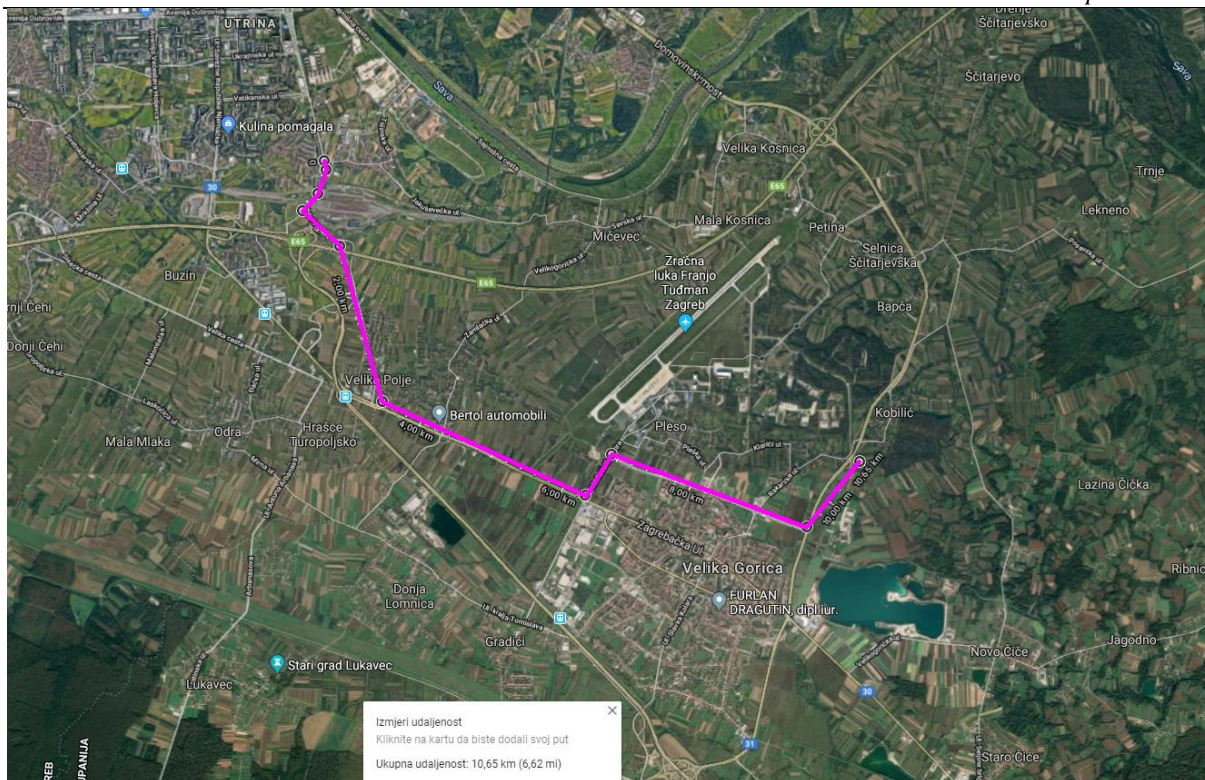
**Tablica 25. Parametri troškova izgradnje toplovoda [38]**

Lokacija izgradnje	$C_1$ [EUR/m]	$C_2$ [EUR/m <sup>2</sup> ]
Unutar grada	286	2022
Izvan grada	214	1725
Parkovi	151	1378

#### **b) Jugoistočna grana**

Jugoistočna grana bi spajala postojeći CTS sa Velikom Goricom. Također bi opskrbljivala toplinom mjesta poput Buzina i Velika Mlake koji se nalaze između postojećeg CTS-a i Velike Gorice. Ovom granom će se povezati Buzin i okolna mjesta koji bi od CTS-a imali potražnju od 33,01 GWh godišnje, te Velika gorica sa potražnjom od 91,85 GWh.

Druga namjena ove grane bi bila povezati novu solarnu toplanu sa cijelim CTS-om potražnje 2993,11 GWh godišnje, te će ova grana biti projektirana zajedno sa spojnim toplovodom do nove solarne toplane.



Slika 69. Prikaz jugoistočne grane – toplovod koji bi spajao postojeći zagrebački CTS, Veliku Goricu i buduću solarnu toplanu [25]

Tablica 26. Parametri toplovoda – Jugoistok

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Maksimalna toplinska snaga $P_{max}$
	[km]	[TJ/god.]	[MW]
Zagreb – VG - toplana	10,65	10095,81	1070,06

Tablica 27. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Zagreb – VG - toplana	3x1 m	3x1000 mm	5817	61.951.050,00



Prema jednadžbi 14 je određen potrebni promjer toplovoda. Za slučaj korištenja samo jedne cijevi, ona bi morala biti promjera od barem 1,65 m. Iz tehničkih razloga je jednostavnije koristiti 3 cijevi promjera  $d_t = 1\text{m}$ . S navedenim cijevima maksimalna toplinska snaga koja se može prenijeti u ostatak CTS-a bi bila 1179,70 MW.

Cijena ovakvog toplovoda je izračunata prema jednadžbi 15.

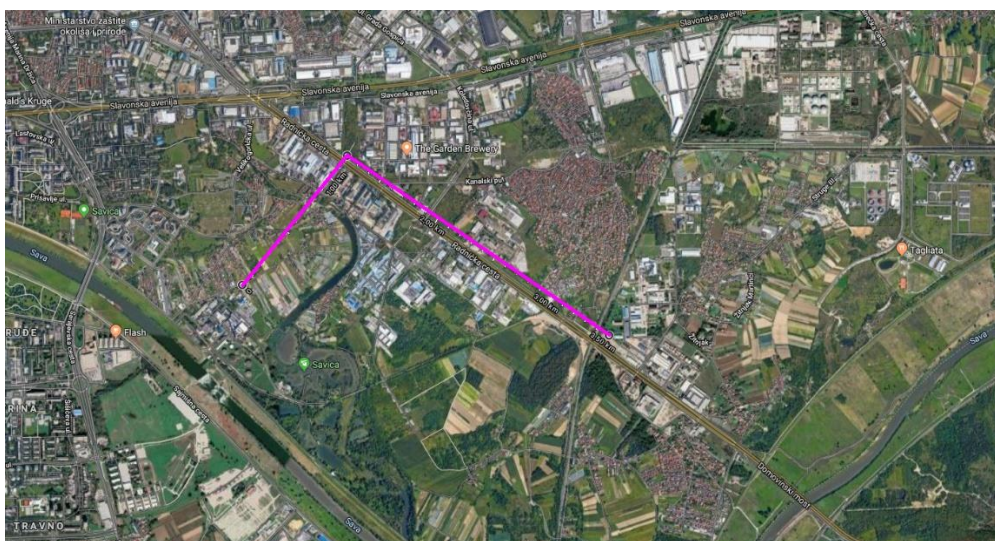
### c) Istočna grana

Ova grana se sastoji od 2 ogranka, od kojih prvi povezuje Dubravu, Sesvete i Dugo Selo. Sastoji se od dvije etape – prvu od postojeće toplovodne mreže kod veterinarskog fakulteta do Sesevetskog Kraljevca, te drugu od Sesevetskog Kraljevca do Dugog Sela.



**Slika 70. Dio istočne grana planirane mreže toplovoda do Seseveta i Dugog Sela [25]**

Drugi ogranak se spaja na mrežu kod postojeće toplane TE-TO te povezuje zone u okolici Radničke ceste i dugačak je 3,5 km.



**Slika 71. Ogranak koji povezuje okolicu Radničke ceste [25]**

**Tablica 28. Parametri istočne grane**

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Linearna gustoća toplinskog toka	Maksimalna toplinska snaga
	[km]	[TJ/god.]	[TJ/km]	[MW]
Zagreb – Sesvete	13,8	3591,54	229,80	336,12
Radnička	3,5	420,28	120,08	44,55
Sesvete – Dugo Selo	4,6	111,56	13,02	11,82

**Tablica 29. Parametri istočne grane s troškovima izgradnje**

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Zagreb – Sesvete	0,26	300	752	10.377.600,00
Radnička	0,23	250	676,8	2.368.800,00
Sesvete – Dugo Selo	0,17	200	559	2.571.400,00

Za slučaj Sesveta i Radničke, potreban je veliki distribucijski toplovod promjenjivog promjera. S obzirom da je u tim zonama cijelom duljinom toplovoda gusta potražnja za toplinom, zbog isplativosti se s duljinom smanjuje promjer cijevi. Za određivanje troškova i potrebnog srednjeg promjera toplovoda je korištena jednadžba 16<sup>[35]</sup>[35].

U tablici 28. je prikazana i linearna gustoća toplinskog toka za svaku etapu. Ta veličina je bitna jer o njoj ovisi optimalni promjer cijevi toplovoda, te njegova cijena [35].

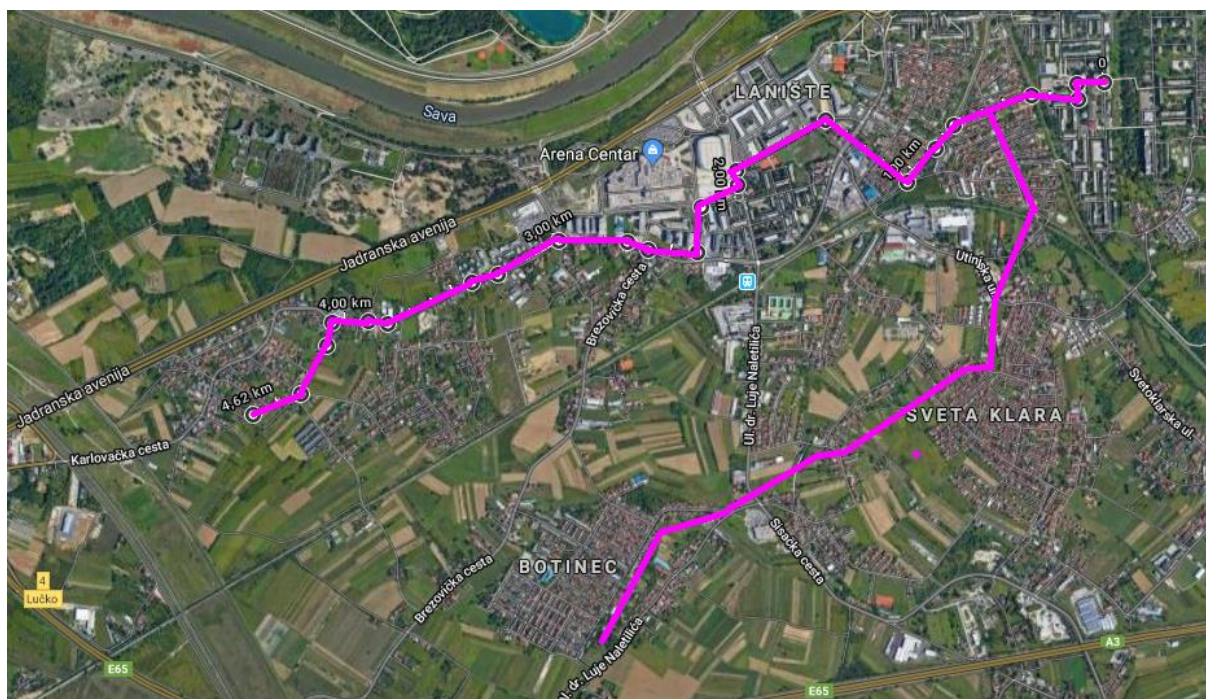
Optimalni srednji promjer cijevi ovisi o gustoći toplinskog toka:

$$d_t = 0,0486 \cdot \ln\left(\frac{Q_s}{L}\right) + 0,0007 \quad (16)$$

Za etapu od Sesvetskog Kraljevca do Dugog Sela, proračun je rađen prema maksimalnoj snazi, odnosno prema jednadžbi 14.

#### d) Jugozapadna grana

Jugozapadna grana bi povezivala Lanište, Botinec i okolne kvartove, te bi se sastojala od 2 odvojka. Sjeverni odvojak, koji bi pokrивao Lanište, Blato i okolna područja bi imao godišnje potrebe od 77,47 GWh. Južni odvojak, koji bi preko Svete Klare spajao Botinec i ostala okolna područja bi imao godišnju potražnju od 52,91 GWh.



Slika 72. Odvojci jugozapadne grane toplovoda [25]

Tablica 30. Parametri jugozapadne grane toplovoda

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Linearna gustoća toplinskog toka	Maksimalna toplinska snaga
	[km]	[TJ/god.]	[TJ/km]	[MW]
Lanište	4,62	278,89	60,37	29,56
Botinec	3,24	190,48	58,79	20,19

U ovoj grani se radi o distribucijskim toplovodima promjenjivog promjera. Stoga će se potrebni srednji promjer odrediti prema jednadžbi 16. Troškovi izgradnje će biti proračunati, kao i za dijelove istočne grane, prema proračunu za distribucijske toplovođe [35].

**Tablica 31. Parametri jugozapadne grane s troškovima izgradnje**

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_i$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Lanište	0,199	200	582,8	2.692.536,00
Botinec	0,198	200	582,8	1.888.272,00

### 9.3. Ekonomska analiza

Potrebno je vidjeti troškove cijelog projekta i troškove za svaku pojedinu granu toplovoda. U tablici 32. su prikazani troškovi mreže planiranih toplovoda svedenih na MWh toplinske energije. Za ekonomsku analizu je pretpostavljen period otplate 25 godina uz diskontnu stopu 7%.

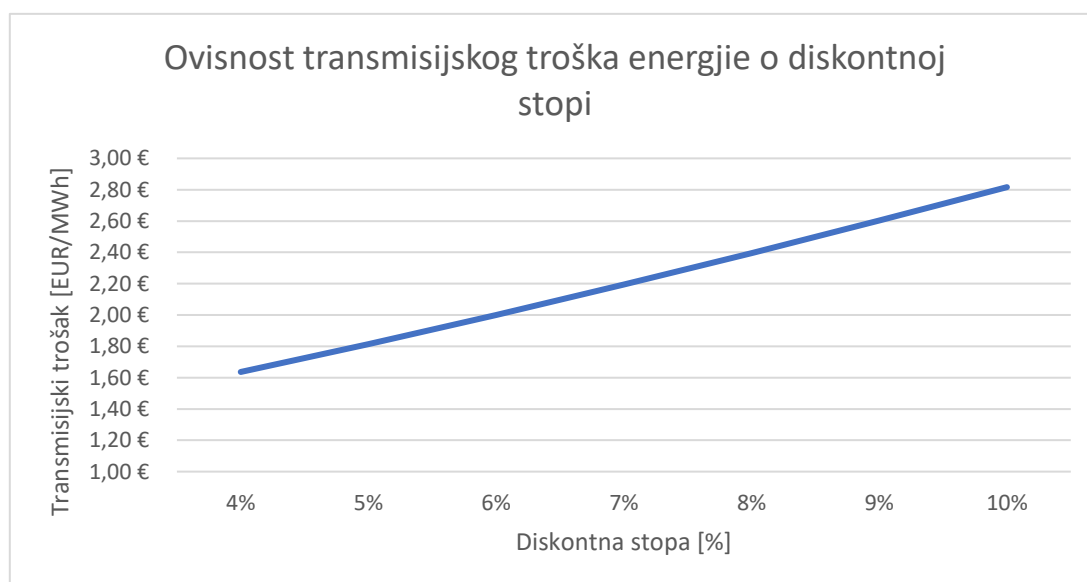
**Tablica 32. Prikaz cijene toplovodne mreže za pojedine grane/etape svedene na MWh**

Grana	Potražnja topline - CTS	Cijena izgradnje	Trošak transmisije topline po MWh
	[GWh/god.]	[EUR]	[EUR/MWh]
<b>Zapadna grana</b>	<b>155,51</b>	<b>12.912.885,00</b>	<b>7,13</b>
Odvojak za Zaprešić	56,15	2.664.882,50	4,07 (9,34)
<b>Istočna grana</b>	<b>997,65</b>	<b>15.317.800,00</b>	<b>1,32</b>
Dugo Selo	30,99	2.571.400,00	7,12
Radnička	116,75	2.368.800,00	1,74
Sesvete	849,92	10.377.600,00	1,05
<b>Jugozapadna grana</b>	<b>130,38</b>	<b>4.580.808,00</b>	<b>3,01</b>
Lanište – sjever	77,47	2.692.536,00	2,98
Botinec - jug	52,91	1.888.272,00	3,06
<b>Ukupno</b>	<b>1153,16</b>	<b>32.811.493,00</b>	<b>2,19</b>

Trošak za jugoistočnu granu nije prikazan jer se radi o toplovodu koji povezuje CTS sa toplanom, te je za njega trošak po jedinici energije izrazito mali – jer pokriva toplinske potrebe cijelog CTS-a.

U tablici se vidi da su troškovi zapadne grane i etape Dugog Sela najveći – razlog tome je niska potražnja i velika udaljenost od postojeće mreže toplinskog sustava. Odvojak za Zaprešić bi imao trošak transmisije od 4,07 EUR/MWh, ali mu je etapa zapadne grane od Gajnica do Jankomira preduvjet. Ukoliko ne bi bila rađena zapadna grana, transmisijski trošak za Zaprešić bi iznosio 9,34 EUR/MWh.

Napravljena je analiza osjetljivosti koja pokazuje ovisnost cijene predložene toplovodne mreže o diskontnoj stopi.



**Slika 73. Dijagram s analizom osjetljivosti za predloženu toplovodnu mrežu (bez toplovoda prema Velikoj Gorici i toplani)**

Ako se pribroji i trošak toplovoda koji bi preko Velike Gorice spajao solarnu toplanu sa ostatkom CTS-a, ukupna investicija za izgradnju dodatnih toplovoda bi iznosila 94.762.543,00 EUR, te bi uprosječni trošak topline na razini cijelog CTS-a iznosio 2,77 EUR/MWh.

**Tablica 33. Trošak proširenja toplinske mreže**

Grana	Potražnja topline - CTS	Cijena izgradnje	Trošak transmisije topline po MWh
	[GWh/god.]	[EUR]	[EUR/MWh]
<b>Zapadna grana</b>	<b>2934,7725</b>	<b>94.762.543,00 €</b>	<b>2,77</b>

## Cijena solarna toplane

Za procjenu troškova solarne toplane predložene u poglavlju 8.10. Solarna toplana mora pokriti sve potrebe CTS-a, tj. 2804,39 GWh. Za procjenu troškova će se uzeti specifični troškovi iz poglavlja. U oba slučaju radi se izrazito velikim solarnim toplanama, tako da je pretpostavka da bi cijena topline bila 44,66 EUR/MWh.

Investicija za izgradnju toplane bi iznosila 1.449.354.270 EUR.

### 9.4. Osvrt na scenarij 1

U ovom scenariju je problem što na izrazito velik CTS dolazi samo jedan toplinski izvor. Zbog toga bi probleme s opskrbom mogli imati korisnici najudaljeniji od toplane za vrijeme najveće potražnje za topline. Moguće je napraviti dodatne toplovode na ostalim rutama za povezivanje najudaljenijih korisnika, ali to znatno poskupljuje investiciju i transmisijski dio cijene topline.

Pozicioniranje tako velike solarne toplane bi zauzelo površinu većeg grada – Nije moguće naći toliku površinu u okolini Zagreba bez da na njoj ne postoje naselja. Unutar takve toplane bi postojala naselja poput otoka između solarnih kolektora.. Bilo bi vrlo zahtjevno riješiti sve imovinsko pravne odnose za navedenu površinu.

Nisu uzeti u obzir troškovi za izgradnju potrebne distribucijske mreže za manje ogranke zbog kompleksnosti proračuna i nedostatka podataka. Također trenutno postojeću mrežu bi bilo potrebno adaptirati na veće kapacitete na mjestima gdje bi došlo do znatnog porasta toplinskog toka, kao npr. u dijelovima na koje bi se spojili predloženi novi dijelovi CTS-a.

Također se vidi da je isplativost Dugog Sela i cjelokupne zapadne grane upitna zbog transmisijskog troška većeg od 7 EUR/MWh, te nam preostaje da su samo nepokriveni dijelovi Zagreba isplativi za spajanje. Štoviše, Nepokriveni dijelovi istočnog Zagreba su vrlo isplativi s transmisijskim troškom od 1,05 EUR/MWh za odvojak do Sesveta i 1,74 EUR/ MWh za Radničku cestu. Cijena potrebnih toplovoda za nepokriveni dio na jugozapadu Zagreba je osjetno veći i ima transmisijski trošak od 3,01 EUR.

Grana koja bi povezivala Veliku Goricu sa Zagrebom je neophodna jer ona spaja izvor topline s ostatkom CTS-a, tako da je njena isplativost neupitna.

## 10. Scenarij 2 – Više solarnih toplana

U ovom scenariju će biti raspoređene solarne toplane na više različitih lokacija. Ovim će se omogućiti kvalitetnija opskrba toplinom svim korisnicima CTS-a.

### 10.1. Solarne toplane

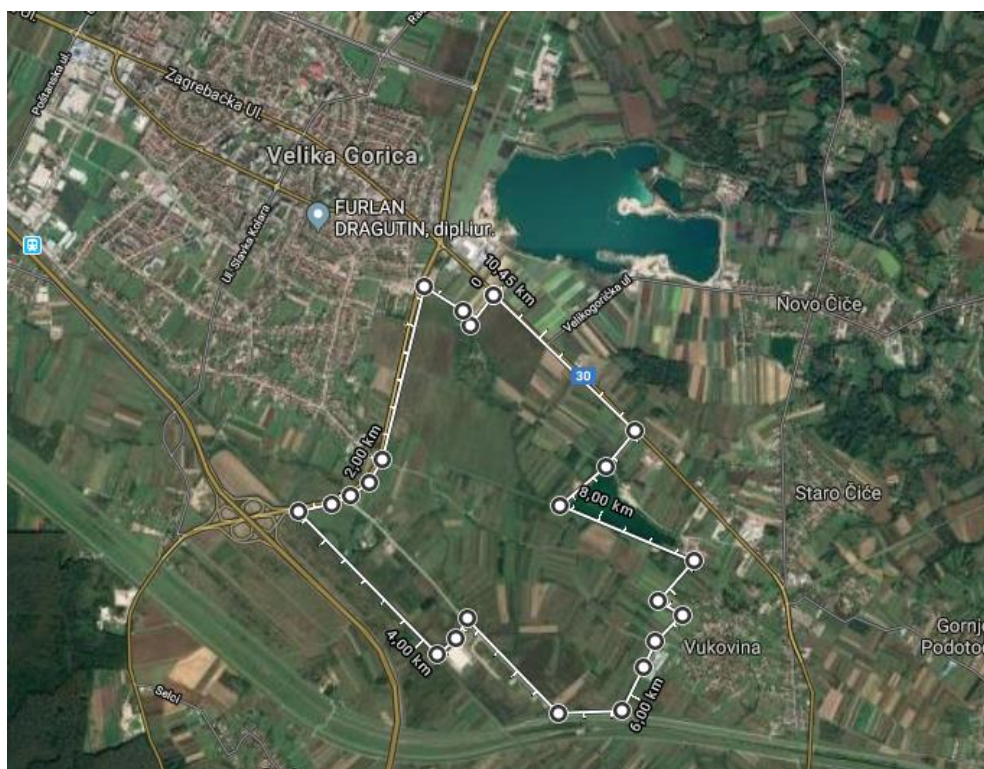
U ovom scenariju će se koristiti već dizajnirane solarne toplane u Donja Dubrava i Jankomir jug iz poglavlja 5. Preostale toplane će također biti dizajnirane prema primjeru solarne toplane Jankomir jug. Uzete će biti sljedeće pretpostavke:

- Omjer površine spremnika i površine ukupnog zemljišta iznosi:  $\frac{A_s}{Z} = 0,0831$
- Omjer korisne kolektorske površine i raspoloživog zemljišta iznosi:  $A_c = Z_c \cdot k \cdot 0,8$
- Specifična površinska toplina koju kolektor proizvede tokom godine iznosi:

$$q = 730,36 \text{ kWh/m}^2$$

#### 10.1.1. Velika Gorica

Južno od Velike Gorice je predložena solarna toplana ukupne površine zemljišta površine  $Z=4,37 \text{ km}^2$ . Solarna toplana bi se odmah spojila na toplovodnu mrežu u Velikoj Gorici, koja bi bila spojena putem novih toplovoda sa ostatkom CTS-a.



Slika 74. Zemljište za izgradnju solarne toplane kod Velike Gorice [25]

**Tablica 34. Karakteristike solarne toplane Velika Gorica**

Površina zemljišta $Z$	[m <sup>2</sup> ]	4.370.000
Površina toplinskog spremnika $A_s$	[m <sup>2</sup> ]	363.148,1
Korisna površina kolektora $A_c$	[m <sup>2</sup> ]	1.180.406
Godišnja proizvodnja topline $Q$	[GWh]	862,12

**10.1.2. Brezovica**

Solarna toplana u Brezovici bi godišnje proizvela 477,42 GWh topline i bila bi smještena uz rasteretni kanal rijeke Save. Toplovodna mreža nije blizu, stoga bi se morao provesti transmisijski toplovod do trenutno postojeće toplovodne mreže.

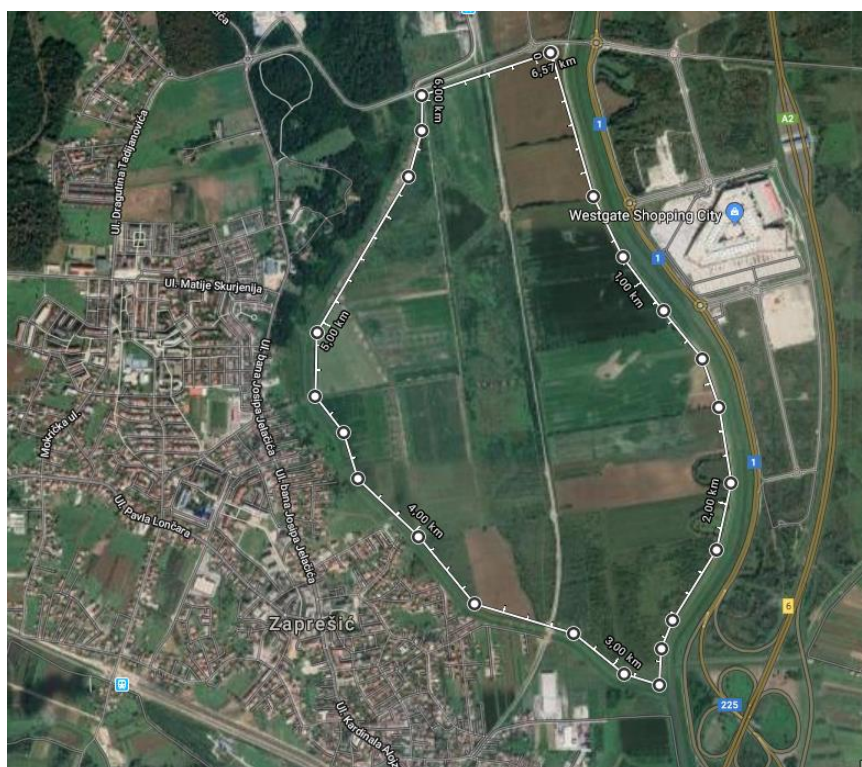
**Slika 75. Zemljište za solarnu toplanu u Brezovici [25]****Tablica 35. Karakteristike solarne toplane u Brezovici**

Površina zemljišta $Z$	[m <sup>2</sup> ]	2.420.000
Površina toplinskog spremnika $A_s$	[m <sup>2</sup> ]	201.102,6
Korisna površina kolektora $A_c$	[m <sup>2</sup> ]	653.680,1
Godišnja proizvodnja topline $Q$	[GWh]	477,42



### 10.1.3. Zaprešić

Toplana u Zaprešiću bi proizvodila 505,04 GWh godišnje. Bio bi joj potreban toplovod kojim bi se spojila na ostatak CTS-a. Za njega bi se koristila ruta prethodno navedena u zapadnoj grani, ali bi promjeri toplovoda morali biti drugačije dimenzionirani zbog različitih iznosa toplinskog toka.



Slika 76. Zemljište solarne toplane u Zaprešiću [25]

Tablica 36. Karakteristike solarne toplane u Zaprešiću

Površina zemljišta Z	[m <sup>2</sup> ]	2.560.000
Površina toplinskog spremnika A <sub>s</sub>	[m <sup>2</sup> ]	212.736,66
Korisna površina kolektora A <sub>c</sub>	[m <sup>2</sup> ]	691.496,27
Godišnja proizvodnja topline Q	[GWh]	505,04

#### 10.1.4. Sesevski Kraljevec

Toplana u Sesevskom Kraljevcu bi proizvodila 209,12 GWh godišnje. Bila bi spojena na predviđeni toplovod koji bi se zao do Sesevskog kraljevca, ali bi navedeni toplovod morao biti dimenzioniran s većim promjerom.



Slika 77. Zemljište solarne toplane u Sesevskom Kraljevcu [25]

Tablica 37. Karakteristike solarne toplane u Sesevskom Kraljevcu

Površina zemljišta $Z$	[m <sup>2</sup> ]	1.060.000
Površina toplinskog spremnika $A_s$	[m <sup>2</sup> ]	88.086,28
Korisna površina kolektora $A_c$	[m <sup>2</sup> ]	286.322,7
Godišnja proizvodnja topline $Q$	[GWh]	209,12

#### 10.1.5. Sveta Nedelja

Ova toplana bi bila smještena u Svetoj Nedelji, na zapadnoj strani. Nalazila bi se tik uz predloženi toplovod prema Samoboru. Toplovod koji bi povezivao toplanu sa Ostankom CTS-a bi morao biti dizajniran za veći toplinski tok.



Slika 78. Zemljište solarne toplane u Svetoj Nedelji [25]

Tablica 38. Karakteristike solarne toplane u Sv. Nedelji

Površina zemljišta $Z$	[m <sup>2</sup> ]	901.797
Površina toplinskog spremnika $A_s$	[m <sup>2</sup> ]	74.939,56
Korisna površina kolektora $A_c$	[m <sup>2</sup> ]	243.589,6
Godišnja proizvodnja topline $Q$	[GWh]	177,91

### 10.1.6. Godišnja proizvodnja topline

Sve navedene toplane zajedno imaju potencijal proizvodnje 2993,11 GWh godišnje, što je dovoljno za pokrivanje cijelog proširenog CTS-a.

### 10.1.7. Ostale potencijalne lokacije

#### Buzin

Na zemljištu kod Buzina, južno od ranžirnog kolodvora preloženo je zemljište površine 3,22 km<sup>2</sup>. Potencijalna proizvodnja topline iznosi 635,25 GWh godišnje



Slika 79. Predložena površina za solarnu toplanu kod Buzina [25]

Tablica 39. Parametri potencijalne solarne toplane kod Buzina

Površina zemljišta Z	[m <sup>2</sup> ]	3.220.000
Površina toplinskog spremnika A <sub>s</sub>	[m <sup>2</sup> ]	267.582,8
Korisna površina kolektora A <sub>c</sub>	[m <sup>2</sup> ]	869.772,65
Godišnja proizvodnja topline Q	[GWh]	635,25

Ova površina bi eventualno mogla biti alternativno solarnoj toplani južno od Velike Gorice – prednost je što bi za lokaciju kod Buzina konekcijski toplovodi do ostatka CTS-a u Zagrebu bili znatno kraći, samim time bi investicija za tolovodnu mrežu bila manja.

Međutim na ovoj lokaciji je zemljište relativno skupo zbog blizine gradu Zagrebu i potencijalnog produženja Sarajevske ceste. Također je maksimalni kapacitet manji nego za toplanu južno od Velike Gorice za 81,11 GWh

### Savski nasip

Tok rijeke Save koji prolazi kroz Zagreb je duljine 27 km. Ukoliko bi na nasipima sa svake strane postavili solarne kolektore kroz 30 m širine dobili bismo zemljište površine 1,62 km<sup>2</sup>.

Potencijalna proizvodnja toplinske energije na navedenom području bi iznosila 114,26 GWh godišnje.

Problem ovog područja je blizina rijeke Save i vodozaštitnog područja, kao i podzemne vode u slučaju izgradnje toplinskog spremnika. Također bi bilo zahtjevno osiguravati toplanu koja bi se protezala cijelom duljinom rijeke Save u Zagrebu.

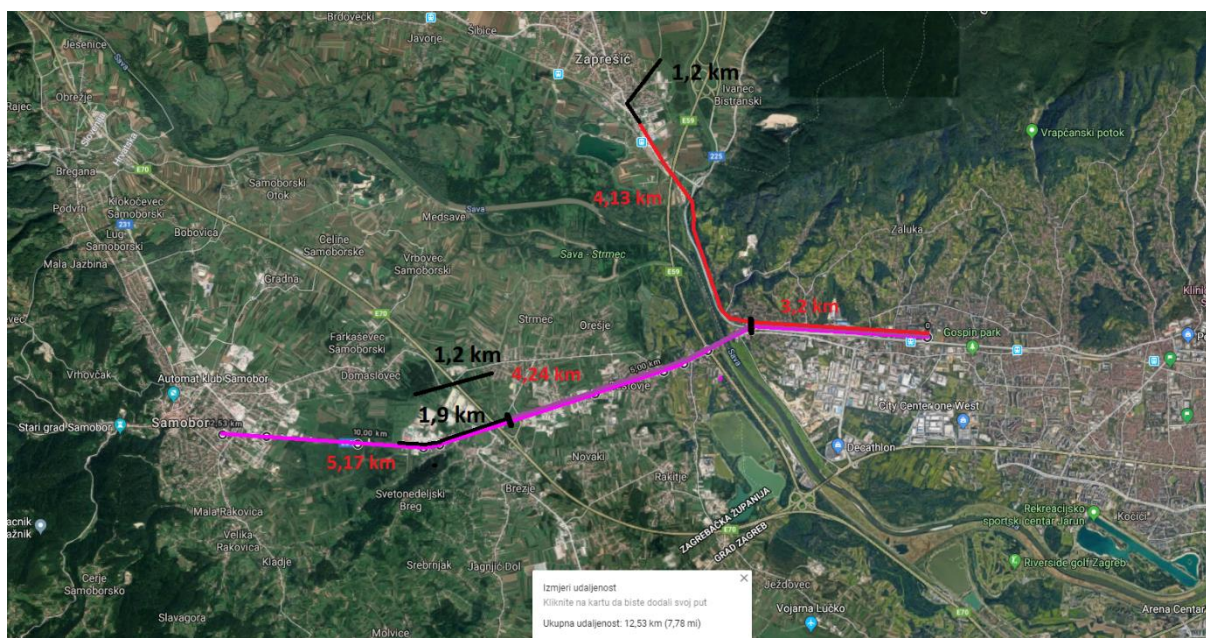
Područje uz rijeku može biti bolje iskorišteno za izgradnju društvenih i turističkih sadržaja, te bi solarni kolektori ograničili pristup rijeci Savi.

## 10.2. Toplovodna mreža

Za povezivanje svih potencijalnih područja CTS-a, te povezivanje predloženih solarnih toplana je potrebno dizajnirati nove toplovođe. Toplovođe će pratiti iste rute kao u scenariju 1, uz eventualno potrebna produženja i različite promjere.

### a) Zapadna grana

Zapadna grana bi povezivala Solarne toplane Sveta Nedelja i Zaprešić, zatim gradove Samobor, Sv. Nedelju i okolna mjesta, Zaprešić i ostatak CTS-a.



Slika 80. Zapadna grana – Scenarij 2 [25]

Zapadna grana bi pratila istu rutu kao u prvom scenariju, uz dodatak voda koji bi povezoao toplanu u Zaprešiću i dodatnog voda koji bi povezivao toplovodnu mrežu grada Sv. Nedelja sa toplanom u Sv. Nedelji. Detalji svih etapa su dani u sljedećoj tablici:

Tablica 40. Parametri toplovoda zapadne grane – scenarij 2

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Maksimalna toplinska snaga $P_{max}$
	[km]	[TJ/god.]	[MW]

Gajnice - čvorište Podsused	3,2	1898,77	185,25
Podsused - Sv. Nedjelja	5,44	282,77	26,12
Sv. Nedjelja - Samobor	3,97	229,88	24,36
Podsused - Zaprešić	5,33	1616,00	159,13
Sv. Nedjelja vod	1,2	127,82	13,12

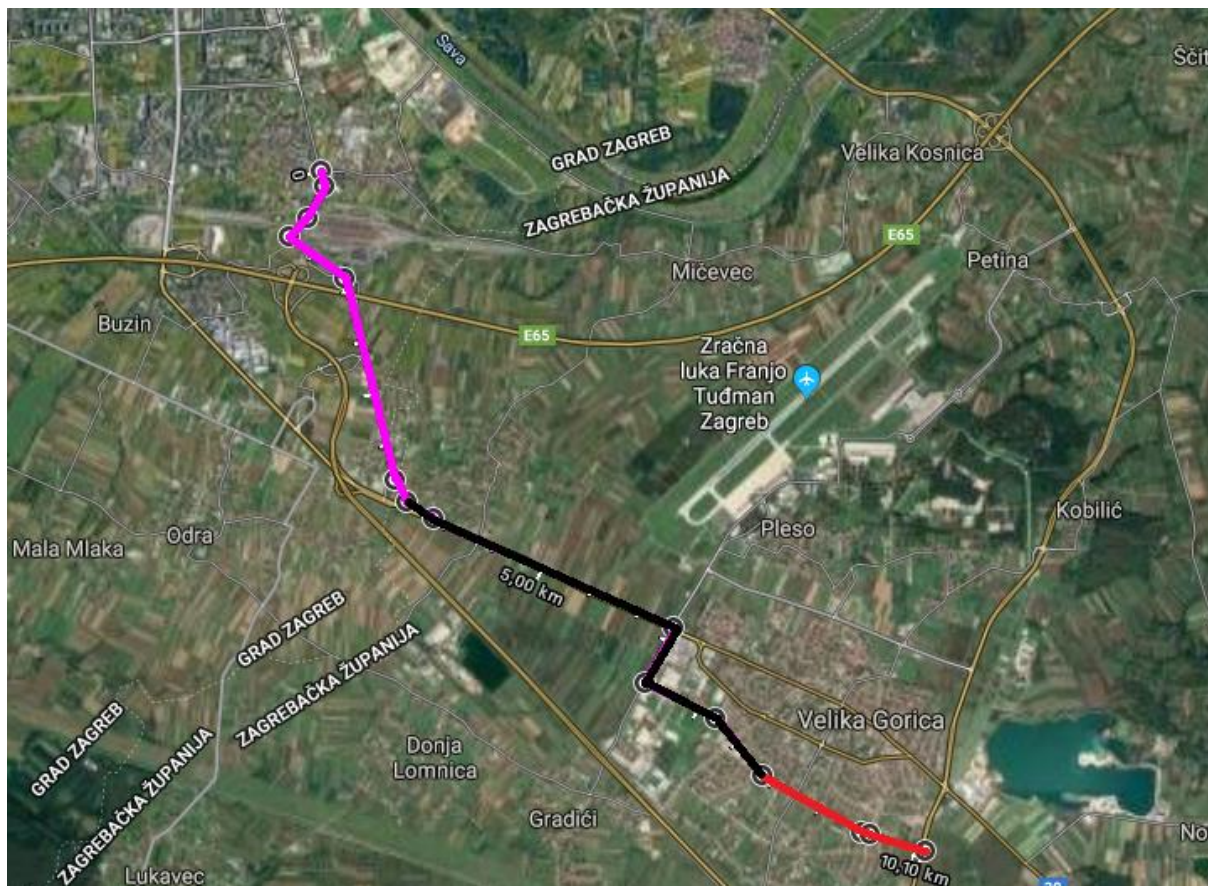
Potrebni promjeri cjevovoda su računati kako bi zadovoljili prijenos maksimalne toplinske snage prema jednadžbi 14.

**Tablica 41. Parametri toplovoda s troškovima izgradnje - Zapad**

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Gajnice - čvorište Podsused	0,686	800	1594	5.100.800,00
Podsused - Sv. Nedjelja	0,258	300	731,5	3.979.360,00
Sv. Nedjelja - Samobor	0,249	300	731,5	2.904.055,00
Podsused - Zaprešić	0,636	800	1594	8.496.020,00
Sv. Nedjelja vod	0,183	200	559	670.800,00

## b) Jugoistočna grana

Jugoistočna grana bi spajala solarnu toplanu u Velikoj Gorici, toplovodnu mrežu u VG i ostatak CTS-a.



Slika 81. Jugoistočna grana – scenarij 2 [25]

Ova grana bi se sastojala od 3 etape: Od Zagreba do Velike Mlake, od Velike Mlake do Velike Gorice i na kraju etape koja bi vodila do predložene solarne toplane. Toplinski tokovi kroz te 3 etape su sličnih iznosi, stoga bi cijeli toplovod u punom profilu bio jednakog promjera – 1 m.

Tablica 42. Parametri toplovoda jugoistočne grane – scenarij 2

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Maksimalna toplinska snaga $P_{max}$
	[km]	[TJ/god.]	[MW]
Jakuševac – Velika Mlaka	3,5	2654,14	260,57
Velika Mlaka – Velika Gorica	4,5	2772,97	273,17

Velika Gorica - toplana	2,1	3103,64	308,21
-------------------------	-----	---------	--------

Promjeri grana su određeni tako da omogućе maksimalni toplinski tok za toplovođe. Za proračun potrebnog promjera je korištena jednadžba 14.

**Tablica 43. Parametri toplovoda jugoistočne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2**

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Jakuševac – Velika Mlaka	0,814	1000	1939	6.786.500,00
Velika Mlaka – Velika Gorica	0,833	1000	1939	8.725.500,00
Velika Gorica - toplana	0,885	1000	1939	4.071.900,00

### c) Istočna grana

Istočna grana bi povezala postojeću toplinsku mrežu prvo sa solarnom toplanom Donja Dubrava predloženom u prvom dijelu zadatka. Zatim sa Solarnom toplanom u Sesevskom Kraljevcu, centrom potražnje u Sesevskom Kraljevcu i na kraju s Dugim Selom.





Slika 82. Istočna grana – scenarij 2 [25]

Tablica 44. Parametri toplovoda istočne grane – scenarij 2

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Maksimalna toplinska snaga $P_{max}$
	[km]	[TJ/god.]	[MW]
Zagreb – Toplana Dubrava	5,5	1446,32	143,63
Toplana Dubrava – toplana Sesevski Kraljevec	6,3	509,40	48,96
Sesevski Kraljevec (potrošnja)	2	243,43	25,80
S.Kraljevec – Dugo Selo	4,4	111,56	11,83

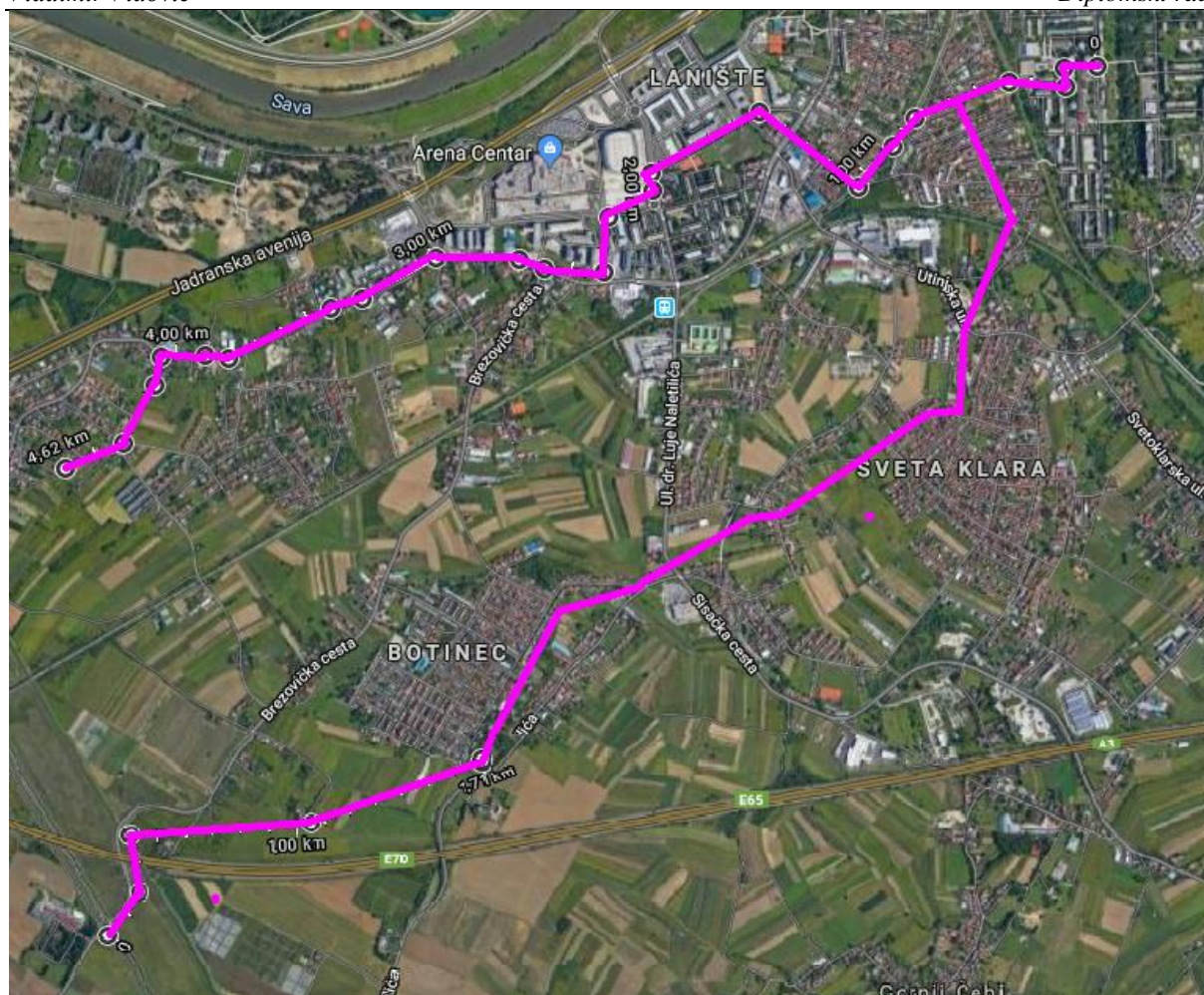
Tablica 45. Parametri toplovoda istočne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda
	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]

Zagreb – Toplana Dubrava	0,604	800	1594	8.767.000,00
Toplana Dubrava – toplana S. Kraljevec	0,353	400	904	5.695.200,00
Sesvetski Kraljevec (potrošnja)	0,256	300	731,5	1.463.000,00
S.Kraljevec – Dugo Selo	0,173	200	559	2.459.600,00

**d) Jugozapadna grana**

Jugozapadna grana bi izgledala kao u scenariju 1, uz dodatak spojnog toplovoda dužine 1 km.



Slika 83. Jugozapadna grana – scenarij 2 [25]

Tablica 46. Parametri toplovoda jugozapadne grane – scenarij 2

Etapa	Duljina toplovoda	Godišnji kapacitet toplovoda	Linearna gustoća toplinskog toka	Maksimalna toplinska snaga
	[km]	[TJ/god.]	[TJ/km]	[MW]
Lanište	4,62	278,89	60,37	29,56
Botinec - Brezovica	8,24	1718,72	-	170,68

Tablica 47. Parametri toplovoda jugozapadne grane s troškovima izgradnje – scenarij 2

Etapa	Potrebni minimalni promjer $d_t$	Odabrani promjer toplovoda DN	Specifična cijena toplovoda	Trošak izgradnje toplovoda

	[m]	[mm]	[EUR/m]	[EUR]
Lanište	0,199	200	582,8	2.692.536,00
Botinec - Brezovica	0,659	800	1594	6.758.560,00

Sjeverni toplovod koji bi povezivao Lanište i Blato bi bio isti kao u scenariju 1, dok bi južni toplovod koji bi povezivao Svetu Klaru, Botinec i solarnu toplanu u Brezovici bilo potrebno dimenzionirati prema maksimalnoj potrebnoj snazi koja bi se prenijela do ostatka CTS-a. Za određivanje promjera južnog toplovoda je korištena jednadžba 14.

### 10.3. Ekonomska analiza

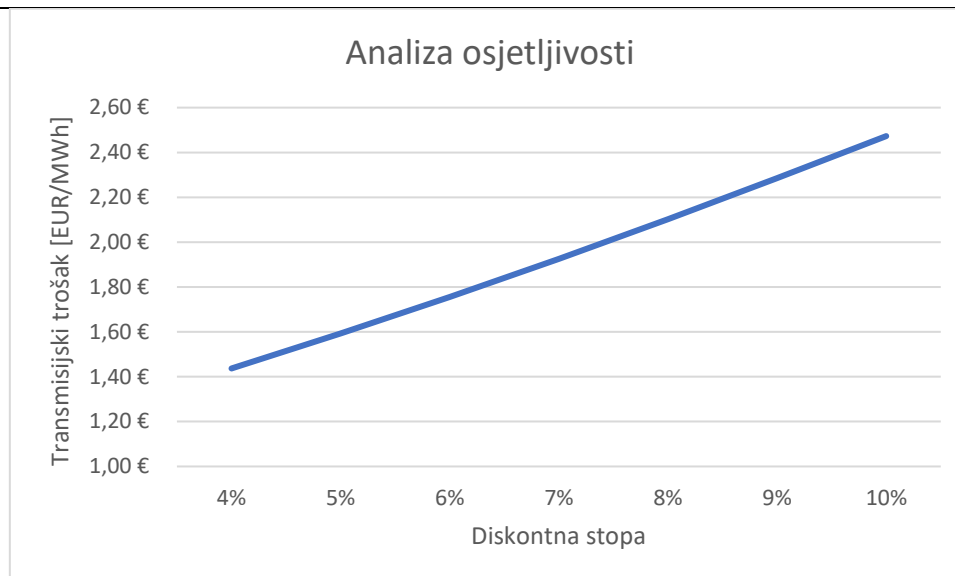
U scenariju 2 je potrebno izgraditi više kilometara toplovodnih cijevi, te one moraju imati veći promjer kako bi prenijele toplinu u ostatak CTS-a. Postojeća toplovodna mreža bi također morala biti obnovljena i prilagođena većim toplinskim tokovima. Trošak svih predloženih toplovoda bi iznosio 65.878.295,00 EUR – manje nego za scenarij 1.

**Tablica 48. Troškovi proširenja toplinske mreže**

Grana	Potražnja topline - CTS	Cijena izgradnje	Trošak transmisije topline po MWh
	[GWh/god.]	[EUR]	[EUR/MWh]
<b>Prošireni CTS</b>	<b>2934,7725</b>	<b>65.878.295,00</b>	<b>1,93</b>

Uprosječeni trošak topline je određen prema jednadžbi 11.

Na slici 84. je prikazana analiza osjetljivosti koja opisuje ovisnost transmisijskog troška o diskontnoj stopi.



**Slika 84. Ovisnost transmisijskih troškova o diskontnoj stopi**

Trošak proizvodnje topline u solarnim toplanima se pretpostavlja kao i u prvom dijelu zadatka, tj. On iznosi 44,66 EUR/MWh, dok bi ukupna investicija za toplane iznosila 1.545.801.853,62 EUR.

#### 10.4. Osvrt na scenarij 2

U ovakvom scenariju, sa više toplana raspoređenih na više strana, osigurava se sigurnija opskrbu toplinskom energijom, te je opskrba ravnomjernija u svim dijelovima grada. Uz to, čak je i izgradnja transmisijskih toplovoda jeftinija nego za scenarij 1 sa jednom velikom toplanom. Ove toplane, iako su manje nego u scenariju 1, zauzimaju izuzetno velike površine, te bi i dalje bilo zahtjevno izgraditi ih s takvim kapacitetima.

Kao u scenariju 1, nisu uzeti u obzir troškovi za izgradnju potrebne distribucijske mreže za manje ogranke zbog kompleksnosti proračuna i nedostatka podataka. Također trenutno postojeću mrežu bi bilo potrebno adaptirati na veće kapacitete na mjestima gdje bi došlo do znatnog porasta toplinskog toka, kao npr. u dijelovima na koje bi se spojili predloženi novi dijelovi CTS-a.

## 11. ZAKLJUČAK

U radu je su dizajnirane solarne toplane koje bi zadovoljavale 761,5 GWh toplinskih potreba centraliziranog toplinskog sustava Zagreb, što je više od 40% potreba. Pomoću alata EnergyPLAN je simuliran rad takvih solarnih toplana, te je prikazano koliki toplinski spremnik je potreban za skladištenje sve energije proizvedene u solarnim toplanama. U svijetu već postoje ovakve toplane, iako znatno manjeg kapaciteta – trenutno najveća solarna toplana u Silkeborgu proizvodi 80 GWh godišnje, što je dovoljno za približno 5% potreba zagrebačkog CTS-a.

Za izgradnju toplane ovakvog kapaciteta glavni problem predstavljaju zahtjevi za golemom površinom. Zatim, teško je procijeniti isplativost jer trenutna cijena toplinske energije u Hrvatskoj ne pokriva troškove proizvodnje toplinske energije u toplanama. Specifična godišnja proizvodnja toplina bi na području Zagreba bila znatno veća nego u sjevernijim dijelovima Europe te bi iznosila  $q = 730,36 \text{ kWh/m}^2$ . Cijena topline iz solarnih toplana bi bila **44,66 EUR/MWh**. Napravljena je korelacija sa troškovima proizvodnje topline iz plinskih CHP postrojenja, ali ti troškovi se temelje na pretpostavljenoj cijeni električne energije koja je promjenjiva. Dodatni problem su poticaji koje CHP postrojenja dobivaju. Potvrđeno je da u bi na području Zagreba solarne toplane bile konkurentne trenutno korištenim plinskim kogeneracijama za proizvodnju topline. Za solarne toplane, glavnina troška otpada na solarne kolektore. Također cijena spremnika je vrlo visoka. Prednost kod izgradnje ovako velikih solarnih toplana, cijena spremnika po jedinici volumena je niža nego za slučaj s manjim spremnicima. U slučaju pokrivanja isključivo potreba za potrošnu toplu vodu, veliki sezonski toplinski spremnici uopće ne bi bili potrebni, čime bi cijena toplane bila znatno niža.

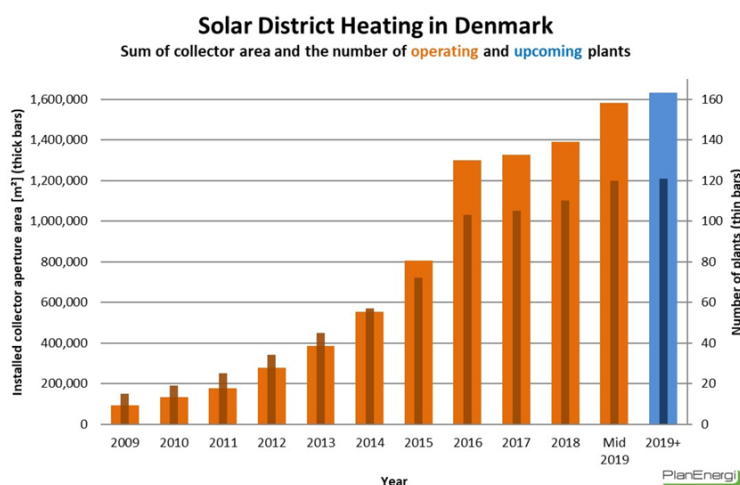
U drugom dijelu zadatka je razmatrano širenje CTS-a na ostala područja Urbane aglomeracije Zagreb i potpuno pokrivanje svih potreba iz solarne toplane. Za procjenu toplinskih potreba je korišten alat *Hotmaps* koji se pokazao relativno precizan u procjeni toplinskih potreba. Nasuprot tome, procjena potencijala za proizvodnju toplinske energije u alatu *Hotmapsu* je vrlo konzervativna, te procjenjuje oko 38% manje potencijala nego proračun korišten u ovom radu. Utvrđeno je da je za gradove Zaprešić, Samobor i Sveta Nedjelja na zapadu, te Dugo Selo na istoku cijena povezivanja na CTS vrlo visoka, te iznosi preko 7 EUR/MWh proizvedene topline. Nasuprot tome, dijelovi Zagreba koji nisu pokriveni CTS-om bi imali relativno niske troškove povezivanja na CTS.

U prvom scenariju jednom velikom solarnom toplanom, postojali bi problemi sa opskrbom krajnjih potrošača u najudaljenijim zonama CTS-a, te bi za nju bio potreban izuzetno skup

transmisijski toplovod kako bi se toplina prenijela u ostatak CTS-a. Također sama izvedba takve toplane je zahtjevna zbog imovinsko pravnih odnosa i naselja koja bi bila *otoci* unutar solarne toplane. U drugom scenariju sa više solarnih toplana, ne samo da bi opskrba bila kvalitetnija, nego bi i cijena toplovodne mreže bila jeftinija. U oba scenarija, navedene toplane zauzimaju ogromne površine i veće su od bilo koje solarne toplane koja se trenutno koristi. Stoga bi izvedba takvih solarnih toplana bila izrazito zahtjevna.

Solarne toplane sigurno imaju mjesto u hrvatsko energetsom sustavu s obzirom na relativno visoku solarnu iradijaciju te i dalje velike potrebe za toplinskom energijom. Bilo bi zanimljivo vidjeti analizu za neke južnije gradove koji imaju vlastiti CTS i znatnu potrošnju toplinske energije.

Izgradnja solarnih toplana nije građevinski zahtjevna, te je lako brzo povećati kapacitete – primjer je trenutno najveća svjetska solarna toplana u Silkeborgu, koja je izgrađena u samo 7 mjeseci [9]. Također Danska je u 2009. godini imala samo 90.000 m<sup>2</sup> solarnih toplana – 10 godina kasnije, u 2019. godini, ukupna površina solarnih toplana iznosi 1.600.000 m<sup>2</sup>! Ta usporedba nam govori da je izgradnja solarnih toplana iz prvog dijela zadatka, površine 1.042.656 m<sup>2</sup>, moguća u periodu od 10 godina [39].



**Slika 85. Kapaciteti solarnih toplana u Danskoj kroz zadnjih 10 godina [39]**

**LITERATURA**

- [1] HERA: Godišnje izvješće za 2017. godinu, Zagreb, 2018.
- [2] EnergyPLAN, <https://www.energyplan.eu/>, studeni 2019.
- [3] Hotmaps, <https://www.hotmaps.hevs.ch/map>, studeni 2019.
- [4] Carlo Vale: Tehno-ekonomska analiza solarne toplane sa sezonskim skladištenjem toplinske energije u Zaprešiću, 2018.
- [5] Energy Education, [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar\\_collector](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_collector), listopad 2019.
- [6] Energinet.dk, Klaus Ellehauge, Thomas Engberg Pedersen: Solar Heat Storages in District Heating Networks, srpanj 2007.
- [7] Ing-grad, <https://www.ing-grad.hr/hr/reference/popis-projekata/90-projekti/energetika-i-infrastruktura/energetika/573-hep-akumulator-topline-te-to-zagreb>, listopad 2019.
- [8] GSTEC: Denmark: 37 MW Field with 203,000 m<sup>3</sup> Storage Underway, <https://www.solarthermalworld.org/news/denmark-37-mw-field-203000-m3-storage-underway>, listopad 2019.
- [9] ARCON-SUNMARK, <http://arcon-sunmark.com/>, rujan 2019.
- [10] Sun&Wind Energy, <https://www.sunwindenergy.com/solar-thermal/arcon-sunmark-merge>, listopad 2019.
- [11] State of Green, <https://stateofgreen.com/en/partners/ramboll/solutions/large-scale-solar-heating-and-seasonal-heat-storage-pit-in-gram/>, listopad 2019.
- [12] Ramboll, <https://ramboll.com/media/rgr/two-ramboll-projects-among-the-eight-most-efficient-district-heating-and-cooling-systems-in-the-eu>, listopad 2019.
- [13] Goran Krajačić: BIG Solar Graz, KeepWarmEurope, [http://www.keepwarmeurope.eu/fileadmin/user\\_upload/Learning\\_Centre/Croatia/Big\\_Solar\\_district\\_heating\\_system\\_Graz.pdf](http://www.keepwarmeurope.eu/fileadmin/user_upload/Learning_Centre/Croatia/Big_Solar_district_heating_system_Graz.pdf)
- [14] TEHNOSTAN: Solarna kotlovnica puštena u rad, <https://www.tehnostan-vukovar.hr/novosti/solarna-kotlovnica-pustena-u-rad/>, studeni 2019.
- [15] EIHP: Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016. – 2030., 2015.
- [16] HEP, <http://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/termoelektrane-toplane/el-to-zagreb/1567>, listopad 2019.
- [17] Energetski institut Hrvoje Požar: Analiza sektora toplinarstva i iskorištavanja potencijala geotermalnih izvora na području Urbane aglomeracije Zagreb, 2017.



- [18] EIHP: Pregledna karta – vrelovodna mreža Zagreb
- [19] Borna Šeb: Završni zadatak – Toplinska mreža grada Zagreba, 2015.
- [20] Rp5.am, [http://rp5.am/Weather\\_in\\_the\\_world](http://rp5.am/Weather_in_the_world), studeni 2019.
- [21] Global Solar Atlas, <https://globalsolaratlas.info/map>, studeni 2019.
- [22] Per A. Sorensen, PlanEnergi: SDH-Solar district heating guidelines, 2012
- [23] Carlo Vale: Diplomski rad – Tehno-ekonomska analiza solarne toplane sa sezonskim skladištenjem toplinske energije u Zaprešiću, 2018.
- [24] Quora, <https://www.quora.com/In-a-solar-PV-power-plant-What-should-be-the-distance-between-two-successive-arrays>, studeni 2019.
- [25] Google Maps, <https://www.google.com/maps>, studeni 2019.
- [26] Energinet.dk, Technology data for energy plants, no. May 2012., [https://energiatalgud.ee/img\\_auth.php/4/42/Energinet.dk.\\_Technology\\_Data\\_for\\_Energy\\_Plants.\\_2012.pdf](https://energiatalgud.ee/img_auth.php/4/42/Energinet.dk._Technology_Data_for_Energy_Plants._2012.pdf), studeni 2019.
- [27] Eurostat: Gas prices, <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00118&language=en>, studeni 2019.
- [28] European commission: EU ETS, [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en), studeni 2019.
- [29] Market Insider: EU emission allowances, <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>, studeni 2019.
- [30] Volker-quaschnig: Specific emissions from fuels, [https://www.volker-quaschnig.de/index\\_e.php](https://www.volker-quaschnig.de/index_e.php), studeni 2019.
- [31] IEA: Energy Technology Systems Analysis Programme – Combined Heat and Power, [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E04-CHP-GS-gct\\_ADfinal.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E04-CHP-GS-gct_ADfinal.pdf), 2010
- [32] CROPEX, <https://www.cropex.hr/hr/>, studeni 2019.
- [33] Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj grada: Urbana aglomeracija Zagreb, 2016
- [34] HERA: Godišnje izvješće za 2018. godinu, Zagreb, 2019.
- [35] S. Fredriksen, S. Werner: District Heating and Cooling, 2013
- [36] Reiter, P. et al; BIG Solar Graz: Solar district heating in Graz – 500.000 m<sup>2</sup> for 20% solar fraction
- [37] SDH: Big Solar Graz – reaching next milestones, studeni 2019.
- [38] IEA: Energy Technology Systems Analysis Programme – District Heating, [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E16\\_DistrHeat\\_EA\\_Final\\_Jan2013\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E16_DistrHeat_EA_Final_Jan2013_GSOK.pdf), 2013

---

[39] PlanEnergi: 1 GW Solar District Heating in Denmark,

<http://planenergi.eu/activities/district-heating/solar-district-heating/1-gw-sdh-in-dk/>,

studeni 2019

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc