

Metoda određivanja radijusa ekonomske isplativosti integracije urbane otpadne topline u centralizirane toplinske sustave nove generacije

Župan, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:038683>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Župan

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec, dipl. ing.

Student:

Iva Župan

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru na predloženoj temi i velikoj pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada. Veliko hvala asistentu Josipu Miškiću, mag.ing. mech, na stručnom vodstvu, korisnim savjetima i pruženoj potpori tijekom pisanja rada. Hvala mu na utrošenom vremenu i neizmjernom strpljenju.

Hvala mami, tati, sestrama Ani i Josipi i bratu Marku što su uvijek vjerovali u mene davajući veliku podršku svakog dana.

Veliko hvala svim mojim sadašnjim i bivšim cimericama, Martini, Dajani, Anamariji što su bile uz mene u svakom trenutku mirno slušajući sve FSB-ovske muke. Bez njih ništa ovo ne bi bilo moguće.

Jedino veliko hvala Ivoni, Marti i Luci za svaku poruku ohrabrenja, pomoću i podršku.

Iva Župan



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Župan** JMBAG: 0035209677

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Metoda određivanja radijusa ekonomske isplativosti integracije urbane otpadne topline u centralizirane toplinske sustave nove generacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Method for determining the radius of economic feasibility of urban waste heat integration into the new generation district heating systems**

Opis zadatka:

Centralizirani toplinski sustavi nove generacije odlikuju se nižim temperaturama rada te se trenutno primjenjuju na ograničenom području. Oni integriraju različite urbane izvore topline poput sustava hlađenja samoposluga, trgovačkih centara, trafostanica, podatkovnih centara, podzemnih željeznica, postrojenja za obradu otpadnih voda i sl. Trenutno navedeni sustavi značajan dio otpadne topline predaju u okoliš dok bi se ona mogla iskoristiti u centraliziranim toplinskim sustavima te pokriti dio toplinskih potreba krajnjih korisnika. Izazov prilikom integracije urbanih toplinskih izvora trenutno čine njihova prostorna raspršenost, vremenska dostupnost otpadne topline kroz godinu te prostorna ograničenost integracije u smislu pokrivanja toplinskih potreba krajnjih korisnika.

U sklopu ovog diplomskog rada potrebno je izraditi metodu određivanja radijusa ekonomske isplativosti integracije urbane otpadne topline u centralizirane toplinske sustave nove generacije. U tu svrhu, kandidat će provesti sljedeće aktivnosti:

1. Napraviti pregled dostupne literature vezane uz urbane toplinske izvore i mogućnosti integracije otpadne topline u centralizirane toplinske sustave;
2. Mapirati urbane toplinske izvore te toplinske potrebe odabrane studije slučaja koristeći GIS (geografski informacijski sustav) alat;
3. Razviti model integracije urbanih toplinskih izvora u postojeće centralizirane toplinske sustave koji je ovisan o različitim rubnim uvjetima: prostornim i vremenskim distribucijama toplinske potražnje i toplinskih izvora, temperaturnim režimima i specifičnim troškovima integracije;
4. Prikazati rezultate modela na izabranoj studiji slučaja te izraditi analizu osjetljivosti rezultata uzimajući u obzir različite tehnološke i ekonomske rubne uvjete.

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

Zadatak zadan:

2. ožujka 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec

Datum predaje rada:

4. svibnja 2023.

Predvideni datumi obrane:

8. – 12. svibnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. PREGLED LITERATURE.....	4
2.1. Centralizirani toplinski sustavi.....	4
2.1.1. Razvoj kroz povijest	5
2.1.2. Nova generacija CTS-a	6
2.2. Toplinski izvori u CTS - u nove generacije	7
2.2.1. Rashladni sustav samoposluga.....	9
2.2.2. Sustav hlađenja samoposluga i trgovačkog centra.....	11
2.2.3. Sustav hlađenja podatkovnog centra.....	12
2.2.4. Sustav hlađenja transformatorskih stanica.....	14
3. METODA	16
3.1. Prostorna analiza	16
3.2. Termodinamički model urbanih toplinskih izvora.....	18
3.2.1. Model rashladnog sustava samoposluga	18
3.2.2. Model rashladnog sustava trgovačkog centra	21
3.2.3. Model rashladnog sustava data centra	22
3.2.4. Model rashladnog sustava trafostanica	24
3.3. Model centraliziranog toplinskog sustava.....	27
3.3.1. Model toplinske potražnje.....	28
3.3.2. Model toplinskih gubitaka te gubitaka tlaka	29
3.3.3. Koeficijent učinkovitosti dizalice topline	30
3.3.4. Sezonski koeficijent učinkovitosti CTS-a.....	32
3.4. Ekonomska, okolišna i energetska analiza.....	32
4. STUDIJA SLUČAJA: ZAGREB	34
4.1. Ulazni podaci	34
4.2. Prostorni podaci	36
4.3. Dimenzioniranje sustava i cijene	36
5. REZULTATI	39
5.1. Termodinamički modeli.....	39
5.1.1. Rashladni sustav samoposluga.....	39
5.1.2. Sustav hlađenja samoposluga.....	40
5.1.3. Sustav hlađenja trgovačkog centra.....	41
5.1.4. Sustav hlađenja podatkovnog centra.....	42
5.1.5. Iznos otpadne topline hlađenja trafostanica	43

5.2. Scenarijska analiza	45
5.2.1. Scenariji X	45
5.2.2. Scenariji Y	52
5.2.3. Scenariji Z.....	59
6. ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	69
PRILOZI.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1: Centralizirani toplinski sustav.....	4
Slika 2: Razvoj CTS - a.....	5
Slika 3: Shematski prikaz mreže pete generacije [4]	6
Slika 4: Shema iskorištavanja topline iz urbanih toplinskih izvora [6].....	8
Slika 5: CO ₂ sustav hlađenja samoposluga [19].....	10
Slika 6: Klima komora trgovačkog centra [42].....	12
Slika 7: Iskorištavanje otpadne topline data centra [14]	13
Slika 8. Primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora pomoću izmjenjivača topline ulje – voda i dizalice topline.....	15
Slika 9: Shematski prikaz metode	16
Slika 10: Shematski prikaz prostorne analize	17
Slika 11: Prikaz sučelja u QGIS-u.....	17
Slika 12: Shema termodinamičkog model urbanih toplinskih izvora	18
Slika 13: CO ₂ sustav povrata topline [19].....	18
Slika 14: Prikaz relativnih opterećenja prosječnog supermarketa u ovisnosti o temperaturi okoliša [21].....	21
Slika 15: Shematski prikaz ljevokretnog procesa	22
Slika 16: Načelna shema prijenosa topline na granici sustava klima komore i radne tvari	22
Slika 17: Hlađenje data centra.....	24
Slika 18: Načelna shema temperaturne stratifikacije u transformatoru te prikaz ključnih temperaturnih točaka [18]	26
Slika 19: Shema modela centraliziranog toplinskog sustava	27
Slika 20: Shematski prikaz rada dizalice topline [27].....	31
Slika 21: Temperatura zraka u Zagrebu [28]	34
Slika 22: Ukupne toplinske potrebe	34
Slika 23: Temperatura polaza i povrata LTDH mreže [30]	35
Slika 24: Temperaurni režim nisko-temperaturnog CTS-a.....	35
Slika 25: Scenariji podjele površine grada Zagreba.....	36
Slika 26: Cijena električne energije [40].....	37
Slika 27: Količina otpadne topline – primjer rashladnog sustava samoposluge	39
Slika 28: Temperatura polaza otpadne topline rashladnog sustava samoposluga.....	40

Slika 29: Količina otpadne topline – primjer sustava hlađenja samoposluge	40
Slika 30: Temperatura polaza otpadne topline hlađenja samoposluga	41
Slika 31: Količina otpadne topline – primjer sustava hlađenja trgovačkog centra	41
Slika 32: Temperatura polaza otpadne topline hlađenja trgovačkog centra.....	42
Slika 33: Količina otpadne topline – primjer hlađenja data centra	42
Slika 34: Temperatura polaza hlađenja podatkovnog centra	43
Slika 35. Količina otpadne topline – primjer hlađenja trafostanica	43
Slika 36: Temperatura polaza hlađenja trafostanica	44
Slika 37: Položaj izvora otpadne topline - 625 ha.....	45
Slika 38: Toplinske potrebe grada Zagreba – 625 ha.....	46
Slika 39: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 625 ha	46
Slika 40: Postotak grijanog područja – 625 ha.....	47
Slika 41: LCOH – LTDH – 625 ha	48
Slika 42: LCOH – plin – stambene zgrade – 625 ha.....	48
Slika 43: LCOH- plin – kućanstva – 625 ha	49
Slika 44: LCOH – CTS – plin – 625 ha	49
Slika 45: LCOH – optimalni - 625 ha	50
Slika 46: LCOH - optimalni odabir tehnologije – 625 ha.....	50
Slika 47: Faktor primarne energije - 625 ha.....	51
Slika 48: Faktor emisije ugljika - 625 ha	51
Slika 49: Izvori otpadne topline - 156 ha	52
Slika 50: Toplinske potrebe grada Zagreba – 156 ha.....	53
Slika 51: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 156 ha	53
Slika 52: Postotak grijanog područja – 156 ha.....	54
Slika 53: LCOH – LTDH – 156 ha	55
Slika 54: LCOH - plin- stambene zgrade – 156 ha	55
Slika 55: LCOH - plin kućanstva – 156 ha	56
Slika 56: LCOH CTS – plin – 156 ha	56
Slika 57: LCOH - optimalni – 156 ha	57
Slika 58: LCOH - optimalni odabir tehnologije – 156 ha.....	58
Slika 59: Faktor primarne energije – 156 ha.....	58
Slika 60: Faktor emisije ugljika - 156 ha	59
Slika 61: Položaj izvora otpadne topline - 100 ha.....	59

Slika 62: Toplinske potrebe grada Zagreba – 100 ha.....	60
Slika 63: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 100 ha	61
Slika 64: Postotak grijanog područja – 100 ha.....	61
Slika 65: LCOH – LTDH- 100 ha.....	62
Slika 66: LCOH – plin - stambene zgrade – 100 ha.....	63
Slika 67: LCOH – plin – kućanstva – 100 ha.....	63
Slika 68: LCOH – plin – CTS – 100 ha	64
Slika 69: LCOH – optimalni – 100 ha.....	64
Slika 70: Optimalni odabir tehnologije – 100 ha	65
Slika 71: Faktor primarne energije – 100 ha	66
Slika 72: Faktor emisije ugljika – 100 ha.....	66

POPIS TABLICA

Tablica 1: Ukupna godišnja isporučena toplinska energija na ulazu u CTS u 2019. godini[22]	3
Tablica 2: Oznake načina hlađenja.....	14
Tablica 3. Podjela Grada Zagreba na distrikte	36
Tablica 4. Investicijski troškovi komponenti modela	37
Tablica 5: Troškovi rada i održavanja komponenti modela	37

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
q_{DHW}	kWh/m ²	specifična potrošnja potrošne tople vode
$A_{district}$	m ²	površina područja
A_{zgrade}	m ²	površina zgrade
ε	-	omjer površina
$Q_{tot,DHW}$	MWh/a	ukupna potrošnja potrošne tople vode
S_H	-	grijano područje
q_s	kWh/m ² a	specifične godišnje toplinske potrebe
q_{sH}	kWh/m ² a	specifične toplinske potrebe za grijanje prostora
Q_{tot}	MWh/a	ukupne toplinske potrebe
$Q_{tot,SH}$	MWh/a	toplinske potrebe za grijanje prostora
w	-	efektivna širina
q_l	MWh/m	linearna gustoća topline
L	m	duljina mreže
d_a	m	prosječni promjer cijevi
Q_{gubici}	MWh/a	ukupni gubici mreže
T_{polaza}	°C	temperatura polaza mreže
$T_{povrata}$	°C	temperatura povrata mreže
\dot{V}	m ³ /h	volumni protok
$Q_{tot,dos}$	MWh/a	ukupna toplina u mreži
$c_{p,H2O}$	kWh/(kgK)	specifični toplinski kapacitet vode
$\rho_{p,H2O}$	kg/ m ³	gustoća vode
$T_{C,i}$	K	ulazna temperatura isparivača
$T_{C,o}$	K	izlazna temperatura isparivača
ΔT_C	K	razlika temperatura isparivača
$T_{H,i}$	K	ulazna temperatura kondenzatora
$T_{H,o}$	K	izlazna temperatura kondenzatora
ΔT_H	K	razlika temperatura kondenzatora
\overline{T}_H	K	srednja temperatura ponora
\overline{T}_C	K	srednja temperatura izvora

$\overline{\Delta T_H}$	K	srednja temperatura ponora
COP_{Lorenz}	-	Lorenzov koeficijent učinkovitosti
η_{Lorenz}	-	Lorenzova korisnost
$\dot{Q}_{central}$	MW	toplina proizvedena na centralnoj jedinici
\dot{Q}	MW	toplina proizvedena u satu
\dot{W}	MW	struja potrošena u satu
$COP_{seasonal}$	-	sezonski koeficijent učinkovitosti
$LCOH$	€/MWh	nivelirani trošak topline
$CAPEX$	€	kapitalni troškovi
$OPEX$	€	operativni troškovi
CRF	-	faktor povrata kapitala
I	€	investicija
i	%	diskontna stopa

SAŽETAK

Centralizirani toplinski sustavi važan su dio energetske sustava i njihova je funkcija priprema topline i potrošne tople vode za korisnike na razini države ili grada. Slijedom novih izazova s kojima se mnoge zemlje suočavaju u smanjenju emisije CO₂ i sve veće integracije obnovljivih izvora energije, sustavi grijanja zasigurno će doživjeti promjene vezane uz izvore topline ili distribucijski sustav. Integracija otpadne topline iz gradskih toplinskih izvora jedan je od mogućih načina povećanja udjela obnovljivih izvora energije. Trenutno, sustavi ispuštaju značajan dio otpadne topline u okoliš, a mogla bi se iskoristiti u pokrivaajući dio toplinskih potreba krajnjih korisnika. Stoga je u ovom diplomskom radu analiziran način integracije novih gradskih izvora topline u postojeći centralizirani toplinski sustav. Najprije su utvrđene toplinske potrebe za grijanje i analiziran trenutni centralizirani toplinski sustav. Potom su pomoću programskog paketa QGIS mapirani izvori otpadne topline s naglaskom na supermarket, trgovačke centre, podatkovne centre i trafostanice. Promatrano područje je podijeljeno na različite distrikte kako bi se odredio radijus ekonomske isplativosti. Korištenjem termodinamičkog modela svakog promatranog izvora izračunati su potencijali otpadne topline i temperatura tijekom svakog sata u jednoj godini u programskom paketu Excel. Izračunate količine integrirane su u sustav daljinskog grijanja te je napravljena ekonomska, ekološka i energetska analiza svakog promatranog distrikta.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustavi, urbani toplinski izvori, ekonomska isplativost

SUMMARY

District heating systems are an important part of the energy system and their function is to prepare heat and domestic hot water for users at the state or city level. Following the new challenges that many countries are facing to reduce CO₂ emissions and the increasing integration of renewable energy sources, district heating systems will certainly experience changes related to heat sources or the distribution system. Integration of waste heat from urban heat sources is one of the possible ways to increase the share of renewable energy sources. Currently, the systems release a significant part of waste heat into the environment, while it could be used in DH and cover part of the heat needs of end users. Therefore, in this thesis, the method of integrating new urban heat sources into the existing centralized heat system was analysed. First, the thermal needs for heating were determined and the district heating system was analysed. Then, waste heat sources were mapped using the QGIS software package with an emphasis on supermarkets, shopping centres, data centres, and power substations. The observed area is divided into different districts to determine the radius of the economic feasibility. Using the thermodynamic model of each observed source, the waste heat potentials and temperature were calculated during each hour in one year in the Excel software package. The calculated amounts were integrated into the district heating system and an economic, ecological, and energy analysis of each observed district was carried out.

Key words: district heating system, urban waste heat sources, economic feasibility,

1. UVOD

Globalna promjena klime jedan je od najvećih izazova s kojima se čovječanstvo susreće u posljednje vrijeme. Uzrok sve većih klimatskih promjena su povećane emisije stakleničkih plinova koje su posljedica korištenja fosilnih goriva te neodgovorno i nekontrolirano iskorištavanje prirodnih resursa. Države shvaćaju sve veće probleme te pokušavaju spriječiti globalne promjene donošenjem raznih strategija i planova. Polazište politike Europske Unije na putu prema niskougličnoj budućnosti je smanjenje emisija stakleničkih plinova za 80-95 % do 2050. godine definirano dokumentima "Plan puta za prijelaz na konkurentno niskouglično gospodarstvo do 2050.godine" te "Europski zeleni plan". Europski zeleni plan paket je inicijativa u području politika država članica kojim se želi osigurati zelena tranzicija EU-a, pri čemu je krajnji cilj postići klimatsku neutralnost do 2050. Niskouglična strategija odnosi se na sve sektore gospodarstva i ljudskih aktivnosti, a osobito je vezana za energetiku, industriju, promet, poljoprivredu, šumarstvo i gospodarenje otpadom.

Vlada Republike Hrvatske je u skladu s Uredbom Europskog parlamenta i Vijeća o upravljanju energetsom unijom i djelovanjem u području klime i izmjeni uredaba usvojila "Integrirani nacionalni energetska i klimatski plan" (NEKP) za razdoblje od 2021. do 2030. godine. Ključni ciljevi prikazani u NEKP-u su smanjenje emisija stakleničkih plinova za Republiku Hrvatsku za 2030. godinu, udio obnovljivih izvora energije (OIE) u bruto neposrednoj potrošnji energije i energetska učinkovitost, i to iskazana kao potrošnja primarne energije i neposredna potrošnja energije. Primarna energija je ona uzeta iz prirode bez pretvorbe, bilo da se radi o kemijskom potencijalu fosilnih goriva, drva ili biomase, nuklearnoj energiji, kinetičkoj energiji vjetra, potencijalnoj energiji vodenih tokova ili toplinskoj energiji geotermalnih izvora. Neposredna potrošnja energije obuhvaća potrošnju energije u sektorima promet, industrija i opće potrošnje. Dominantan je sektor opće potrošnje koji obuhvaća potrošnju energije u kućanstvima, uslužnome sektoru, poljoprivredi i graditeljstvu. Ciljevi smanjenja emisija stakleničkih plinova do 2030. godine su:

- u EES sektoru: najmanje za 43 % u odnosu na razinu iz 2005. godine,
- za sektore izvan EES-a: najmanje za 7 % u odnosu na razinu iz 2005. godine.

Smanjenje potrošnje energije mjerama energetske učinkovitosti i veće iskorištavanje OIE ključni su za ostvarenje ciljeva dekarbonizacije te su postavljeni ciljevi do 2030. godine da potrošnja primarne energije u 2030. godini ne smije prijeći 8,23 Mtoe, neposredna potrošnja energije u 2030. godini ne smije prijeći 6,85 Mtoe, a udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije treba zauzimati 39,4 %. Analize pokazuju da grijanje i hlađenje u Hrvatskoj predstavlja 70 % ukupne neposredne potrošnje energije u sektorima kućanstava, usluga i industrije. U sektoru kućanstava udio grijanja i hlađenja u ukupnoj neposrednoj potrošnji energije je čak 80%, u uslugama oko 60%, dok je u industriji oko 75%. Stoga sustavi grijanja i hlađenja imaju izuzetno veliku ulogu u postizanju ciljeva dekarbonizacije i energetske učinkovitosti. Cilj mjera je dekarbonizacija sektora zgradarstva i to kroz smanjenje toplinskih potreba zgrada, poboljšanje energetske učinkovitosti i uporabu OIE. Kroz te programe omogućit će se zamjena individualnih sustava grijanja i hlađenja sustavima koji koriste OIE na razini zgrade, ali i priključenje zgrada na postojeće i nove centralizirane toplinske sustave (CTS). Ukupna isporučena energija iz centralnih toplinskih sustava (CTS) na ulazu u distribucijsku mrežu u Hrvatskoj za 2019. godinu iznosi 1.823,04 GWh. Promatrajući raspodjelu ukupne godišnje isporučene energije prikazane u Tablica 1 vidljivo je da se preko 90 % isporučene energije proizvodi iz prirodnog plina, a samo 6 % iz obnovljivih izvora [22]. Republika Hrvatska danas ima neučinkovite centralne toplinske sustave, projektirane za visoke temperature u distribucijskim mrežama i neučinkovit, još najvećim dijelom neobnovljen stambeni i nestambeni fond. Iznimno je bitno unaprjeđenje CTS-a i to prije svega smanjenjem toplinskih gubitaka u postojećoj distribucijskoj mreži kao i daljnjim razvojem proizvodnih postrojenja postojećih centralnih toplinskih sustava, koji podrazumijeva integraciju obnovljivih izvora energije te smanjivanje potrošnje fosilnih goriva (loživog ulja i prirodnog plina). U razdoblju iza 2030. godine nužno je postepeno smanjivati potrošnju prirodnog plina, što zasigurno nije jednostavni zadatak s obzirom da trenutno ukupna godišnja isporučena energija na ulazu u distribucijsku mrežu centralnih toplinskih sustava proizvedena upravo iz prirodnog plina bilo izgaranjem u kotlovima ili kogeneraciji. Uz klasične izvore za CTS koji su navedeni, sve veću ulogu u modernim CTS-ovima dobivaju i izvori otpadne topline koja se svakako odbacuje u okoliš. Postoje dvije vrste izvora otpadne topline iz industrijskih postrojenja i iz urbanih toplinskih izvora koji se razlikuju s obzirom na temperaturne režime, izvor i područje dostupnosti. Kombinacija industrijskih i urbanih izvora otpadne topline pruža veliki potencijal za doprinos zamjeni grijanja temeljenog na fosilnim gorivima u Europi i globalno. Procjenjuje se da je u 2014. godini iskorišteno oko 331 PJ industrijske topline [23].

Važna činjenica pri korištenju otpadne topline iz postojećih industrijskih postrojenja, raspoloživoj toplinskoj energiji iz urbanih toplinskih izvora kao što su bolnice, supermarketi, trgovački centri, postrojenja za obradu otpadnih voda je da se svi ti potencijalni izvori energije nalaze na maksimalnoj udaljenosti 15 km od centralnog toplinskog sustava. Približno 1,2 EJ (ili 340 TWh) godišnje moguće je povratiti iz podatkovnih centara, metro stanica, zgrada uslužnog sektora i uređaj za pročišćavanje otpadnih voda, što odgovara više od 10 % ukupne energetske potražnje EU-a za grijanje i toplu vodu. Konkretni primjeri projekata diljem Europe postoje i pokazuju da se radi o održivoj opciji, međutim postoji još mnogo prepreka koje treba rješavati. Glavna prednost novijih generacija CTS-a su korištenje nisko temperaturnih izvora topline, toplinskih spremnika te učinkovita distribucijska mreža [23].

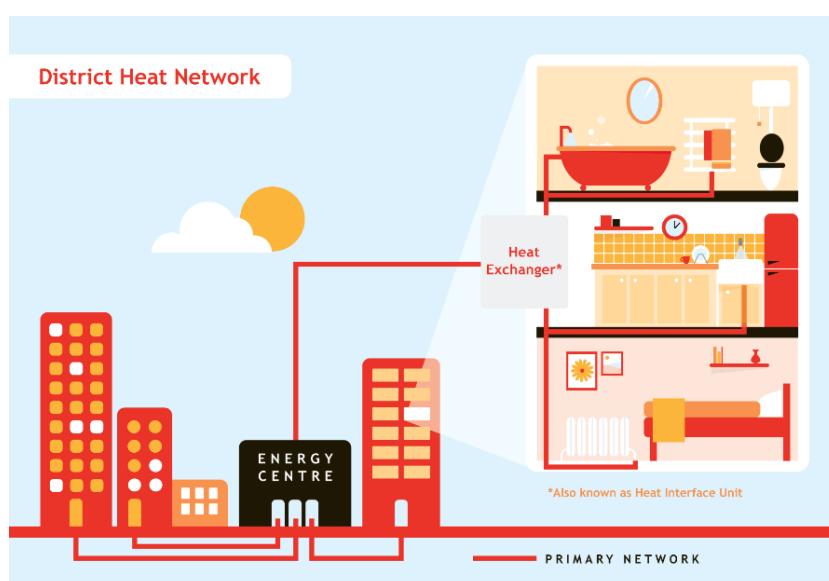
Tablica 1: Ukupna godišnja isporučena toplinska energija na ulazu u CTS u 2019. godini [22]

Energent	Ukupna godišnja isporučena energija na ulazu u CTS, [GWh/a]	Udio [%]
CTS – prirodni plin (kotlovi, kogeneracija)	1677,02	91,99
CTS – kotlovi na lož ulje	34,7	1,90
CTS – kotlovi na biomasu	3,76	0,21
CTS - biomasa - učinkovita kogeneracija	105,51	5,79
CTS – Sunčeva energija	2,05	0,11
Ukupno	1823,04	100

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Centralizirani toplinski sustavi

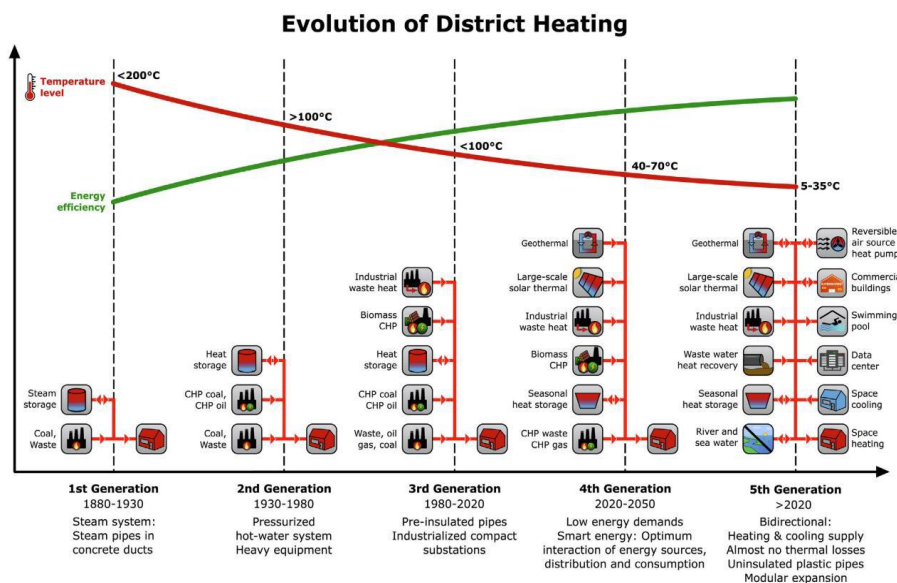
Centralizirani toplinski sustavi ili sustavi daljinskog grijanja su sustavi u kojima se toplinska energija proizvodi u obliku tople vode ili vodene pare na centralnom izvoru nakon čega se distribuira toplovodima prema krajnjim korisnicima. Sastoji se od mreže izoliranih cijevi koje se koriste za dobavu topline u zgrade gdje se ta toplina iskorištava za grijanje vode i grijanje prostora [1]. Prema Slika 1 CTS-e je moguće podijeliti na tri osnovna dijela: izvor topline (proizvodnja postrojenja), distribucijski sustav (mreža izoliranih cijevi) i toplinske podstanice s regulacijskim modulima krajnjih korisnika.



Slika 1: Centralizirani toplinski sustav

Distribucijski sustav se sastoji od dobavnih i povratnih cijevi koje mogu biti podzemne no mogu se ugraditi i iznad zemljine površine. U sustavu mogu biti postavljene jedinice za pohranu topline u slučaju vršnih opterećenja. Najčešće korišten medij za distribuciju topline je voda ili vruća stlačena voda no može se koristiti i para. Prednosti pare su da se može koristiti u industrijskim postrojenjima zbog svoje više temperature. Loša strana korištenja pare kao radnog medija je da su toplinski gubitci znatno veći zbog njene visoke temperature. Dobava topline se postiže pumpama koje stvaraju razliku tlakova između povratnih i dobavnih cijevi [2]. Zgrade s centraliziranim toplinskim sustavima nemaju potrebe za spremnicima goriva, bojlerima i dimnjakom. U zgradi instalacije sustava su većinom u podrumu ili u odvojenim područjima. Samo mali dio instalacija je u stanovima stoga zauzimaju minimalno prostora uz niske troškove održavanja.

2.1.1. Razvoj kroz povijest



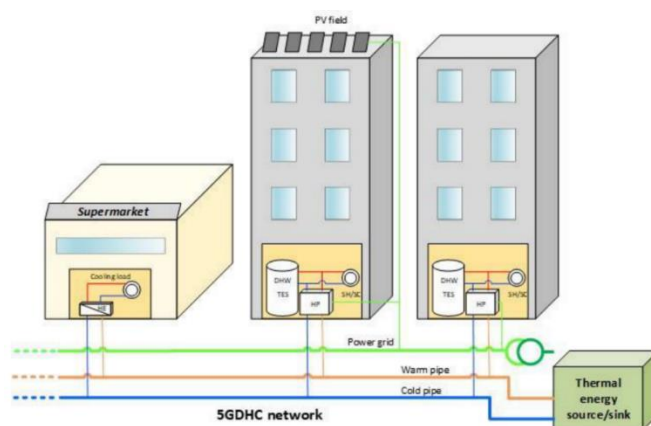
Slika 2: Razvoj CTS - a

Prvi centralizirani toplinski sustav je razvijen u SAD-u 1880-ih. Od tada se tehnologija razvija te se danas razlikuju četiri glavne generacije mreža daljinskog grijanja, a peta generacija mreža je u samom razvoju što je prikazano na Slika 2. Sustavi prve generacije, bili su visoko centralizirani i koristili su paru kao nositelja topline. Visoke temperature pare (do 200°C) i loše izolirane cijevi rezultirale su visokim gubicima energije tijekom transporta što je dovelo do razvoja CTS-a na maloj lokalnoj razini. Sustavi druge generacije (izgrađene 1930-ih) još uvijek su imali vrlo visoke temperature, a nositelj topline je bila voda pod tlakom u kapljevitom stanju na temperaturama polaza većim od 100 °C. Stanice za grijanje koje su zagrijavale ohlađenu vodu u krajnjim područjima zahvaljujući pomoćnim kotlovima omogućuju širenje sustava opskrbljujući tako više područja. Ova vrsta daljinskog grijanja najviše je korištena u bivšem SSSR-u. Razvoj sustava treće generacije pokrenut je 1980-ih nakon naftne krize 1973. godine. Dizajnirani su za integraciju više različitih vrsta izvora topline i poticanje energetske učinkovitosti. Obnovljivi izvori energije poput sunca, biomase i industrijske otpadne topline počinju se pojavljivati, a kombinirana proizvodnja topline i struje, kao i niže temperature vode (ispod 100°C) pomažu u smanjenju potrošnje energije. Preduvjeti za četvrtu generaciju razvoja CTS-a je razvijena optimalna mreža između izvora, transporta i potrošača te dostupnost nisko temperaturnih toplinskih izvora. Sustavi centralnog grijanja četvrte generacije razvijene su za opskrbu topline putem vode niske temperature u novoizgrađenim četvrtima s dobro izoliranim kućama koje imaju nisku specifičnu energetska potrošnju.

Počele su se koristiti i dizalice topline i električni kotlovi kako bi se iskoristila električna energija za dekarbonizaciju i integrirao višak energije iz povremenih obnovljivih izvora [3].

2.1.2. Nova generacija CTS-a

Kao što je već spomenuto konvencionalne mreže daljinskog grijanja karakteriziraju visoke temperature vode u sustavu i korištenje fosilnih goriva kao izvora topline. Ove dvije karakteristike uzrokuju ovisnost o uvozu fosilna goriva, prekomjerne emisije CO₂ i velike gubitke topline u toplinskoj mreži. Kako bi se smanjili navedeni negativni učinci razvijaju se nove mreže sljedeće, odnosno pete, generacije. Mreže nove generacije koriste tri temperaturna režima: ultra niski, niski i neutralni režim. Radne temperature ovih mreža znatno su niže nego u konvencionalnim mrežama daljinskog grijanja što omogućuje ugradnju nisko temperaturnih obnovljivih izvora energije i otpadne topline u toplinsku mrežu s minimalnim toplinskim gubicima, a većom energetsom učinkovitošću što je vidljivo na Slika 2. Peta generacija CTS-a je poznata i pod nazivom *CTS neutralne temperature*. Korisnici su međusobno povezani na mrežu, ali svaki ima vlastiti spremnik topline i dizalicu topline koja grije ili hladi ovisno o potrebama [4]. Razvoj pete generacije novi je pristup mrežama daljinskog grijanja i hlađenja. Umjesto centralizirane opskrbe energijom, tehnologija se oslanja na više energetskih centara na razini zgrade, opremljenih dizalicama topline i rashladnim uređajima prikazanim na Slika 3.



Slika 3: Shematski prikaz mreže pete generacije [4]

Glavna razlika između navedenih mreža je radna temperatura za grijanje i hlađenje prostora te za pripremu potrošne tople vode. Ultra niske mreže postižu temperature do 50°C. Te su temperature dovoljno visoke za zadovoljavanje potreba potrošača za grijanjem, ali je potrebna dodatna jedinica za pripremu PTV-a. Za postizanje viših temperatura mogu se koristiti različite tehnologije kao što su dizalice topline, električni grijači ili solarni kolektori.

Neutralne mreže imaju niske temperature (do 35°C) koje nisu dovoljno visoke ni za grijanje prostora ni za pripremu PTV-a. Stoga je svaka potrošačka podstanica opremljena „HP boosterom” za povišenje temperature [5]. Zbog nisko temperaturnog režima ove mreže imaju mogućnost i hlađenja prostora. Dizalice topline se spominju kao ključni dio sustava iz nekoliko razloga. COP se povećava smanjenjem temperature dovoda toplinske mreže. Smanjenje temperature dovoda poboljšava učinkovitost obnovljivih tehnologija grijanja, bilo izravnim korištenjem solarnih toplinskih kolektora ili korištenjem dizalica topline. Također, smanjenje temperature ima pozitivan utjecaj na centralne jedinice za opskrbu toplinom te na smanjenje toplinskih gubitaka u distribucijskim mrežama. S druge strane, nisko temperaturne mreže daljinskog grijanja imaju manju temperaturnu razliku između dovoda i povrata što znači da je protok radne tvari veći što predstavlja dodatna ulaganja u pumpe.

Osim toga, postoje dodatni čimbenici koje treba uzeti u obzir pri razvoju novih mreža, kao što su ulaganja potrebna za podstanice i decentralizirane tehnologije za povećanje topline. Rastući interes za 5. generaciju daljinskog grijanja i hlađenja potaknuo je nova istraživanja na tu temu, ali još uvijek postoje mnoga neodgovorena pitanja u vezi radijusa ekonomske isplativosti. Zbog simultanosti zahtjeva, prijenos topline u cijevima može teći u oba smjera, što rezultira dvosmjernom mrežom. Mreža u ovoj generaciji nije dizajnirana da osigura potrebnu temperaturu dovoda na svakoj povezanoj zgradi. Umjesto toga, decentralizirane dizalice topline i/ili rashladni uređaji moduliraju temperaturu mreže na razinu koja je potrebna za opskrbu zgrade [4].

2.2. Toplinski izvori u CTS - u nove generacije

Jedan od glavnih dijelova svakog sustava grijanja su izvori topline. Broj izvora topline razlikuje se u svakoj mreži. Više izvora topline znači da će opskrba toplinom biti sigurnija i pouzdanija. Smanjenje dovodne temperature omogućuje bolju i lakšu integraciju dodatnih nisko temperaturnih toplinskih izvora. Postoje prirodni izvori topline kao što su podzemne vode i tlo te urbani izvori topline koji će detaljnije biti objašnjeni u ovom diplomskom radu. Toplinski izvori smješteni u blizini industrijskih postrojenja koji su većinom izvan samog središta grad te urbani toplinski izvori koji su smješteni u područjima guste naseljenosti s visokom potražnjom topline. U tom okviru iskorištavanje obnovljivih i nekonvencionalnih izvora te njihova integracija unutar novih i postojećih energetske sustava od temeljne je važnosti za buduće analize i planove.

Postoji veliki neiskorišteni potencijal u povratu otpadne topline koja je dostupna na niskoj temperaturi iz urbanih izvora. Na Slika 4 prikazan je shema iskorištavanja otpadne topline. Toplina se prikuplja iz bolnica, željezničkih stanica i podatkovnih centara te se prijenosnim sustavima prenosi krajnjim potrošačima [6]. Većina dolazi iz otpadnih voda (42%), slijede podatkovni centri (23%), zgrade (uslužni sektor 19%, stambeni sektor 8,8%). Manje količine dolaze iz metro sustava i prehrambenih procesa. Nisko temperaturna otpadna toplina mogla bi zadovoljiti oko 10% europskih potreba za grijanjem [13].



Slika 4: Shema iskorištavanja topline iz urbanih toplinskih izvora [6]

U ovom radu prikazani su urbani toplinski izvori s naglaskom na trgovačke centre, samoposluge, podatkovne centre te trafostanice. Urbana dimenzija ima važnu ulogu zbog dostupnosti mnogih nekonvencionalnih izvora energije na razini grada koji se mogu integrirati u postojeće i nove energetske sustave povećavajući zelenu energiju bez ugljika, korištenjem i smanjenjem emisije stakleničkih plinova. Potencijal topline iz urbanog toplinskog sustava ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući:

1. Veličina grada: što je grad veći, to će biti veći potencijal za prikupljanje topline iz različitih izvora.
2. Broj zgrada: broj zgrada u gradu određuje potencijalnu potražnju za toplinom za grijanje i hlađenje, što povećava potencijal topline.
3. Lokacija: lokacija grada može utjecati na dostupnost različitih toplinskih izvora i na njihovu količinu.
4. Tip toplinskog izvora: različiti toplinski izvori imaju različite potencijale za prikupljanje topline. Na primjer, industrijski procesi mogu proizvesti veliku količinu topline, dok se toplina iz solarnih kolektora prikuplja samo tijekom sunčanih dana.

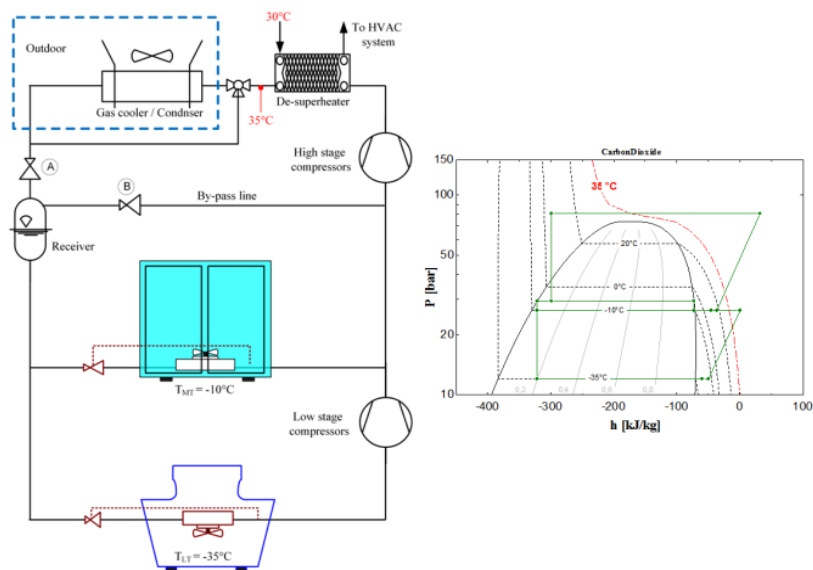
5. Tehnička izvedivost: potencijal za prikupljanje topline iz različitih izvora ovisi o tehničkoj izvedivosti tehnologija koje se koriste.
6. Financijska isplativost: potencijalna količina prikupljene topline treba biti uspoređena sa već korištenim tehnologijama.

2.2.1. *Rashladni sustav samoposluga*

Samoposluge su postale temeljni uslužni objekt suvremenog europskog društva te imaju važnu ulogu u lancu hrane. U posljednje vrijeme dolazi do njihovog snažnog rasta i razvoja pri čemu troše 3-4% godišnje proizvodnje električne energije u industrijaliziranim zemljama. Navode se kao energetske intenzivne zgrade koje imaju jednu od najviših specifičnih potrošnja energije (potrošnja energije po ukupnoj površini) među poslovnim zgradama u Europi i razvijenim zemljama diljem svijeta u kojima se nalazi većina maloprodajnog tržišta hrane. Rashladni sustavi zauzimaju 35-50% udjela u ukupnoj potrošnji energije u samoposlugama. Velika potrošnja energije i visoka potrošnja električne energije nisu jedini utjecaj na okoliš samoposluga. Osim toga samoposluge koriste tipično rashladna sredstva s visokim GWP-om (engl. *Global Warming Potential* – potencijal globalnog zagrijavanja). Konvencionalni rashladni sustav sastoji se od zasebnih sustava s izravnom ekspanzijom baziranih na HFC-u za srednje i niske temperaturne razine. Dominantno rashladno sredstvo u europskim samoposlugama je R404A s GWP vrijednošću od oko 3922. Zbog izrazito dugih cijevi i brojnih spojeva cjevovoda javlja se određena stopa curenja u rasponu od 3-22% prema različitim istraživanjima. Emisija rashladnih sredstava s visokim GWP-om u atmosferu poznata je kao izravna emisija. Ova velika potrošnja i emisija HFC rashladnog sredstva u rashladnim sustavima odražava se na ukupnu emisiju CO₂ u samoposlugama. Svrha rashladnih sustava je osigurati skladištenje kvarljivih namirnica prije prodaje. Hrana se čuva u skladištima/hladnjačama prije prijenosa u vitrine prodajnog prostora. Postoje dvije glavne razine temperature: srednja temperatura (MT) za čuvanje ohlađene hrane i niske temperature (LT) za smrznute proizvode. Ohlađena hrana se održava između 1°C i 14°C, dok se smrznuta hrana čuva na -12°C do -18°C, ovisno o nacionalnim i međunarodnim propisima o sigurnosti hrane[7]. Za postizanje željene temperature hrane, rashladno sredstvo ima raspon temperature isparavanja obično je između 15°C i 5°C za MT razinu i između -30°C do -40°C za LT razinu. Varijacije u temperaturi ovise o proizvodima, vitrinama i odabranom rashladnom sustavu. Postoje dvije vrste centraliziranih sustava: izravni i neizravni sustavi.

U izravnom sustavu kompresori u strojarnici spojeni su na isparivače u vitrinama i do kondenzatora na krovu dugim cijevima koje sadrže rashladno sredstvo. U neizravnom sustavu središnja rashladna jedinica hladi tekućinu koja cirkulira između isparivača u strojarnici i vitrine u prodajnom prostoru.

Centralizirani rashladni sustavi samoposluga mogu se kategorizirati u dvije skupine na temelju dominantna rashladna sredstva koja se koriste u europskim rješenjima. HFC sustavi se mogu smatrati kao konvencionalna rješenja i CO₂ sustavi kao ekološki prihvatljiviji i suvremeniji [8]. CO₂ sustavi su kaskadni sustav kod kojih je nedostatak srednji kaskadni izmjenjivač topline i temperaturna razlika koju ovaj izmjenjivač topline stvara. Ovaj “dodatni” stupanj izmjene topline smanjuje energetska učinkovitost i izmjenjivač topline može biti skup. Međutim, kaskadni sustav CO₂ može biti dobro rješenje za toplije klime, ako sigurnosni propisi dopuštaju upotrebu HCs ili NH₃ u visoko temperaturnom stupnju. Najnoviji rashladni sustav koji koristi CO₂ kao rashladno sredstvo je transkritični sustav za povišenje tlaka CO₂. Prikazana je jednostavna shema CO₂ sustava za povišenje tlaka i njegov dijagram tlak-entalpija na Slika 5. Ovaj sustav je rješenje samo za CO₂ koji osigurava hlađenje u MT ormarićima i LT zamrzivaču te se smatra jednim od najnovijih razvoja prema korištenju prihvatljivom za klimu rashladnih sredstava u europskim samoposlugama. Neovisnost sustava o korištenju drugih rashladnih sredstava kao što je HFC-i, amonijak ili ugljikovodici u neizravnim ili kaskadnim konfiguracijama rezultiraju smanjenim negativnim utjecaj na okoliš (u usporedbi s rješenjima na bazi HFC-a) i povećana sigurnost (u usporedbi s NH₃-HCs).



Slika 5: CO₂ sustav hlađenja samoposluga [19]

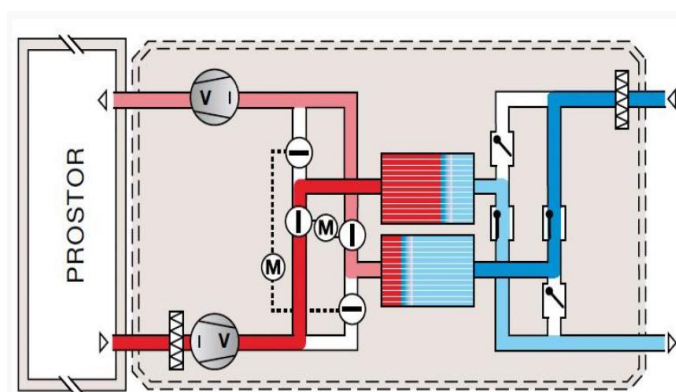
2.2.2. Sustav hlađenja samoposluga i trgovačkog centra

Samoposluge su veći potrošači energije za od trgovačkih centara. Postoji nekoliko načina na koji se mogu osigurati potrebe za grijanjem i hlađenjem u trgovačkom centru plinskim ili električnim kotlom, korištenjem klima uređaja ili toplinskih pumpi [9], [10]. Pri projektiranju rashladnog sustava trgovačkog centra najčešće se koriste tri sustava: VRV sustav, zračni sustav i zračno – vodeni sustav.

Varijabilni protok radne tvari, poznat i kao VRF, je tehnologija koja osigurava cirkulaciju minimalne količine radne tvari potrebne tijekom pojedinog razdoblja grijanja ili hlađenja. Ovaj mehanizam krajnjim korisnicima daje mogućnost pojedinačne regulacije nekoliko klimatizacijskih zona u isto vrijeme. Zračnim sustavom provodi se klimatizacija prostora promjenom stanja ili količine zraka koji se ubacuje u prostor. Koristi se zrak za pokrivanje toplinskih gubitaka zimi (upuhivanjem zraka više temperature od temperature u prostoriji), odnosno za pokrivanje rashladnog opterećenja ljeti (upuhivanjem zraka niže temperature od temperature u prostoriji). Prema režimu strujanja i tlaku zraka u kanalnome razvodu, ventilacija i klimatizacija može biti nisko brzinska (niskotlačna) i visokobrzinska (visokotlačna). Zračno-vodeni sustav koristi se zrakom i vodom za održavanje stanja u klimatiziranome prostoru. Pritom se, osim razvoda zraka, postavlja i cijevni razvod tople, odnosno hladne vode do izmjenjivača u prostoru. Voda se koristi za pokrivanje toplinskih opterećenja, dok se obrađeni vanjski zrak dovodi za ventilaciju i održavanje vlažnosti u prostoru (može pokrivati i dio toplinskog opterećenja). Taj zrak se u praksi često naziva primarni.

Izmjenjivači topline za grijanje i hlađenje obično su ventilokonvektori (nisko brzinski sustav) ili indukcijski aparati (visokobrzinski sustav) unutar klimatiziranoga prostora, ali mogu biti i u izvedbi kanalskih grijača i hladnjaka. Ventilokonvektor je uređaj za grijanje i hlađenje s ventilatorom i izmjenjivačem topline i izvodi se u kombinaciji s dovođenjem primarnoga zraka. Klime komore se dijele na kompaktne i *split* sustave. Na Slika 6 je prikazan primjer klima komore s povratom topline pomoću visokoučinkovitog spremnika topline. Uređaj sadrži dva spremnika topline s visoko učinkovitom akumulacijskom masom, kroz koje se naizmjenice propušta vanjski i povratni zrak. Akumulacijska masa ima karakteristiku da brzo preuzima toplinu iz toplog zraka te ju isto tako brzo i predaje hladnom zraku. Temperaturni učinkovitost regenerativnog energetskog prijenosnika iznosi preko 90%.

Uređaj tako povratu skoro svu toplinsku energiju povratnog zraka. Stoga, ukoliko postoje fiksna ogrjevna tijela ili transmisijski gubici mogu se pokriti s unutarnjim izvorima topline te stoga dodatni grijač dobavnog zraka nije potreban. U zimskom režimu rada se u regenerativnom sustavu za povrat toplinske energije pojavljuje i povrat vlage. Povrata vlage iznosi do 70%, tako da u većini slučajeva nema potrebe za ugradnjom dodatnog ovlaživača dobavnog zraka. Porastom vanjskih temperatura moguće je sustavom regulacije povrat topline smanjiti sve do režima slobodnog hlađenja. Ako je temperatura vanjskog zraka viša od temperature prostora, uređaj se preusmjeri i počinje raditi u režimu povrata rashladne energije s jednako visokim učinkom kao pri povratu toplinske energije.



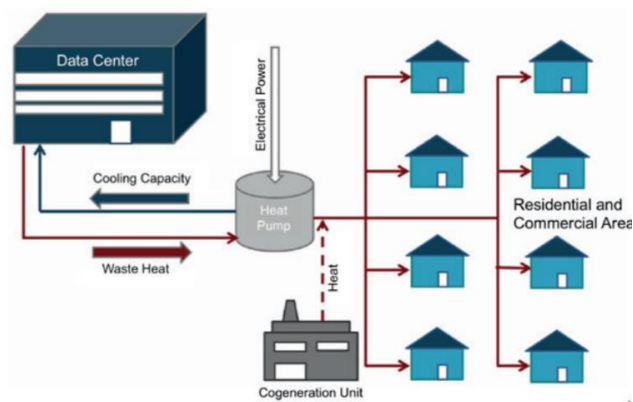
Slika 6: Klima komora trgovačkog centra [42]

2.2.3. Sustav hlađenja podatkovnog centra

Podatkovni centri jedno su od prvih nisko temperaturnih rješenja za povrat otpadne topline koje implementiraju se u brojne projekte. Izvrstan su izvor otpadne topline zbog njihov stalnog rada tijekom cijele godine, a shema iskorištavanja je prikazana na Slika 7. To je topline koja se proizvodi kroz rad servera i drugih računalnih uređaja. Međutim zbog njihovog niskog temperaturnog režima dizalice topline trebale bi biti integrirane za korištenje u postojećim sustavima daljinskog grijanja. Hlađenje sheme sustava podatkovnih centara može biti vodeno ili zračno. Problem energetske učinkovitosti u podatkovnim centrima je sve veći jer se sprema, obrađuje i prenosi sve više podataka i mnoštvo digitalnih usluga.

Procjenjuje se da IT sektor već ima 10% ukupne svjetske potrošnje električne energija. Osim izravno utrošene električne energije zahtijevaju i ogromne količine energije za hlađenje većinom s klima uređajima. Električna energija potrošena u data centrima se gotovo u potpunosti pretvara u toplinu koja većinom nije iskorištena [11].

Energetski učinkovit centar održava ulazni zrak na konstantnoj temperaturi razini. Vrući zrak se dovodi do klimatizacijskih jedinica i nije ga dopušteno pomiješati s dolaznim hladnim zrakom. Klima uređaj osigurava odgovarajuću masu protok zraka za zadanu geometrijsku raspodjelu toplinskih opterećenja. Senzori temperature na ulazu i izlazu i sustav upravljanja moraju biti sposobni nositi se s rastućim toplinskim opterećenjima uz održavanje temperature elektroničkih komponenti na sigurnoj radnoj razini.



Slika 7: Iskorištavanje otpadne topline data centra [14]

Postoje primjeri iskorištenja otpadne topline. Amazon koristi otpadnu toplinu iz podatkovnog centra u Irskoj za opskrbu grijanjem u Dublinu. Toplina iz podatkovnog centra u Danskoj grije 6900 domova.

Podatkovni park u Stockholmu ima za cilj korištenje otpadne topline iz podatkovnih centara za grijanje 10 % grada do 2035. godine. Činjenica da je većina ovih lokacija podatkovnih centara u hladnijim krajevima nije slučajnost: tehnološke tvrtke preferiraju te lokacije jer je potrebno manje energije da se sustav ohladi. Novi sustav grijanja u blizini Val'dEurope izvan Pariza iskorištava višak topline iz lokalnog podatkovnog centra[12]. Nova lokalna toplinska mreža s duljinom cjevovoda 4 km grije obližnje zgrade.

Podatkovni centar radi 24 sata dnevno, tijekom cijele godine, a kako bi se izbjeglo pregrijavanje, poslužitelji rade neprekidno hlađeni pomoću rashladnog sustava. Višak topline iz hlađenja poslužitelja se vraća i koristi se za grijanje u obližnjim zgradama. Sustav se sastoji od dva izmjenjivača topline spojena na mrežu za povrat topline. Kotao na prirodni plin koristi se za povećanje temperature kada je potrebno i djeluje za vršna opterećenja kad je velika potražnja za toplinom.

Izmjenjivači topline mogu osigurati vodu za centralno grijanje temperature između 48 i 55 °C, što odgovara ukupnom toplinskom kapacitetu od 7,8 MW koji može se izdvojiti iz podatkovnog centra.

2.2.4. Sustav hlađenja transformatorskih stanica

Trafostanice su dio sustava koji služi za prijenos električne energije. Njihov zadatak je promjena napona s nižeg na viši ili obrnuto. Ako je napon viši biti će manje gubitaka u transportu električne energije te se zato transport obavlja na višim naponima od onih koji su prisutni kod krajnjih potrošača [15]. U svako mjesto se dovodi više vrsta napona koji se smanjuje na potrebnih 230V za jednofaznu odnosno 400V za trofaznu struju pomoću trafostanica koje povezuju srednje naponsku i niskonaponsku mrežu. Energetski transformatori su dio sustava za prijenos i distribuciju električne energije koji omogućuju promjenu razina napona između dva električna kruga. Ovaj proces je visoko učinkovit, dosežući više od 95%. Gubici predstavljaju toplinu koju treba odvesti iz energetskog transformatora, obično koristeći rashladne sustave na bazi ulja [16]. Raspoloživi kapacitet otpadne topline od energetski transformator od 150 MVA je oko 450 kW [17]. Odvođenje topline iz velikih transformatorskih jedinica postiže se uglavnom kroz hladnjak ulje-zrak u kojem prisilno hlađenje prevladava nad prirodnim. Toplina se razvija u aktivnom dijelu transformatora te se prenosi na unutarnji rashladni medij, obično ulje i dalje prema vanjskom rashladnom sredstvu. Kako bi se procijenila iskoristivost gubitaka topline transformatora treba poznavati temperaturne uvjete unutar transformatorske jedinice koji ovise o gubicima transformatora. Oznaka načina hlađenja odvođenja topline transformatora sastoji se od četiri slova prikazana u Tablica 2:

1. rashladno sredstvo namota
2. način hlađenja namota
3. rashladno sredstvo vanjskog hlađenja
4. način hlađenja za vanjsko hlađenje

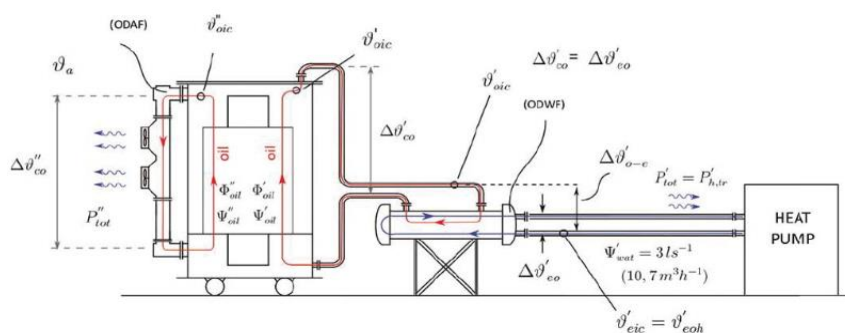
Tablica 2: Oznake načina hlađenja

Rashladno sredstvo		Način hlađenja	
Oznaka	Medij	Oznaka	Princip
O	Mineralno ulje	N	prirodno
L	Sintetsko ulje		
G	Plin	F	prisilno

W	Voda		
A	Zrak	D	dirigirano
S	Kruti materijal		

Primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora [17] je ugradnjom kompaktnog vodenog izmjenjivača topline uz postojeći rashladni sustav povećavajući rashladni kapacitet, a samim time se mijenjaju i temperaturni uvjeti unutar transformatora prema nižim vrijednostima. Cijevni izmjenjivač može se postaviti na udaljenu konstrukciju ili jednostavno instalirati na spremnik transformatora kroz ventile za filtraciju ulja kao što je prikazano na Slika 8. Kapacitet dodatnog hladnjaka treba odrediti na temelju toplinske potrebe pojedinih objekata podstanice, ali s praktičnog i ekonomičnog stajališta, posebno kada transformator stalno radi blizu nazivne radne točke, potrebno je ugraditi hladnjak s malo većim kapacitetom hlađenja. Cijevni izmjenjivači ulje-voda redovito su projektirani tako da je pad temperature na vodenoj strani jednak promjeni temperature na uljnoj strani hladnjaka. Može se procijeniti ulazna i izlazna temperatura vode. Pretpostavljajući da je temperatura vode koja ulazi u hladnjak 25°C tada se njezina izlazna temperatura podiže za količinu pada temperature 8°C na vrijednost 33°C . U obzir treba uzeti i promjenjivu okolišnu temperaturu kao i promjenjivo opterećenje transformatora tijekom dana. Temperaturni uvjeti unutar transformatora ovise uglavnom o gubicima koji se oslobađaju kao toplina unutar aktivnih dijelova transformatora.

Gubici se sastoje od stacionarnog i opterećenog dijela, pri čemu se prvi odnosi na gubitke u praznom hodu P_0 , dok se drugi odnosi na gubitke kratkog spoja P_{kn} . Ovakav pristup omogućuje korištenje topline u procesu grijanja objekata i povećava sposobnost hlađenja transformatorske jedinice, što povoljno utječe na životni vijek transformatora.

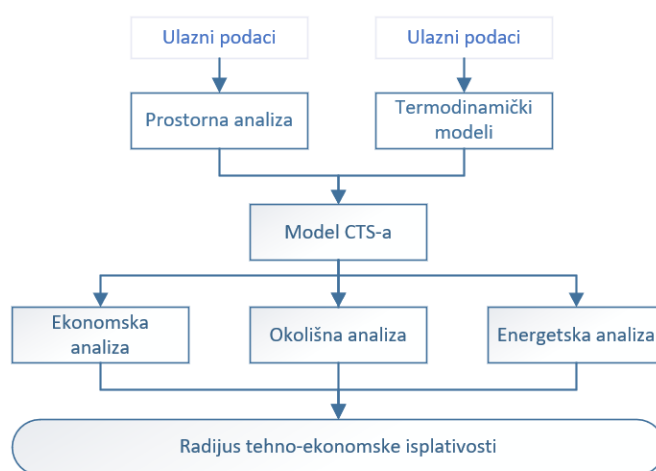


Slika 8. Primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora pomoću izmjenjivača topline ulje – voda i dizalice topline

3. METODA

U ovom poglavlju pojašnjena je prostorna analiza, termodinamički modeli odabranih urbanih toplinskih izvora te model CTS-a na temelju čijih su rezultata izrađene ekonomska, okolišna i energetska analiza. Termodinamički modeli urbanih toplinskih izvora te model CTS-a izrađeni su korištenjem *Microsoft Excela* dok je prostorna analiza izvršena korištenjem *QGIS* računalnog programskog alata.

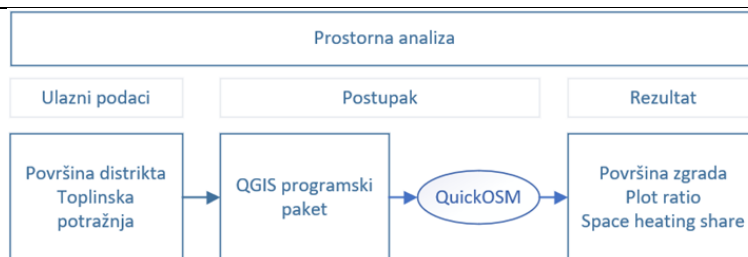
Metoda se zasniva na korištenju *QGIS* programskog paketa s kojim su odrađivani, podaci, izrađena scenarijski analiza te naposljetku prikazani rezultati. Korištenjem *QGIS* dodatka *Quick OpenStreetMap (QuickOSM-a)* mapirani su izvori otpadne topline za koje su izrađeni termodinamički modeli. Termodinamički modeli izvora otpadne topline na temelju ulaznih podataka, podataka o opterećenju te temperaturi vanjskog zraka, daju rezultate u obliku distribucije ulazne i izlazne temperature izvora te otpadne topline na satnoj razini. Na posljetku model CTS-a integrira prostornu analizu i termodinamičke modele te omogućuje izradu ekonomske, okolišne i energetske analize. Na Slika 9 prikazan je pojednostavljeni prikaz korištene metode.



Slika 9: Shematski prikaz metode

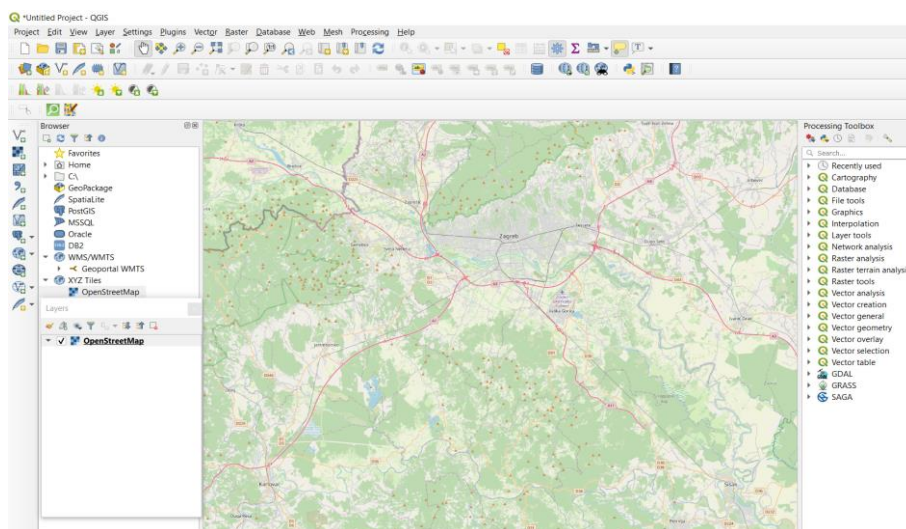
3.1. Prostorna analiza

Prostorna analiza omogućuje uočavanje karakterističnih pojava u prostoru. Podjela kategorija prostorne analize kreće se od odabira baze podataka i istraživanja, klasifikacije ili reklasifikacije, mjerenja i transformacije do statistike i optimizacije.



Slika 10: Shematski prikaz prostorne analize

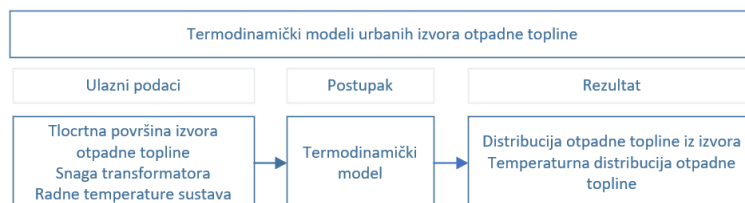
Cjelokupna analiza, prikazana na Slika 10, provedena je u *QGIS*-u, geoinformacijskom programskom paketu otvorenog tipa koji se koristi za uređivanje, analizu i vizualizaciju prostornih podataka. Sučelje *QGIS* prikazano je na Slika 11. Da bi se termodinamički modeli o promatranim urbanim toplinskim izvorima prikazali u digitalnoj karti, potrebno je spojiti digitalnu kartografsku cjelinu s termodinamičkim modelima. Digitalni kartografski entitet način je predstavljanja stvarnog svijeta u GIS alatima. Tri su osnovna načina prijenosa stvarnosti u *QGIS*-u: točka, linija i poligon. Mapiranje urbanih toplinskih izvora u području studije slučaja moguće je korištenjem *QGIS* programskog dodatka *Quick OpenStreetMap (OSM)*. *QuickOSM* je otvorena baza podataka kreirana prikupljanjem podataka od strane korisnika *QGIS* alata. Nakon ovog koraka kreiraju se atributne tablice koje predstavljaju opisne podatke o prikazanim kartografskim entitetima. Atributne tablice omogućuju manipulaciju opisnim podacima u vidu kreiranja različitih funkcija za filtriranje, računanje, itd. Nakon što su mapirani urbani toplinski izvori te je poznat njihov broj, položaj i površina objekata, oni se mogu spojiti s pripadajućim termodinamičkim modelima učitavanjem podataka iz *Excel*-a.



Slika 11: Prikaz sučelja u QGIS-u

3.2. Termodinamički model urbanih toplinskih izvora

Pojednostavljena shema termodinamičkih modela urbanih toplinskih izvora prikazana je na Slika 12. Termodinamički modeli omogućuju poznavanje distribucije otpadne topline tijekom promatranog razdoblja zajedno s temperaturama povrata i polaza. Ulazni podaci te modeli svakog pojedinog urbanog toplinskog izvora opisani su u sljedećim potpoglavljima.

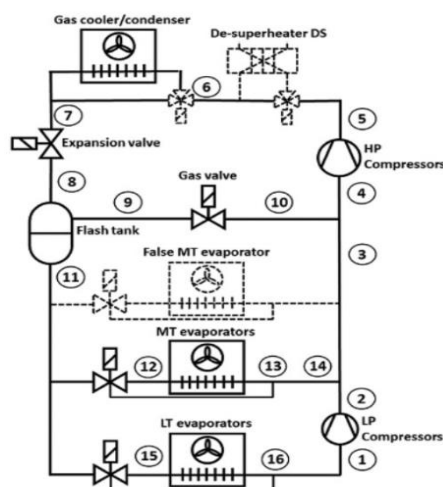


Slika 12: Shema termodinamičkog model urbanih toplinskih izvora

3.2.1. Model rashladnog sustava samoposluga

Ulazni podaci za proračun količine otpadne topline rashladnog sustava samoposluga su godišnja potrošnja električne energije te vanjska temperatura zraka. Referentni rashladni sustav, prikazan na Slika 13, se sastoji od:

- hladnjaka plina
- ekspanzijskog ventila
- sakupljača kapljevine
- niskotemperaturnih (LT) i srednjetermaturnih (MT) hladnjaka
- ventila za regulaciju by passa (3-4)
- niskotemperaturnih i srednjetermaturnih kompresora
- kompleta izmjenjivača prije hladnjaka plina za rekuperaciju topline



Slika 13: CO₂ sustav povrata topline [19]

Ulazni podaci potrebni za proračun su:

- Temperature opterećenja (MT, LT) [°C]

$$T_{LT} = -30 \text{ °C}$$

$$T_{MT} = -5 \text{ °C}$$

- Toplinsko opterećenje (MT,LT) [kW]

$$\Phi_{LT} = 20 \text{ kW}$$

$$\Phi_{MT} = 123 \text{ kW}$$

- Razlika tlaka između MT isparivača i sakupljača kapljevine [bar]

$$p_{MT} = 30,459 \text{ bar}$$

- Pregrijanje radne tvari nakon isparivača [°C]

Minimalno pregrijavanje na ulazu u kompresor je 10 K da se izbjegne ulazak kapljevine u kompresor. Korisnost kompresora računa se prema izrazu (1) [25]:

$$\eta = \dot{m} \cdot \frac{h_{1k,is} - h_{2k}}{\dot{E}} \quad (1)$$

η	- korisnost kompresora
\dot{m}	- maseni protok
$h_{1k,is}$	- entalpija radne tvari na izlazu kompresora
h_{2k}	- entalpija radne tvari na ulazu kompresora

Snaga kompresora ovisi o masenom protoku i entalpijama na ulazu i izlazu iz kompresora te se računa prema jednadžbama (2), (3), (4):

$$P_k = \dot{m} \cdot (h_{2k} - h_{1k}) \quad (2)$$

$$P_{MT} = q_{m,MT} \cdot (h_{13} - h_{12}) \quad (3)$$

$$P_{LT} = q_{m,LT} \cdot (h_{16} - h_{15}) \quad (4)$$

Za proračun rashladnog kapaciteta prema jednadžbama (5) i (6) u isparivačima potrebno je znati entalpije prije i poslije isparivača kao i masene protoke [25].

$$Q_{LT} = \dot{m} \cdot (h_{16k,LT} - h_{15LT}) \quad (5)$$

$$Q_{MT} = \dot{m} \cdot (h_{13kMT} - h_{12T}) \quad (6)$$

- h_{16} - entalpija radne tvari poslije nisko temperaturnog isparivača
 h_{15LT} - entalpija radne tvari prije nisko temperaturnog isparivača
 $h_{13,MT}$ - entalpija radne tvari poslije srednje temperaturnog isparivača
 h_{12MT} - entalpija radne tvari prije srednje temperaturnog isparivača

REKUPERACIJA TOPLINE

$$\beta = f(T_{amb}) = \begin{cases} 4,427, & T_{amb} \leq -20 \text{ }^\circ\text{C} \\ 1,2945 \cdot T_{amb} + 30,317, & -20 \text{ }^\circ\text{C} < T_{amb} < 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0, & T_{amb} \geq 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

- β - faktor ostatka otpadne topline nakon rekuperacije za grijanje [-][5]
 T_{amb} - vanjska temperatura zraka [$^\circ\text{C}$]

$$\Phi_{HS,1} = \beta \cdot \Phi_1 \quad (7)$$

$$T_{HS,1} = k_{HS} \cdot \Phi_{HS,1} + l_{HS} \quad (8)$$

- $\Phi_{HS,1}$ - početni toplinski tok izvora otpadne topline [kW]
 $T_{HS,1}$ - temperatura izvora otpadne topline [$^\circ\text{C}$]

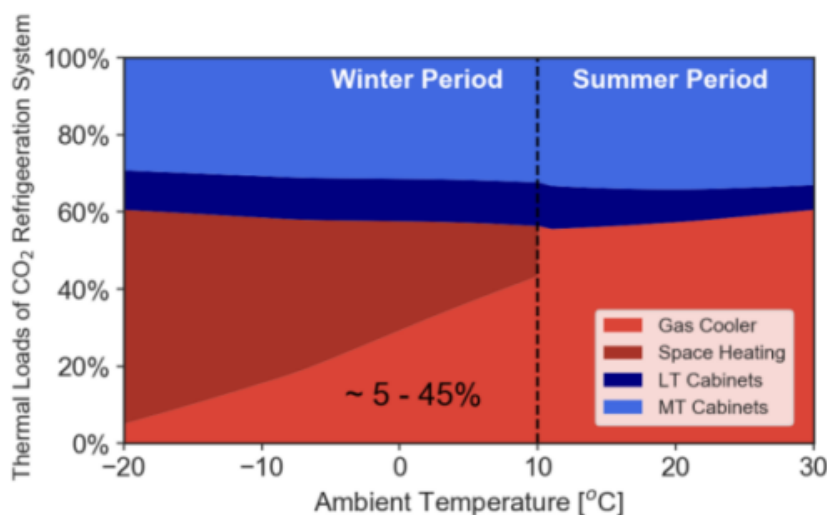
$$Q_{rec} = \dot{m} \cdot (h_{1k,MT} - h_{shr2}) \quad (9)$$

$$Q_{kond} = \dot{m} \cdot (h_{shr2} - h_{s,MT}) \quad (10)$$

- Q_{rec} - rekuperirana toplina [kW]
 Q_{kond} - toplina na kondenzatoru [$^\circ\text{C}$]

Ukupna otpadna topline prema gore navedenim jednadžbama od (7) do (10) ovisi o vanjskoj temperaturi zraka, masenim protocima i entalpijama na kondenzatoru. Prosječna godišnja potrošnja električne energije u supermarketima je između 327 i 600 kWh/m², a hlađenje pokriva između 35% i 50% te potrošnje.

Postoji korelacija između geografskog položaja supermarketa i potrošnja energije koja pokazuje da je potrošnja energije veća na južnim mjestima zbog viših temperatura okoline, prikazano na Slika 14. Hlađenje ima relativno konstantnu potrošnju koju je lako usporediti za isto razdoblje u godini na različitim lokacijama. [21]



Slika 14: Prikaz relativnih opterećenja prosječnog supermarketa u ovisnosti o temperaturi okoliša [21]

3.2.2. Model rashladnog sustava trgovačkog centra

Sustav hlađenje trgovačkog centra je ljevokretni sustav najčešće s radnom tvari R410a koji se sastoji od kompresora, kondenzatora, ekspanzijskog ventila te isparivača koji je povezan s klima komorom, Slika 15. Termodinamički proračun je sličan kao već spomenuti kod supermarketa prema jednadžbama (11) i (12). Temperatura ubacivanja zraka je između 3 i 8 °C. Satna potrošnja električne energije i vanjska temperatura zraka su ulazni podaci za proračun. Godišnja potrošnja električne energije je između 118 i 300 kWh/m² za trgovačke centre [7]. Različiti udjeli potrošnje energije ovise o klimatskoj zoni. Udio energije za hlađenje je između 1 i 8% za održavanje toplinske ugodnosti održava se u temperaturnom rasponu između 22 i 26°C za većinu trgovina u trgovačkim centrima.

Ulazni podaci [29]:

- Temperatura opterećenja [°C]:
 - projektna temperatura unutar promatranog objekta

$$T_{\text{ind}} = 24 \text{ °C}$$

- temperaturna razlika zraka koji se ubacuje

$$\Delta T_{\text{ubac}} = 7 \text{ °C}$$

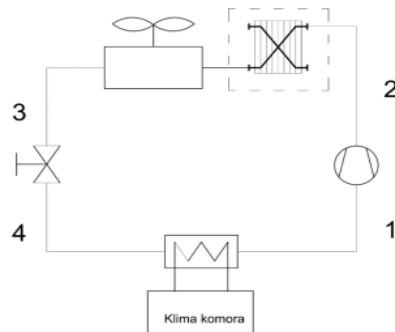
- temperaturna razlika pregrijanja

$$\Delta T_{SH} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

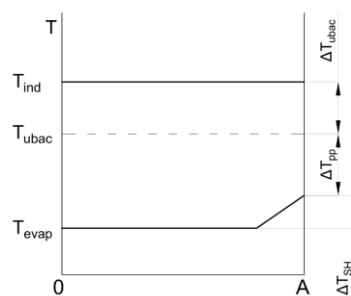
- temperatura isparivanja [$^\circ\text{C}$]

$$T_{evap} = 7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pregrijanje radne tvari nakon isparivača [$^\circ\text{C}$]
- Vanjska temperatura



Slika 15: Shematski prikaz ljevokretnog procesa



Slika 16: Načelna shema prijenosa topline na granici sustava klima komore i radne tvari

$$T_{evap} = T_{ind} - \Delta T_{ubac} - \Delta T_{pp} - \Delta T_{SH} \quad (11)$$

$$T_1 = T_{evap} + \Delta T_{SH} \quad (12)$$

Kondenzator, isparivač i kompresor su modelirani kao u poglavlju 3.1.1.

3.2.3. Model rashladnog sustava data centra

Model otpadne topline iz data centra izrađen je na temelju pregleda literature odakle se odabiru ulazni podaci [27].

Ulazni podaci:

- Temperature opterećenja [°C]:
 - temperatura zraka ulazna
 $T_{dc,i} = 25 \text{ °C}$
 - temperatura zraka izlazna
 $T_{dc,o} = 50 \text{ °C}$
 - temperatura *chillera* ulazna
 $T_{dc,ic} = 18 \text{ °C}$
 - temperatura *chillera* izlazna
 $T_{dc,oc} = 24 \text{ °C}$
- broj sati rada
- vanjska temperatura
- snaga data centra

Razvijeni model nudi dva pristupa za proračun godišnje distribucije otpadne topline:

- I. način - temeljen na poznavanju specifične gustoće istosmjerne snage, W_{DC} , i istosmjernih površina, A_{DC} . Ovi podaci služe kao ulazni podaci za daljnji tijek proračuna.
- II. način - temeljen na poznavanju kapaciteta opreme, W_{IT} , i kapaciteta drugih električnih sustava u data centru, W_{ES} .

Prema prvom načinu ukupna snaga sustava se računa prema jednadžbi (13), a prema drugom načinu prema jednadžbi (14):

$$P_{DC} = W_{DC} * A_{DC} \quad (13)$$

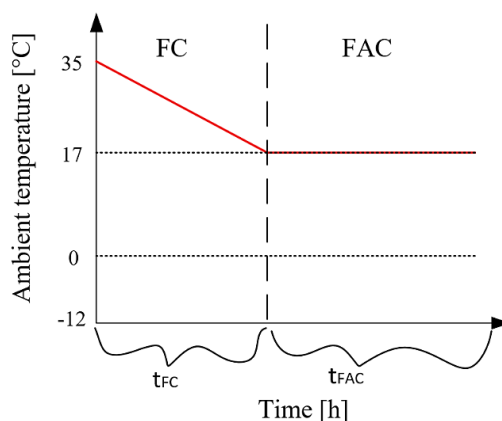
$$P_{DC} = W_{IT} + W_{ES} \quad (14)$$

Na temelju literature i empirijskih podataka utvrđeno je da data centar ima gotovo konstantno opterećenje tijekom godine s vrlo malom amplitudom varijacija. Gubici snage u poslužiteljima su 2 do 3 % stoga su zanemarivi pa je opterećenje snage jednako rashladnom opterećenju koje je izvor otpadne topline. Stoga jednadžba (15) pokazuje da je u svakom satu rashladno opterećenje jednako istosmjernom opterećenju tijekom cijele godine.

$$Q_{CL} = P_{DC} \quad (15)$$

Razlikuju se dvije vrste hlađenja prikazani na Slika 17:

- hlađenje zrakom FAC (eng. *Free Air Cooling*)
- prisilno hlađenje FC (eng. *Forced cooling*)



Slika 17: Hlađenje data centra

Ako je vanjska temperatura zraka između 17 °C i 35 °C data centar se prisilno hladi pomoću vodenih *chillera*, a ako je ispod 17 °C tada je hlađenje zrakom pomoću rashladnih tornjeva. Sustav hlađenja treba osigurati odvođenje topline jer akumulacija topline u podatkovnim centrima može varirati ovisno o izvedbi uređaja. Ukupna količina otpadne topline jednaka je zbroju količine topline i pri prisilnom hlađenju i pri hlađenju zrakom, (16).

$$Q_{WH} = Q_{WH,FAC} + Q_{WH,FC} \quad (16)$$

3.2.4. Model rashladnog sustava trafostanica

Transformator je ključan kod opisa modela trafostanice. Iz podataka o transformatoru ukupni gubici za koje treba projektirati rashladni sustav su gubici u praznom hodu i gubici kratkog spoja [16].

Ulazni podaci

- Satna distribucija opterećenje sustava EES-a [MW]
- Satna distribucija vanjske temperature zraka [°C]

Model hlađenja transformatora se provodi za jedan referentni transformator.

Podaci natpisne pločice transformatora:

- primarni napon - $U_h = 220$ kV

- sekundarni napon – $U_i = 23,8$ kV
- nominalna snaga – $S_n = 63$ MVA
- gubici pri opterećenju – $P_k = 200$ kW
- gubici praznog hoda – $P_0 = 36$ kW
- ukupni gubici – $P_{tot} = 236$ kW
- otpadna toplina – $Q_{loss} = 236$ kW
- udio otpadne topline – 0,37 %

Gubici opterećenja odnosno gubici u bakru ovise o jakosti struje koja prolazi kroz transformator, a prema tome i o snazi. Za ovisnost tih gubitaka uzet je izraz prema jednadžbi (17) [17].

$$P_{tot}'(K) = P_0 + \left(\frac{S'}{S_n}\right)^2 P_k = P_0 + K^2 P_k \quad (17)$$

P_{tot}' ukupni toplinski gubici pri opterećenju K [kW] [2]

K relativno opterećenje transformatora [-]

Snaga transformatora mijenja se s četvrtom potencijom promjene linearne dimenzije, a snaga gubitaka tj. otpadna toplina s trećom potencijom dok površina transformatora s drugom potencijom. Povezujući navedene izraze dobiva se jednadžba (18).

$$P' = P \left(\frac{S_n'}{S_n}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (18)$$

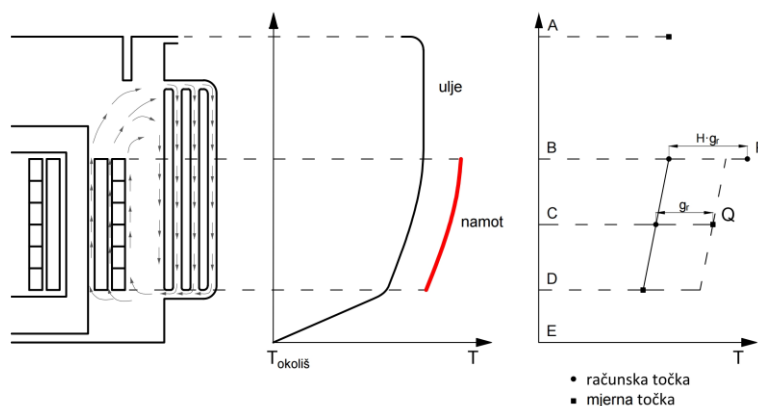
P' ukupni toplinski gubici transformatora [kW]

P ukupni toplinski gubici referentnog transformatora [kW]

S_n' nazivna snaga transformatora [kW]

S_n nazivna snaga referentnog transformatora [kW]

Najviše topline se razvija u vodičima namota. U transformatorima potopljenima uljem, koji su danas najčešći, postoji temperaturna visinska stratifikacija prikazana na slika 21. Na slici je temperaturna raspodjela linearno ovisna o visinskoj koti, a to ponajprije ovisi o načinu hlađenja samog transformatora, tj. o eksponentu hlađenja.



Slika 18: Načelna shema temperaturne stratifikacije u transformatoru te prikaz ključnih temperaturnih točaka [18]

A – temperatura ulja na vrhu; B – temperatura ulja na vrhu namota; C – srednja temperatura ulja u kotlu; D – temperatura ulja na dnu namota; E – dno kotla; g_r – porast temperatura između srednje temperature namota i srednje temperature ulja pri I_n; H – koeficijent *hot-spota*; P – najtoplija točka (*hot-spot*); Q – srednja temperatura namota određena iz mjerenja otpora

Slika 18 grafički prikazuje ovisnost prikazanu jednadžbama (19) i (20).

$$\Delta\theta_{to} = \Delta\theta_{tor} \left(\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right)^x \quad (19)$$

$\Delta\theta_{to}$ stacionarna nadtemperatura gornjeg sloja ulja [K] [5]

$\Delta\theta_{tor} = 52$ K nazivna stacionarna temperatura gornjeg sloja ulja [K] [4]

R omjer gubitaka opterećenja i gubitaka jezgre pri nazivnom opterećenju [-]

K opterećenje [-]

$$\Delta\theta_{bo} = \Delta\theta_{to} - (\Delta\theta_{tor} - \Delta\theta_{bor}) \left(\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right)^x \quad (20)$$

$\Delta\theta_{bo}$ stacionarna nad temperatura donjeg sloja ulja [K] [5]

$\Delta\theta_{bor} = 34$ K nazivna stacionarna temperatura donjeg sloja ulja [K] [4]

$\Delta\theta_{tor} - \Delta\theta_{bor}$ visinski gradijent ulja [K]

Nakon što je određen referentni transformator, određuje se referentna trafostanica. Računaju se ukupni toplinski gubici koji ove o gubicima transformatora pri opterećenju i bez opterećenja te o broju transformatora prema navedenim jednadžbama od (21) do (24).

$$P_k' = P_k \left(\frac{S_n'}{S_n} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (21)$$

$$P_0' = P_0 \left(\frac{S_n'}{S_n} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (22)$$

$$P_{tot}'(K) = P_0' + K^2 P_k' \quad (23)$$

$$P_{tot,n}' = n P_{tot}'(K) \quad (24)$$

P_k' toplinski gubici transformatora referentne trafostanice pri opterećenju K [kW]

P_0' toplinski gubici transformatora referentne trafostanice bez opterećenja K [kW]

$P_{tot}'(K)$ ukupni toplinski gubici transformatora referentne trafostanice [kW]

n broj transformatora u referentnoj trafostanici [kW]

$P_{tot,n}'$ ukupni toplinski gubici referentne trafostanice [kW]

3.3. Model centraliziranog toplinskog sustava

Za izradu modela CTS-a, prikazanog na Slika 19, korišten je model iz znanstvenog članka pod nazivom *Economic feasibility of ultra-low temperature district heating systems in the newly built area supplied by renewable energy* [33], objavljen u časopisu *Energy* te diplomskog rada [32]. U modelu su napravljene određene promjene te su ulazni podaci prilagođeni studiji slučaja. Model je unaprijeđen s jednostavnim integracijskim modelom otpadne topline koji uvodi ograničenje da se integrira onoliko toplinske energije u CTS kolika je ukupna toplinska potreba.



Slika 19: Shema modela centraliziranog toplinskog sustava

3.3.1. Model toplinske potražnje

Ukupna površina distrikta, $A_{distrikta}$, ukupna grijana površina zgrada u distriktu, $A_{zgrada,grijana}$, te ukupna toplinska potražnja distrikta, Q_{tot} , predstavljaju ulazne podatke za model CTS-a te se te vrijednosti mogu mijenjati tijekom proračuna u ovisnosti o rezultatima prostorne analize [26]. Specifična toplinska potreba za pripremu potrošne tople vode (PTV), q_{PTV} , također je ulazni podatak u model CTS-a, no on nije ovisan o prostornoj analizi nego je konstantan tijekom proračuna te iznosi $23.64 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$.

Iz površine distrikta te ukupno grijane površine zgrada u distriktu računa može se izračunati omjer površina, PR , (eng. *Plot ratio*) prema jednadžbi (25):

$$PR = \frac{A_{zgrada,grijana}}{A_{distrikta}} \quad (25)$$

Iznos omjera površina može iznositi od 0.2 do 2 te su niže vrijednosti karakteristične za rjeđe naseljena prigradska ili ruralna područja, a više za gusto naseljena urbana područja.

Zatim se računa ukupna specifična toplinska potražnja, q_{tot} , koja je jednaka omjeru ukupne toplinske potražnje te ukupne grijane površine zgrada u distriktu prema jednadžbi (26):

$$q_{tot} = \frac{Q_{tot}}{A_{zgrada,grijana}} = q_{SH} + q_{PTV} \quad (26)$$

Iz jednadžbe (26) može se izračunati specifična toplinska potreba za grijanje prostora, q_{SH} , te ukupna toplinska potreba za grijanje prema jednadžbi (27).

$$Q_{tot,SH} = q_{SH} \cdot A_{zgrada,grijana} \quad (27)$$

Iz jednadžbe (26) može se izračunati specifična toplinska potreba za pripremu potrošne tople vode, q_{PTV} , te ukupna toplinska potreba za pripremu PTV-a prema jednadžbi (28).

$$Q_{tot,PTV} = q_{PTV} \cdot A_{zgrada} \quad (28)$$

Iz dobivenih podataka u jednadžbi (27) i (28) te pomoću jednadžbe (26) može se izračunati udio grijanog prostora u distriktu, S_{SH} , prema jednadžbi (29).

Ovaj podatak nam govori o energetske učinkovitosti zgrada u distriktu te može varirati od 0.1 do 1, gdje niže vrijednosti predstavljaju energetski visoko učinkovite zgrade, tzv. zgrade nulte emisije gdje je ukupna toplinska potreba uglavnom za zagrijavanje potrošne tople vode, dok više vrijednosti predstavljaju zgrade s niskim energetskim svojstvima te su karakteristične za stare gradske jezgre te zgrade sa starim i lošim građevinskim elementima.

$$S_{SH} = \frac{Q_{tot,SH}}{Q_{tot,SH} + Q_{DHW}} \quad (29)$$

3.3.2. Model toplinskih gubitaka te gubitaka tlaka

Toplinski gubici i gubici tlaka značajan su čimbenik koji je potrebno uzeti u obzir prilikom analize isplativosti integracije urbanih toplinskih izvora u CTS. Iako su toplinski gubici nešto niži u nisko temperaturnim toplinskim mrežama nego u konvencionalnim mreže, još uvijek mogu utjecati na ekonomsku isplativost mreže. Za procjenu toplinskih gubitaka potrebno je poznavati linearnu gustoću potražnje za toplinom (eng. *linear heat density demand, LHDD*), q_l [24]. Kako bi odredili linearnu gustoću potražnje za toplinom prvo je potrebno odrediti efektivnu širinu mreže (eng. *effective width of a network*), w , koja je funkcija omjera površina te koristeći jednadžbu (30) [25].

$$w = 61,8 \cdot \epsilon^{-0,15} \quad (30)$$

Nakon što je izračunata efektivna širina, linearna gustoća topline je prikazana jednadžbom (31) [24].

$$q_l = \frac{Q_{tot}}{L} = q_{tot} \cdot \epsilon \cdot w \quad (31)$$

Duljina mreže se računa jednadžbom (32) kao omjer ukupnih toplinskih potreba i linearne gustoće topline.

$$L = \frac{Q_{tot}}{q_l} \quad (32)$$

Promjer cijevi toplinske mreže, d_a , u mreži ovisi o linearnoj gustoći potražnje za toplinom [24], a računa se prema jednadžbi (33):

$$d_a = 0,0486 \cdot \ln\left(\frac{Q_{tot}}{L}\right) + 0,0007 \quad (33)$$

Za izračun godišnjih gubitaka topline koristi se jednadžba (34) iz [26]:

$$\frac{Q_{gubitaka}}{Q_{tot}} = 0,2748 \cdot q_l^{-0,653} \cdot \frac{T_{polaza} + T_{povrata} - 2 \cdot T_{tla}}{T_{polaza} + T_{povrata} - 2 \cdot T_{tla}} \quad (34)$$

Gdje su $\overline{T_{polaza}}$ i $\overline{T_{povrata}}$ prosječna godišnja temperatura polaza i povrata u mreži, a T_{tla} prosječna godišnja temperatura tla.

Energija koje je potrebna za pogon pumpi uslijed nastalog gubitka tlaka ovisi o smještaju i izvedbi mreže, a može se izračunati pomoću pada tlaka i volumnog protoka prema jednadžbi (35).

$$V = \frac{\left(\frac{Q_{tot, isporučena}}{8760}\right)}{c_{p, H_2O} \cdot (T_{polaza} - T_{povrata}) \cdot \rho_{H_2O}} \quad (35)$$

Q_{tot} predstavlja ukupnu godišnju toplinu isporučenu u mrežu (ukupna potražnja za toplinom i gubici topline u mreži), c_{p, H_2O} specifični toplinski kapacitet vode, ρ_{H_2O} predstavlja gustoću vode.

Pad tlaka u cjevovodu CTS-a pretpostavljen je na vrijednost $100 \frac{Pa}{m}$ [26] te se time ukupni pad tlaka u sustavu može izračunati prema jednadžbi (36):

$$\Delta p_{CTS} = \Delta p_{cjevovod} = 2 \cdot L \cdot 100 \quad (36)$$

Na koncu se potrebna energija za pogon pumpe računa prema jednadžbi (37):

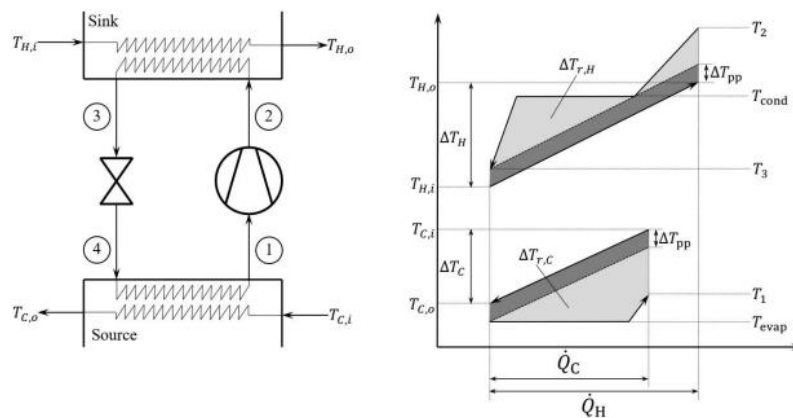
$$W_{pumpa} = \Delta p_{CTS} \cdot \dot{V} \cdot \eta_{pumpa} \cdot 8760 \quad (37)$$

Gdje je η_{pumpa} učinkovitost pumpe, te je pretpostavljena učinkovitost prema literaturi vrijednost od 0.8 [26].

3.3.3. Koeficijent učinkovitosti dizalice topline

Kao način integracije otpadne topline iz urbanih izvora pretpostavljeno je kako će se koristiti dizalica topline, tj. izvor otpadne topline predstavlja toplinski izvor (isparivač), dok CTS predstavlja toplinski ponor (kondenzator). U ovom diplomskom radu korištena je model Lorenzove učinkovitosti koji omogućuje izračun koeficijenta učinkovitosti dizalice topline (eng. *Coefficient of Performance, COP*), te je detaljnije opisan u [27]. Koeficijenti učinkovitosti dizalice topline predstavlja omjer između dobivene toplinske energije i količine električne energije koju dizalica topline koristi za svoj rad.

Koeficijent učinkovitosti dizalice topline izračunat je za svaki sat u godini za svaku dizalicu topline. Korišteni model Lorenzove učinkovitosti prikazan je na Slika 20.



Slika 20: Shematski prikaz rada dizalice topline [27]

Na Slika 20 $T_{H,i}$ predstavlja ulaznu temperaturu toplije struje, dok $T_{H,o}$ predstavlja izlaznu temperaturu toplije struje. Temperaturna razlika između izlazne i ulazne temperature računa se prema jednadžbi (38).

$$\Delta T_H = T_{H,o} - T_{H,i} \quad (38)$$

Temperatura $T_{C,i}$ je ulazna temperatura hladnije struje, dok $T_{C,o}$ predstavlja izlaznu temperaturu hladnije struje. Temperaturna razlika računa se prema jednadžbi (39).

$$\Delta T_C = T_{C,i} - T_{C,o} \quad (39)$$

Zatim se računa srednja logaritamska temperatura izvora, \bar{T}_H , i ponora, \bar{T}_C , prema jednadžbama (40) i (41).

$$\bar{T}_H = \frac{\Delta T_H}{\ln\left(\frac{T_{H,o}}{T_{H,i}}\right)} \quad (40)$$

$$\bar{T}_C = \frac{\Delta T_C}{\ln\left(\frac{T_{C,o}}{T_{C,i}}\right)} \quad (41)$$

Razlika između srednjih temperatura izvora i ponora naziva se temperaturni doprinos, $\Delta \bar{T}_{lift}$, (eng. *temperature lift*) te se računa prema formuli (42).

$$\Delta \bar{T}_{lift} = \bar{T}_H - \bar{T}_C \quad (42)$$

Lorenzov COP se računa kao omjer srednjih temperatura izvora i ponora prema jednadžbi (43). U nekim slučajevima se može dogoditi pogrešan izračun ako je temperatura ponora viša od temperature izvora (ljetni sati) zato se $\Delta\bar{T}_{lift}$ ograničena na minimalnu vrijednost pet.

$$COP_{Lorenz} = \frac{\bar{T}_H}{\bar{T}_H - \bar{T}_C} = \frac{\bar{T}_H}{\Delta\bar{T}_{lift}} \quad (43)$$

Nakon što je određen Lorenzov COP koeficijent, stvarna vrijednost COP za svaki sat računa se prema jednadžbi (44).

$$COP = \eta_{Lorenz} * COP_{Lorenz} \quad (44)$$

3.3.4. Sezonski koeficijent učinkovitosti CTS-a

Nakon što se izračuna Lorenzov COP te integrirana toplinska energija iz urbanih izvora toplina moguće je izračunati sezonski COP, $SCOP$, koji je omjer ukupno isporučene toplinske energije prema krajnjih korisnicima, Q_{tot} , te potrošene električne energije, W_{tot} , u jednoj godini. $SCOP$ se računa prema jednadžbi (45):

$$SCOP = \frac{Q_{tot, isporučena}}{W_{tot}} \quad (45)$$

Gdje se potrošena električna energija računa prema jednadžbi (46) te je zbroj potrošnje centralne dizalice topline, $W_{DT, centralna}$, i pumpe, W_{pumpa} .

$$W_{tot} = W_{DT, centralna} + W_{pumpa} \quad (46)$$

3.4. Ekonomska, okolišna i energetska analiza

U ekonomskoj analizi koristi se metoda niveliranog troška toplinske energije (*engl. Levelized Cost Of Heat, LCOH*) pomoću koje se računa trošak toplinske energije tijekom perioda trajanja projekta ili opreme koji je sveden na sadašnju vrijednost novca prema jednadžbi (47).

$$LCOH = \frac{CAPEX + OPEX}{Q_{tot}} \quad (47)$$

$CAPEX$ (*engl. Capital expenditures*) predstavlja kapitalne troškove odnosno to je investicija nivelirana na sadašnju vrijednost novca. $OPEX$ su operativni troškovi, troškovi održavanja mreže, troškovi centralne i rezervne jedinice te troškovi električne energije. Q_{tot} je ukupna isporučena toplinska energija dobivena rekuperacijom iz izvora otpadne topline.

$$CAPEX = CRF \cdot I \quad (48)$$

$$CRF = \frac{d \cdot (1 + d)^n}{(1 + d)^n - 1} \quad (49)$$

OPEX se računa kao suma troškova održavanja i rada (engl. *Operation and Maintenance, O&M*) kojoj se zatim dodaju ukupni trošak potrošene električne energije (E_{tot}) ili toplinske energije plina (G_{tot}).

Energetska analiza provedena je korištenjem faktora primarne energije, $f_{prim,scenario}$ (eng. *primary energy factor, PEF*). Faktor primarne energije računa se prema jednadžbi (50) te predstavlja omjer ukupno potrošene primarne energije i ukupno isporučene toplinske energije, Q_{tot} , iz izvora otpadne topline tijekom jedne godine. Da bi se koristila ova metoda potrebno je ukupnu potrošenu električnu energiju ili toplinsku energiju dobivenu iz plina pretvoriti u primarnu energiju. Nakon toga se iznos primarne energije dijeli s ukupnom toplinskom energijom koja je isporučena krajnjim korisnicima.

$$f_{prim,scenario} = \frac{(E_{tot} \text{ ili } G_{tot}) \cdot f_{prim}}{Q_{tot}} \quad (50)$$

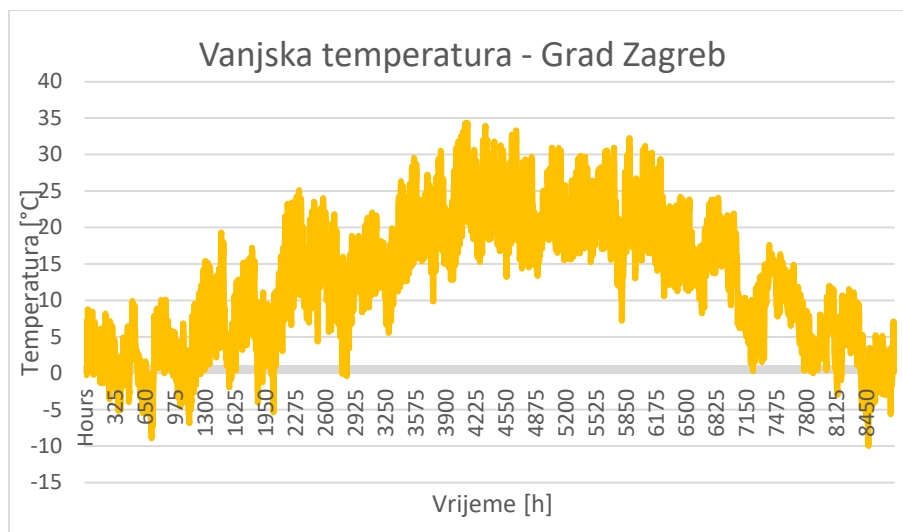
Okolišna analiza provedena je korištenjem faktora emisije ugljika faktora emisije ugljika, $f_{CO_2,scenario}$ (eng. *carbon emission factor, CEF*). Faktor emisije ugljika računa se prema jednadžbi (51) te da bi se koristila ova jednadžba potrebno je ukupnu potrošenu električnu energiju ili toplinsku energiju dobivenu iz plina pomnožiti s faktorom emisije CO₂, f_{CO_2} te se zatim dobivena vrijednost dijeli s ukupnom toplinskom energijom koja je isporučena krajnjim korisnicima.

$$f_{CO_2,scenario} = \frac{(E_{tot} \text{ ili } G_{tot}) \cdot f_{CO_2}}{Q_{tot}} \quad (51)$$

4. STUDIJA SLUČAJA: ZAGREB

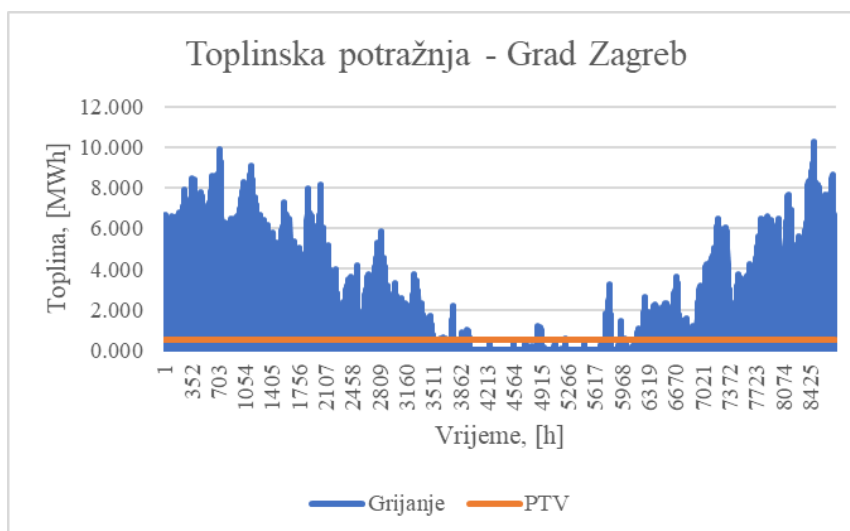
4.1. Ulazni podaci

Metoda diplomskog rada ispitana je na studiji slučaja za Grad Zagreb te su svi ulazni podaci prilagođeni za Grad Zagreb i Republiku Hrvatsku [28]. Na Slika 21 prikazano je kretanje vanjske temperature zraka u Zagrebu za svaki sat tijekom 2021. godine [28].



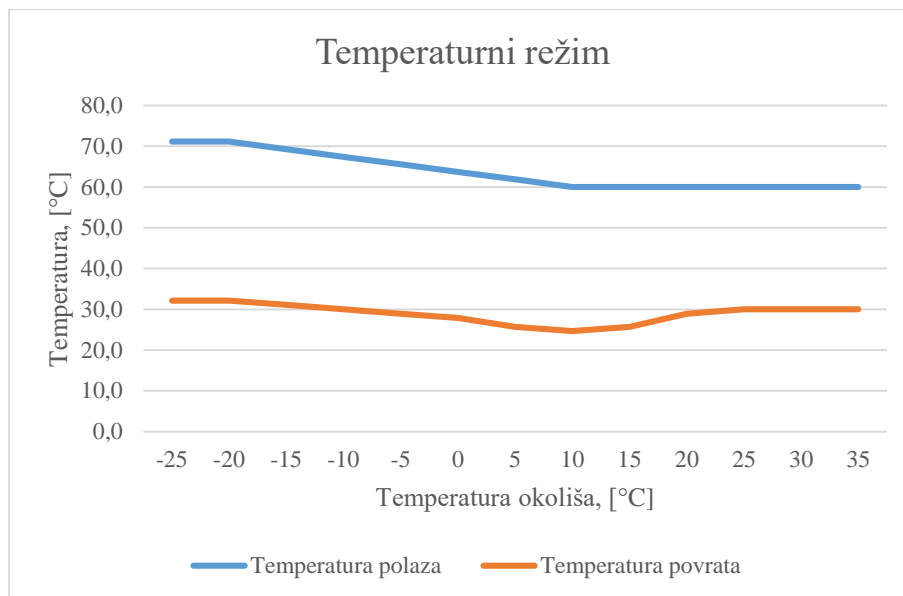
Slika 21: Temperatura zraka u Zagrebu [28]

Ukupna potražnja za grijanje i pripremu PTV-a modeliranu su prema podacima za prosječno kućanstvo u RH prema podacima iz 2021 [28] te na temelju prostorne analize. Na Slika 22 prikazana je primjer profila toplinske potražnje u Gradu Zagrebu.



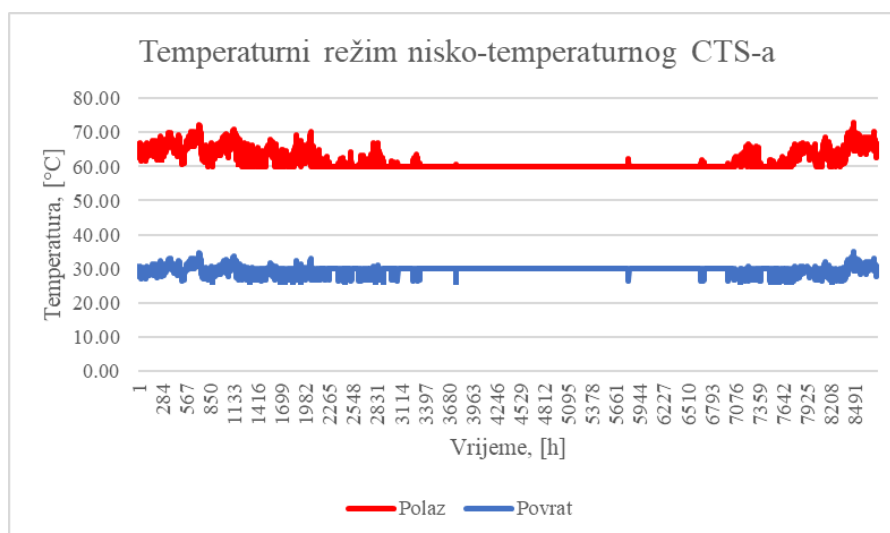
Slika 22: Ukupne toplinske potrebe

Na Sliku 23 prikazan je temperaturni režim mreže koji ovisi o vanjskoj temperaturi, tj. temperaturi okoliša. Vidljivo je da maksimalna temperatura polaza varira između 70 °C i 60 °C, dok temperatura povrata uglavnom iznosi oko 30 °C.



Slika 23: Temperatura polaza i povrata LTDH mreže [30]

Na temelju Slika 22 i Slika 23 određen je temperatura u mreži tijekom godine te je prikazan na Slika 24. Vidljivo je da je tijekom zime temperaturni režim u mreži viši, dok je zimi temperaturni režim niži što je posljedica povećane, tj. smanjenje toplinske potražnje.



Slika 24: Temperaturni režim nisko-temperaturnog CTS-a

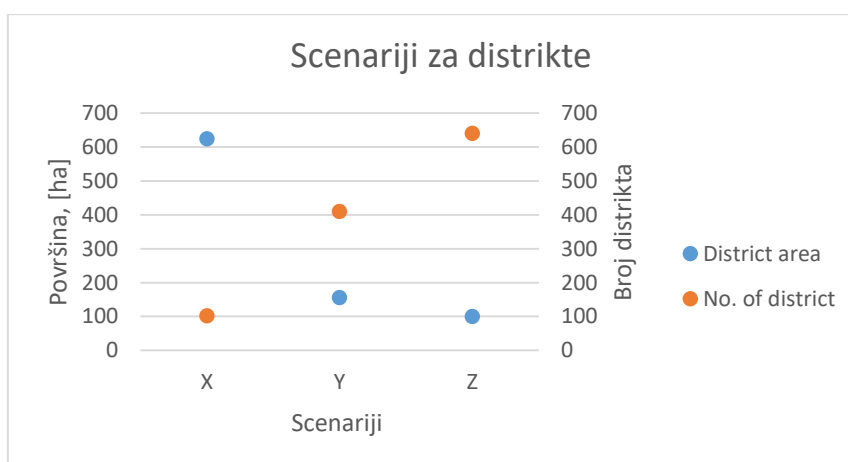
4.2. Prostorni podaci

Ulazni podaci za prostornu analizu su dobiveni pomoću *OpenStreetMap-a (OSM)* u računalnom programu QGIS-u. Mapirani su urbani toplinski izvori grada Zagreba i to supermarketi, trgovački centri, data centar te trafostanice. Pomoću atributnih tablica prikazane su površine, točne lokacije i pripadajuće toplinske potrebe pojedinih objekata. Također su prikazane ukupne toplinske potrebe. Za analizu radijusa ekonomske isplativosti integracije urbanih toplinskih izvora površina Zagreba od 64100 ha je podijeljena na distrikte. Distrikti su zapravo kvadrati određenih dimenzija prikazani u tablici. Pri obradi rezultata se analizira koliko i kojih izvora otpadne topline ima u pojedinom kvadratu da bi se izračunala količina otpadne topline na pojedinom području.

Tablica 3. Podjela Grada Zagreba na distrikte

Scenariji	Duljina stranice, a , [m]	Površina, $a \cdot a$, m^2	Broj distrikta
X	2500	625 ha	103
Y	1250	156 ha	410
Z	1000	100 ha	641

Slika 25 prikazuje podjelu Grada Zagreba na distrikte te koliki je ukupni broj distrikta u površini.



Slika 25: Scenariji podjele površine grada Zagreba

4.3. Dimenzioniranje sustava i cijene

Središnja jedinica je dimenzionirana da integrira 100 % dostupne toplinske energije u određenom satu. Ako su potrebe veće, uključuje se rezervna jedinica te zadovoljava preostale toplinske potrebe. Investicijski troškovi komponenti modela u prikazani su u Tablica 5.

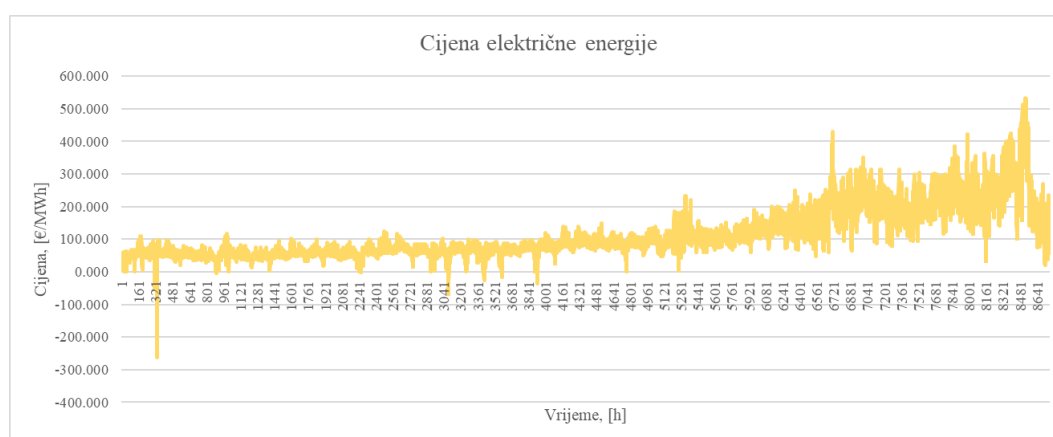
Tablica 4. Investicijski troškovi komponenti modela

Tehnologija	Cijena [MW/€]	Životni vijek	Izvor
Centralna DT	$0,867 \cdot Q_{central}^{-0,1234}$	25	[15]
Rezervna DT	$2,748 \cdot Q_{central}^{-0,594}$	15	[15]
Plinski kondenzacijski kotao - kućanstva	0,06	25	[34]
Plinski kondenzacijski kotao - zgrade	0,06	25	[34]
CTS - plin	$0,414 \cdot Q_{central}^{-0,536}$	25	[35]

Tablica 5: Troškovi rada i održavanja komponenti modela

Tehnologija	Fiksni troškovi [MW/€]	Varijabilni [€/MWh]	Izvori
Centralna DT	2,030	1,83	[36]
Rezervna DT	$229,6 + 3852,6 \cdot \ln(Q_{decentraln})$		[36]
Plinski kondenzacijski kotao - kućanstva	14,445	0,0107	[36]
Plinski kondenzacijski kotao - zgrade	14,445	0,0107	[15]
CTS plin	$0,02511 \cdot n(Q_{decentraln}) - 0,0154$		[35]

Za cijenu električne energije uzeti su podaci s ENTSO-e platforme za 2021. godinu prikazani na Slika 26 [40].



Slika 26: Cijena električne energije [40]

Kako bi mogli usporediti isplativost izgradnje nisko-temperaturnog CTS-a u Zagrebu usporedit ćemo rezultate s najčešće korištenim tehnologijama za pokrivanje toplinskih potreba u Gradu Zagrebu, a to su plinski kondenzacijski kotlovi za kućanstva, zgrade te CTS koji je baziran na plinskim kotlovima te kogeneracijskim postrojenjima [31].

Kako bi se odredio investicijski trošak plinskih kondenzacijskih kotlova u kućanstvima i zgradama potrebno je odrediti broj individualni kotlova koje je potrebno instalirati. Da bi to odredili potrebno je pretpostaviti kapacitet jedne individualne jedinice te on iznosi 20 kW za kućanstva, a 200 kW za zgrade.

U

Tablica 5: Troškovi rada i održavanja dan je pregled investicijskih, fiksnih i varijabilnih godišnjih troškova rada i održavanja za navedene tehnologije. Podaci o cijeni plina uzeti su sa Eurostata te je prosječna cijena plina u 2021. godini za kućanstva iznosila 55 €/MWh dok je za industriju iznosila 75 €/MWh [41].

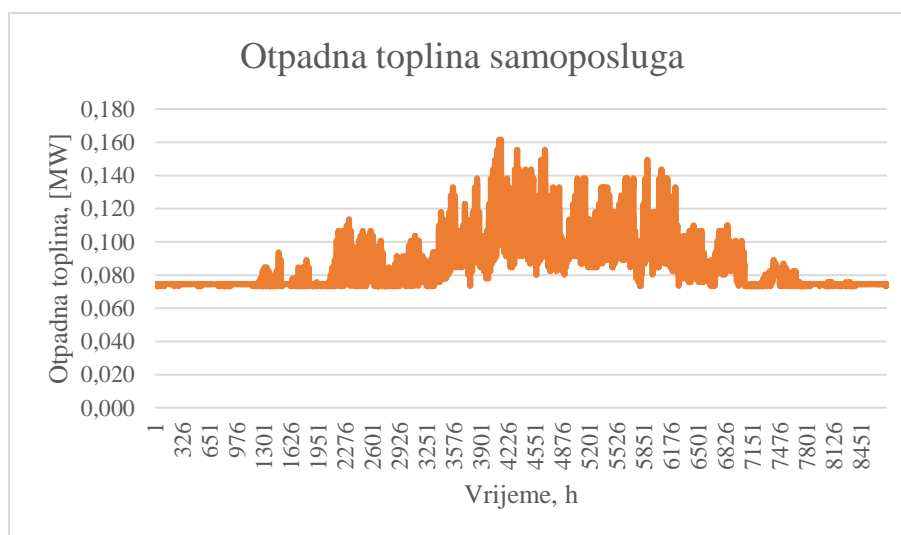
Za proračun primarne energije primarni faktor je 1,614 [34]. Mreža daljinskog grijanja dimenzionirana je prema danim podacima [35]. Troškovi mreže određuje se kao funkcija duljine mreže i promjera cijevi. Cijena cjevovoda kao funkcija cijevi promjer je prikazan na slici . Pretpostavljeno je da je životni vijek mreže 30 godina [36] te da su godišnji troškovi rada i održavanja mreže iznose 1% početnih troškova ulaganja u mrežu [37].

5. REZULTATI

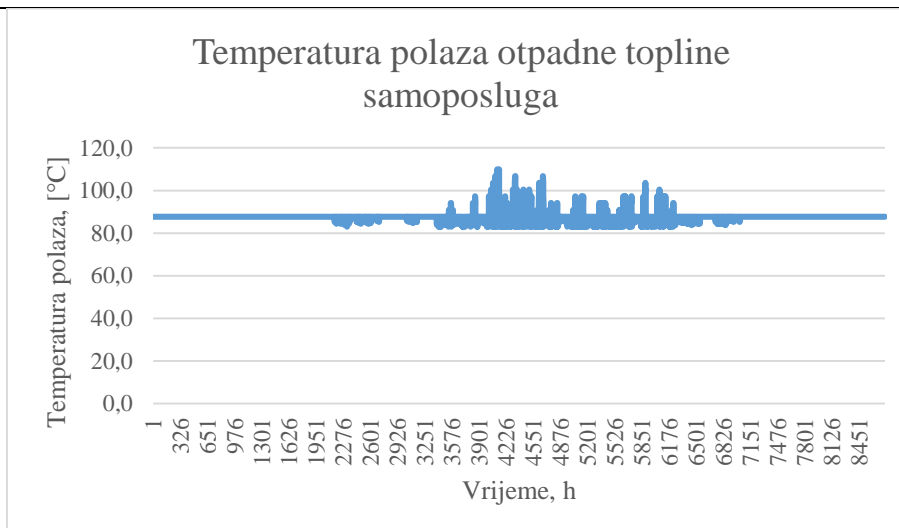
5.1. Termodinamički modeli

5.1.1. Rashladni sustav samoposluga

Za modeliranje iznosa otpadne topline rashladnog sustava supermarketa pretpostavljene su temperature polaza i povrata otpadne topline na temelju pregleda literature. Najniža temperatura polaza je $87.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ u zimskim mjesecima, a tijekom ljeta dolazi do porasta temperature što je vidljivo na Slika 28: Temperatura polaza otpadne topline rashladnog sustava samoposluga. Izračunat je COP ovisno o pripadajućoj površini nakon čega je, kao što je prikazano na Slika 27, dobiven iznos otpadne topline tijekom cijele godine za jedan karakterističan supermarket. Tijekom ljetnih mjeseci je najveća količina otpadne topline dostupna jer su tada najveće potrebe za rashladnim sustavom.



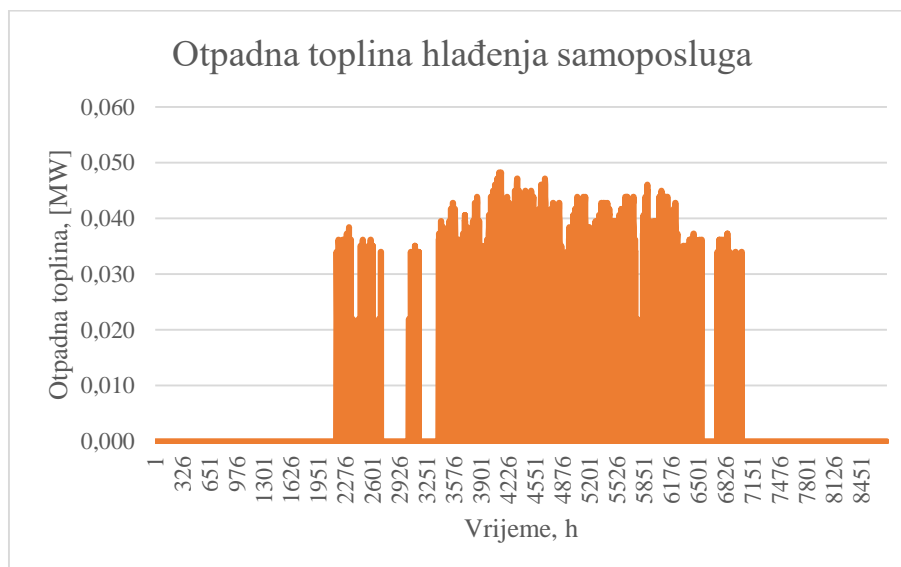
Slika 27: Količina otpadne topline – primjer rashladnog sustava samoposluge



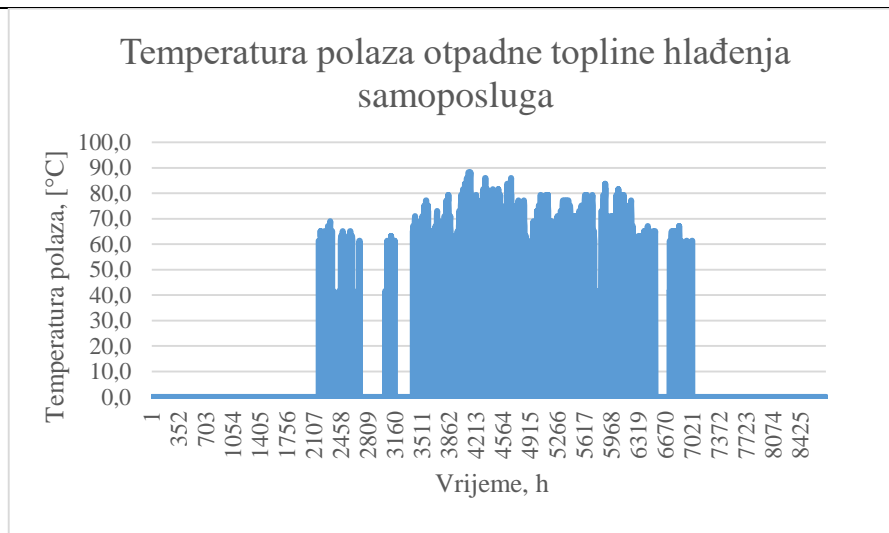
Slika 28: Temperatura polaza otpadne topline rashladnog sustava samoposluga

5.1.2. Sustav hlađenja samoposluga

Pri hlađenju samoposluga polazna i povratna temperatura otpadne topline nisu konstante jer ovise o temperaturi okoline. Na Slika 29 je prikazan karakterističan iznos otpadne topline jedne samoposluge čija ja površina između 1000 i 5000 m². Maksimalni iznos otpadne topline je tijekom ljetnih mjeseci jer je tad najveća potreba za hlađenjem. Prosječna temperatura polaza je 70 °C prikazana na Slika 30: Temperatura polaza otpadne topline hlađenja samoposluga



Slika 29: Količina otpadne topline – primjer sustava hlađenja samoposluge

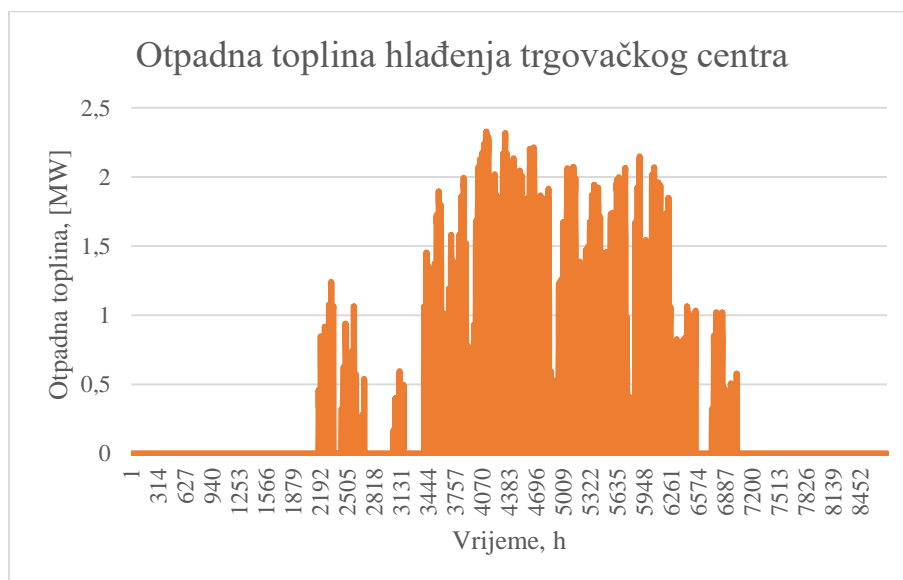


Slika 30: Temperatura polaza otpadne topline hlađenja samoposluga

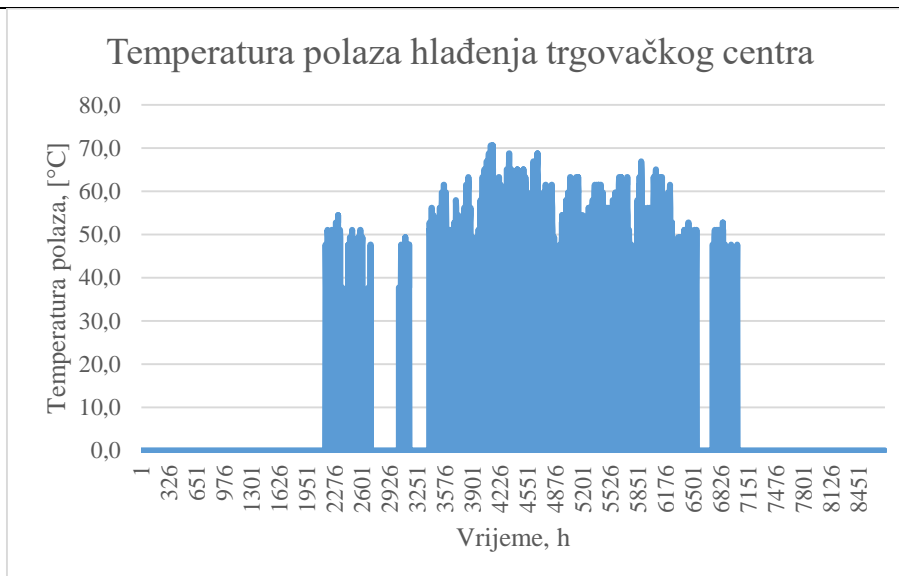
5.1.3. Sustav hlađenja trgovačkog centra

Za hlađenje karakterističnog trgovačkog količina otpadne topline nije dostupna tijekom cijele godine, prikazana je na Slika 31.

Rezultati su prikazani za trgovački centar veličine između 5000 i 10000 m² te je vidljivo da je moguće ljeti dobiti čak 2 MW otpadne topline. Temperatura izvora otpadne topline u određeno vremenskom razdoblju doseže 70 °C, Slika 31.



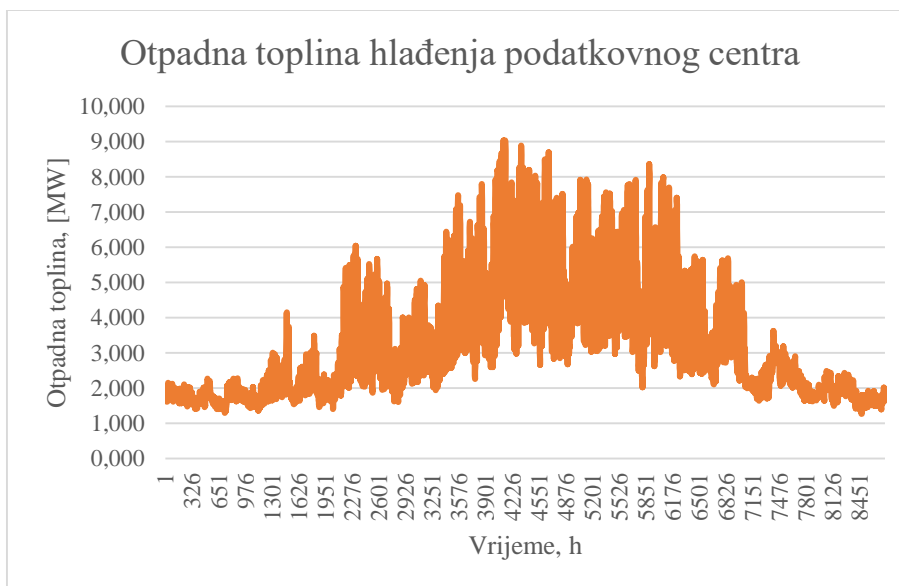
Slika 31: Količina otpadne topline –primjer sustava hlađenja trgovačkog centra



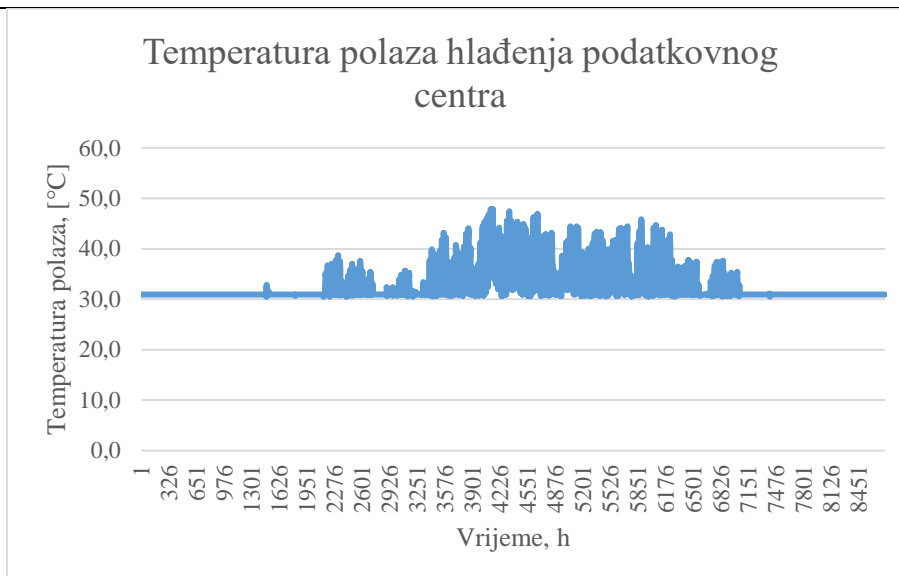
Slika 32: Temperatura polaza otpadne topline hlađenja trgovačkog centra

5.1.4. Sustav hlađenja podatkovnog centra

Za referentni data centar odabrana je snaga od 4 MW. Prosječna temperatura polaza je 35 °C, a povrata 17 °C, Slika 33 . Kao što je vidljivo na slika Slika 33 najveća količina topline je dostupna tijekom ljeta kada je najveća potreba za hlađenjem i to 7 MW.



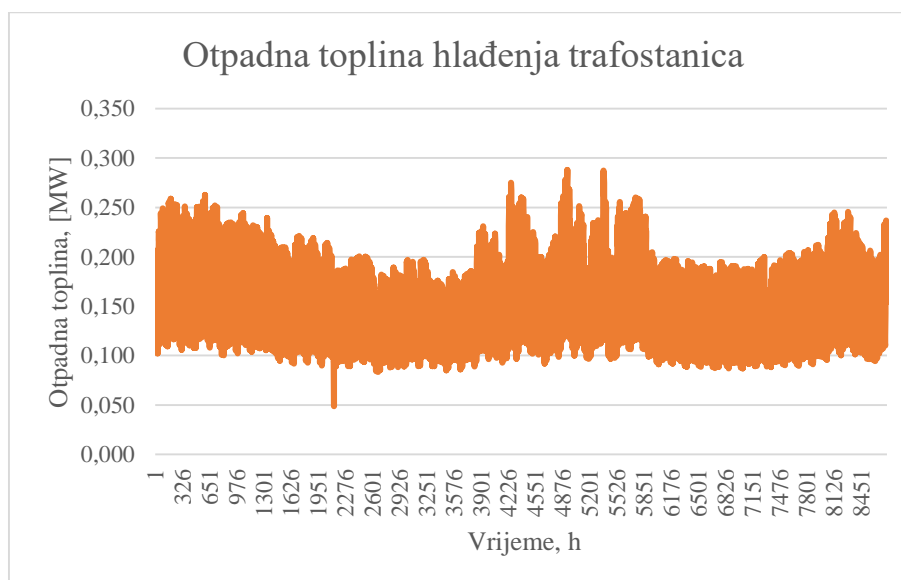
Slika 33: Količina otpadne topline – primjer hlađenja data centra



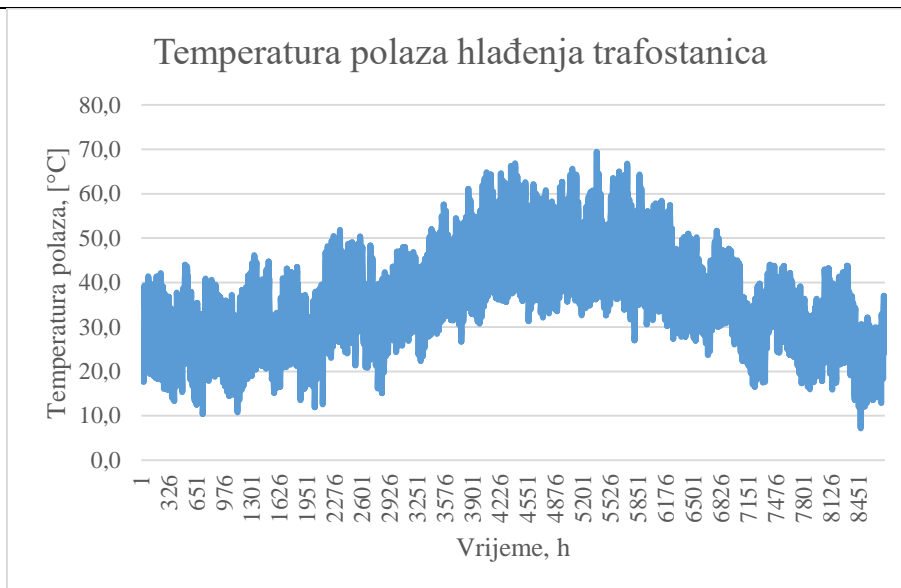
Slika 34: Temperatura polaza hlađenja podatkovnog centra

5.1.5. Iznos otpadne topline hlađenja trafostanica

Za referentnu trafostanicu od 110/10 kV te dva transformatora nazivne snage 80 MVA iznos otpadne topline prikazan je na Slika 36. Prosječna temperatura polaza prikazana na Slika 36 je 42 °C, a povrata 26 °C. Trafostanice s 80 MVA nazivne snage čine 75 % ukupnog broja trafostanica te 60 % ukupne snage odabranih instaliranih trafostanica. Povrat topline, kako je prikazano na Slika 35, moguće je iskoristiti tijekom cijele godine i to oko 0,2 MW.



Slika 35. Količina otpadne topline – primjer hlađenja trafostanica

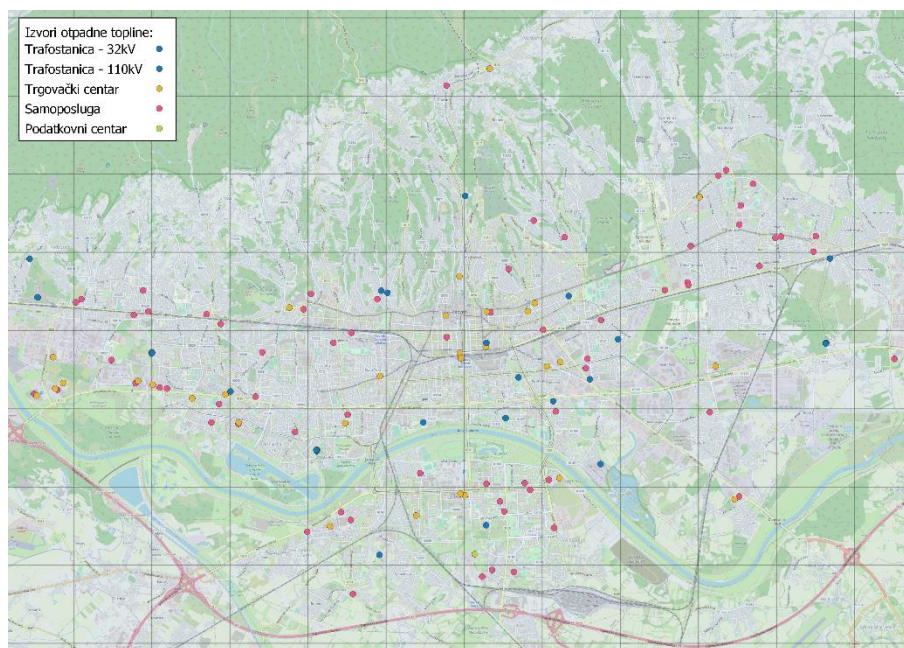


Slika 36: Temperatura polaza hlađenja trafostanica

5.2. Scenarijska analiza

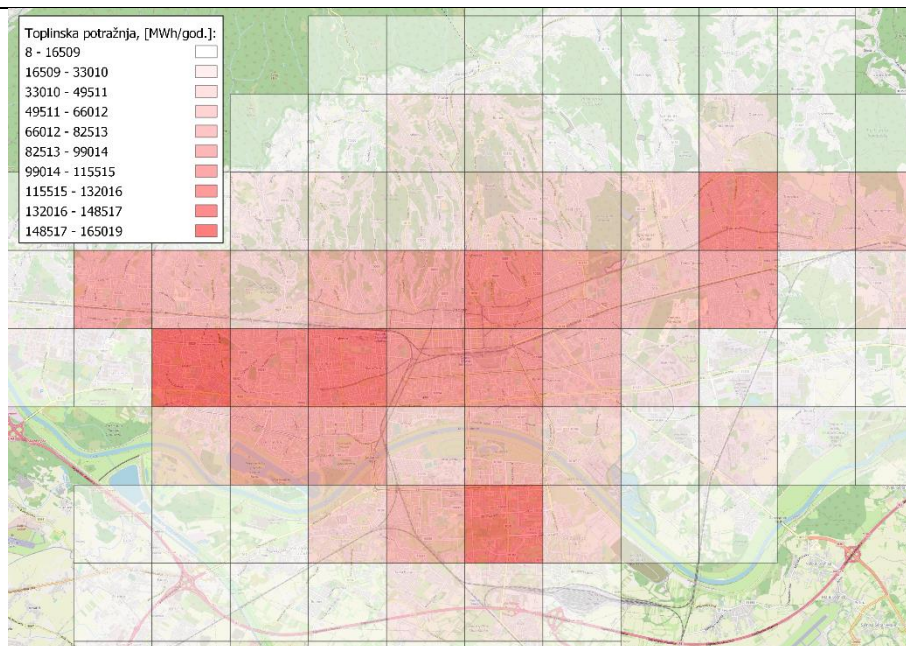
5.2.1. Scenariji X

U scenariju X površina Zagreba je podijeljena na 103 distrikta površine 625 ha prikazanih na Slika 37 gdje su vidljivi mapirani izvori otpadne topline. U analizi rezultata su promatrani samo distrikti u kojima se nalaze izvori otpadne topline.



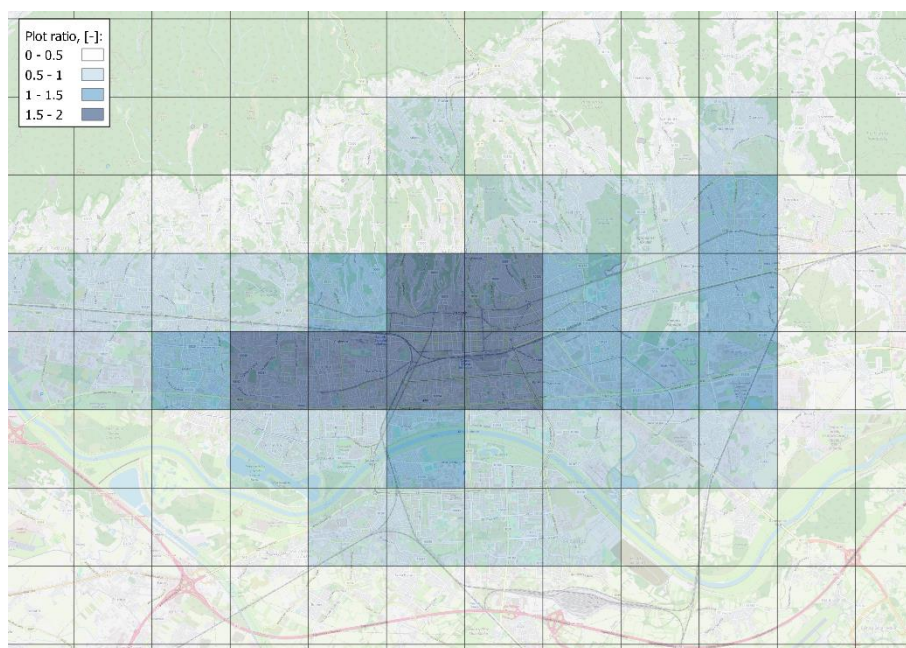
Slika 37: Položaj izvora otpadne topline - 625 ha

Na Slika 38 prikazane su toplinske potrebe grada Zagreba za grijanje i pripremu potrošne tople vode koje su stupnjevane crvenom bojom, gdje tamnija nijansa označava veće iznose toplinskih potreba, a svijetlije nijanse označuju manje toplinske potrebe.



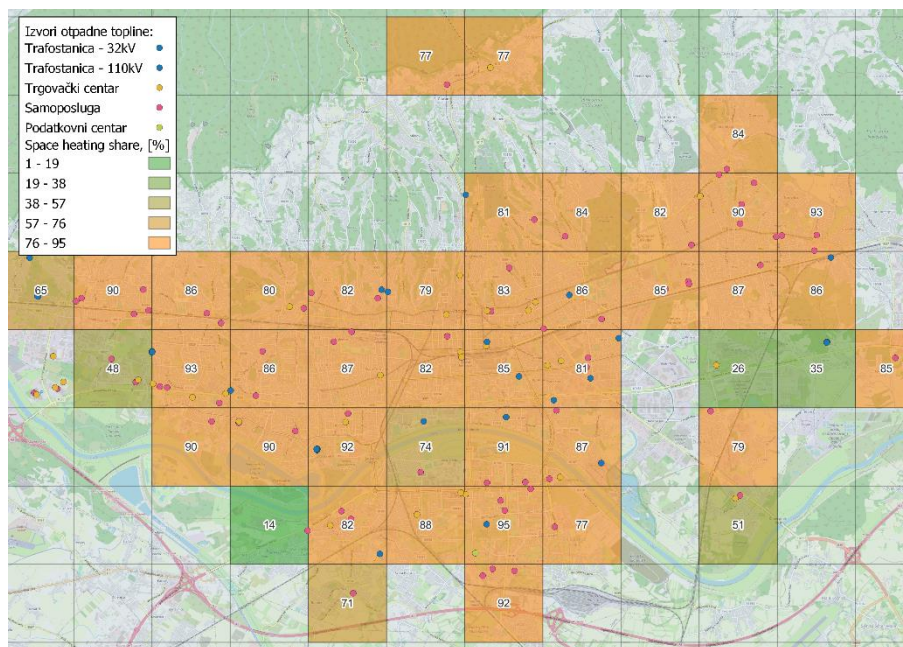
Slika 38: Toplinske potrebe grada Zagreba – 625 ha

Slika 39 prikazuje omjere površina zgrada koje se nalaze u distriktu te ukupne površine distrikta. Vidljivo je kako omjer varira između 1,5 i 2 za gusto naseljena područja u središtu grada dok je taj omjer nešto niži u prigradskim područjima.



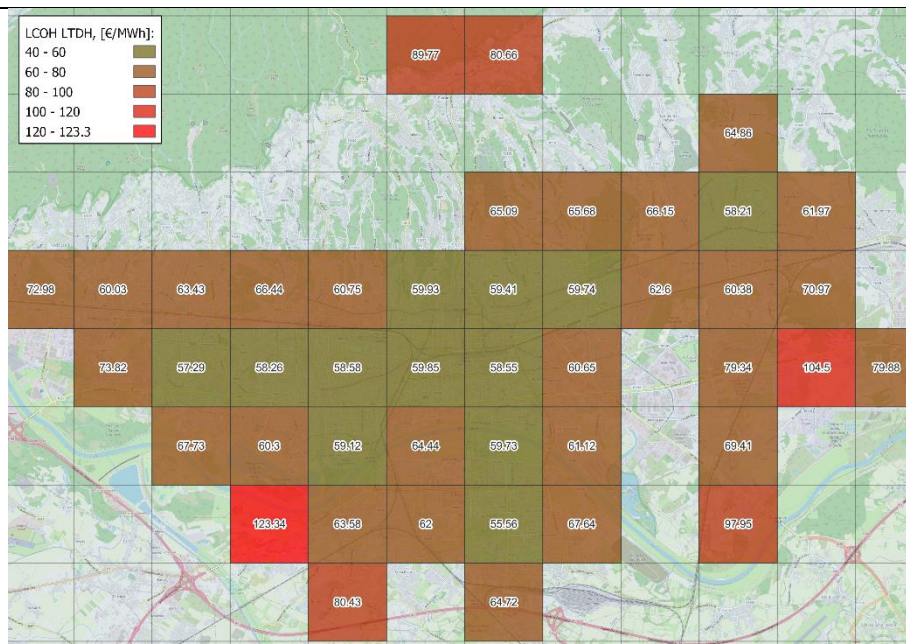
Slika 39: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 625 ha

Postotak grijanog područja prikazan je na Slika 40 te pokazuje da oko 80 % toplinskih potreba jesu posljedica toplinskih potreba za grijanje. Gledano na ovoj prostornoj razini, energetska učinkovitost zgrada u gradu Zagrebu je niska u većem dijelu grada, stanje se poboljšava približavanjem prigradskom području gdje se pretežito nalazi novogradnja koja se odlikuje boljim energetskim svojstvima.



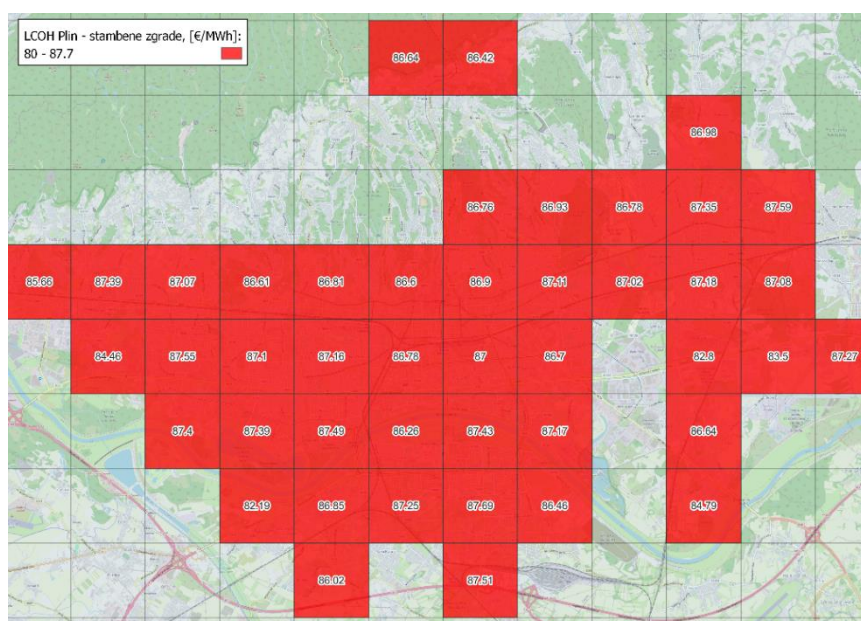
Slika 40: Postotak grijanog područja – 625 ha

Na Slika 41 prikazani su rezultati analize ako bi se u distrikte koji imaju dostupne izvore otpadne topline oni integrirali te iz njih zadovoljavala toplinska potreba. Vidljivo je da je iznos LCOH niži u središtu grada gdje je viši omjer grijane površine, a niža energetska učinkovitost zgrada, dok je obrnuto u prigradskim područjima. Iz navedenog se može zaključiti kako će veći utjecaj na rezultate analize imati omjer grijane površine nego udio toplinskih potreba za grijanje. Najveći LCOH iznosi 123,34 €/MWh te je na slici prikazan crvenom bojom. U tom slučaju integrirani izvor otpadne topline je samoposluga. Dostupna količina otpadne topline je 826 MWh/godišnje, a toplinske potrebe distrikta su 4830 MWh/ha. S obzirom da su toplinske potrebe distrikta veće od dostupne količine topline potreban je rad dodatne rezervne jedinice koja je dizalica topline u promatranoj analizi rezultata. Najniži LCOH iznosi 55,6 €/MWh te su izvori otpadne topline u tom distriktu trafostanica, samoposluge, trgovački centar i podatkovni centar. Ukupna toplinska potreba distrikta je 140675 €/MWh, a dostupna količina otpadne topline je 20313 MWh/godišnje. I u tom distriktu za zadovoljavanje toplinskih potreba potreban je rad rezervne jedinice. Prosječno LCOH iznosi oko 70 €/MWh.



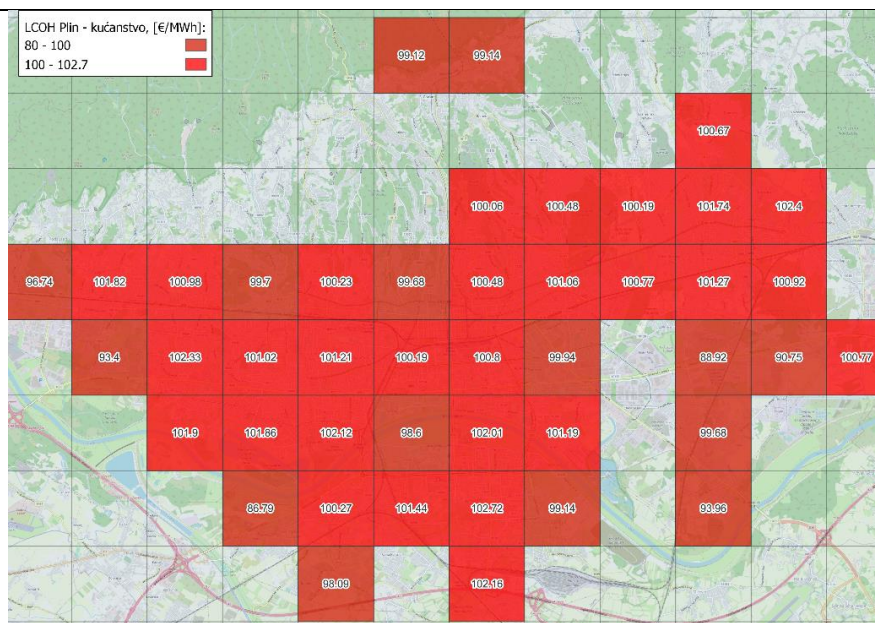
Slika 41: LCOH – LTDH – 625 ha

U scenarijskoj analizi napravljena analiza u slučaju kad bi sve stambene jedinice, tj. zgrade ili kuće priključile na plinsku mrežu ili na postojeći CTS koji je baziran na prirodnom plinu kao energentu. Na Slika 42 prikazani su iznosi LCOH u slučaju da se u distriktu nalaze samo zgrade te se sve toplinske potrebe zadovoljavaju iz plinskog kondenzacijskog kotla. Iznos LCOH u tom slučaju iznosi između 80 i 87 €/MWh.



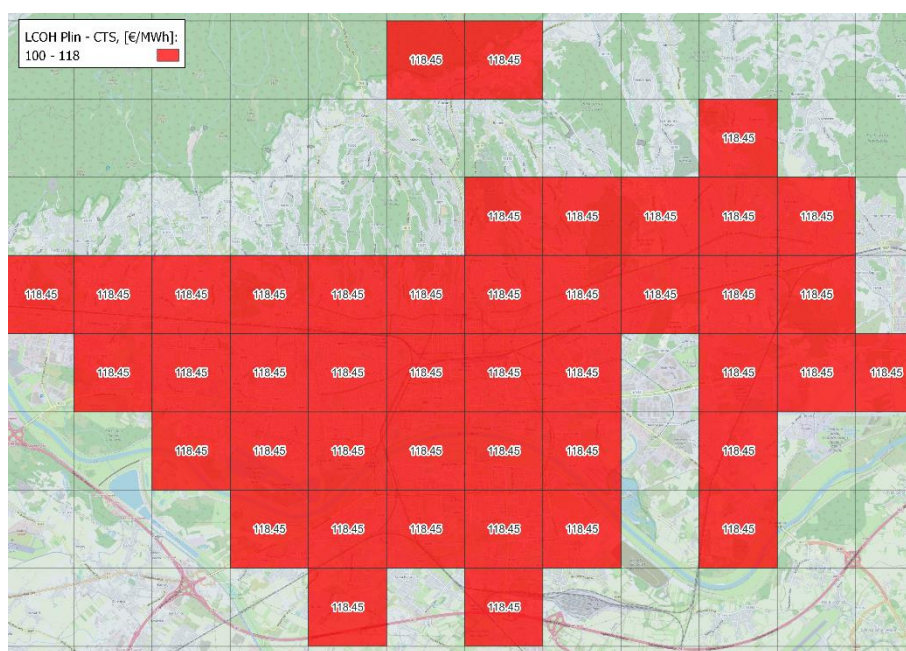
Slika 42: LCOH – plin – stambene zgrade – 625 ha

Na Slika 43 su prikazani su iznosi LCOH u slučaju da se u distriktu nalaze samo kuće te se sve toplinske potrebe zadovoljavaju iz plinskog kondenzacijskog kotla. LCOH tada iznosi od 80 do 102.7 €/MWh.



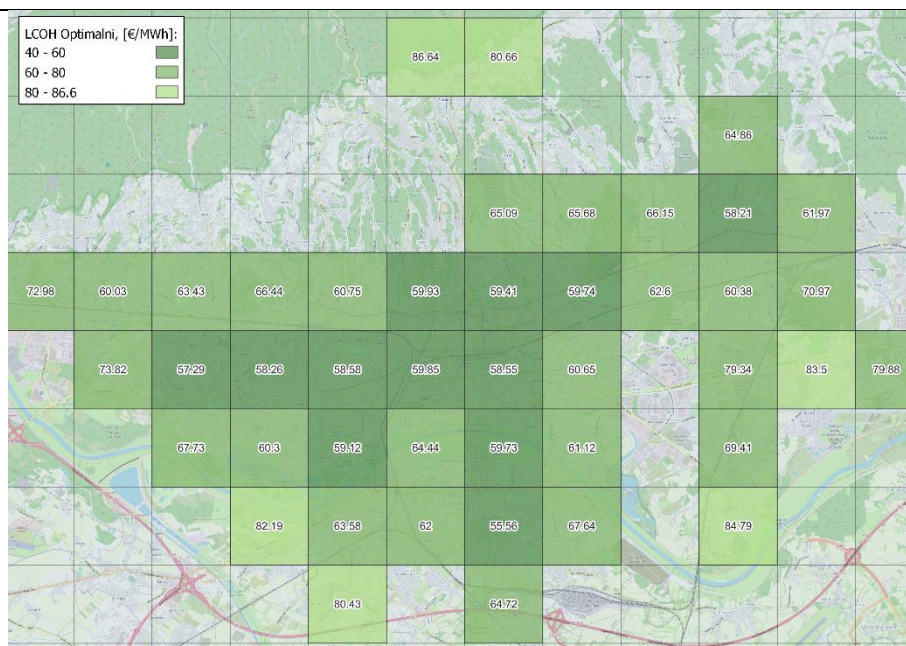
Slika 43: LCOH- plin – kućanstva – 625 ha

Trenutni LCOH centraliziranog toplinskog sustava grada Zagreba na plin iznosi 118,45 €/MWh što je vidljivo na Slika 44.



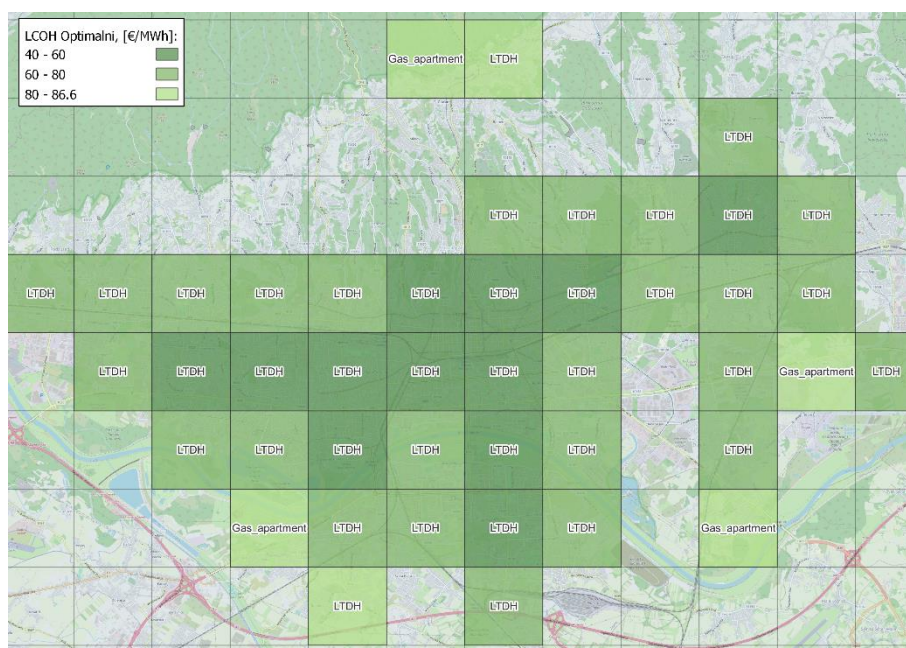
Slika 44: LCOH – CTS – plin – 625 ha

S obzirom na rezultate prikazane na Slika 1, 42, 43 određena je optimalna tehnologija za grijanje distrikta na principu da iznos LCOH bude minimalan. Na Slika 1 i 46 prikazan je minimalni iznos LCOH s obzirom na promatrane tehnologije te vrstu tehnologije koja bi se koristila za grijanje u tom slučaju. Na Slika 46 prikazani su iznosi optimalnog LCOH te oni poprimaju vrijednost od 40 do 60 za pojedine distrikte koji se uglavnom nalaze u središtu grada, ili od 60 do 86.6 za distrikte u predgrađu i okolici grada.



Slika 45: LCOH – optimalni - 625 ha

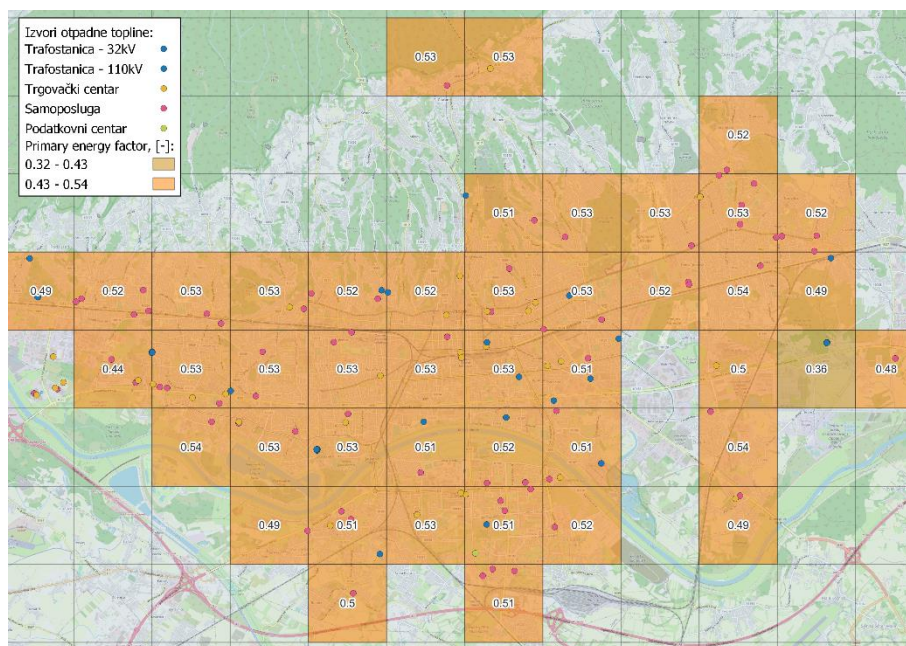
Na Slika 46 prikazan je izbor optimalne tehnologije za zadovoljavanje toplinskih područja prikazanih distrikta. Prema slici LTDH mreža mogla bi zadovoljiti toplinske potrebe većeg dijela promatranog područja iznimke su pojedini slučajevi na rubu grada gdje je još uvijek isplativije integrirati zgrade u plinsku mrežu zbog nedostatka otpadne topline.



Slika 46: LCOH - optimalni odabir tehnologije – 625 ha

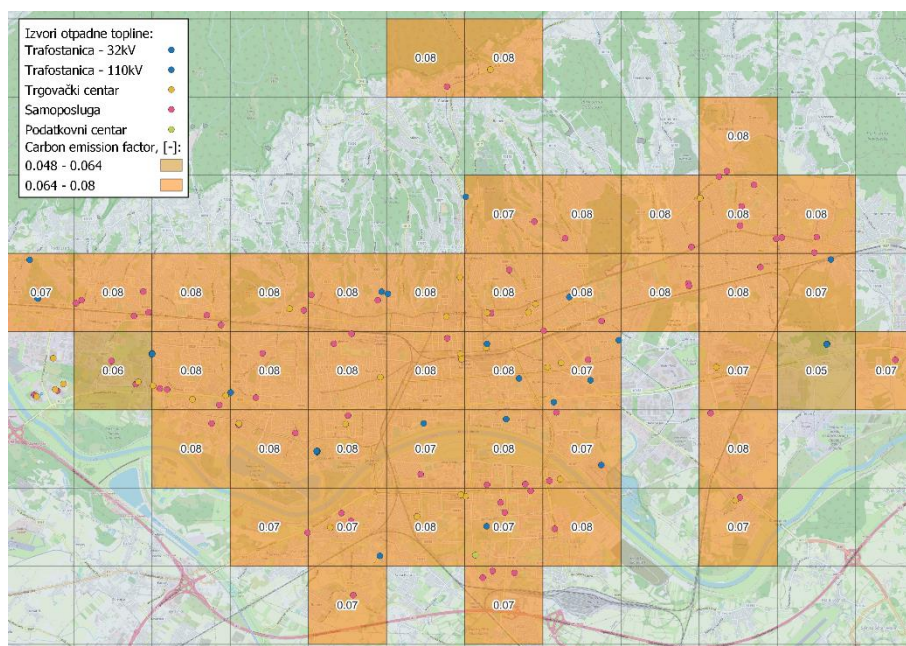
Na Slika 47 i Slika 47 prikazani su rezultati ekološke i energetske analize promatranih distrikta.

Faktor primarne energije pokazuje koliko se primarne energije koristi za proizvodnju jedinice električne energije ili jedinice korisne toplinske energije te za promatrane distrikte iznosi oko 0,5. Trenutni faktor primarne energije CTS mreže grada Zagreba iznosi 1,5 [36].



Slika 47: Faktor primarne energije - 625 ha

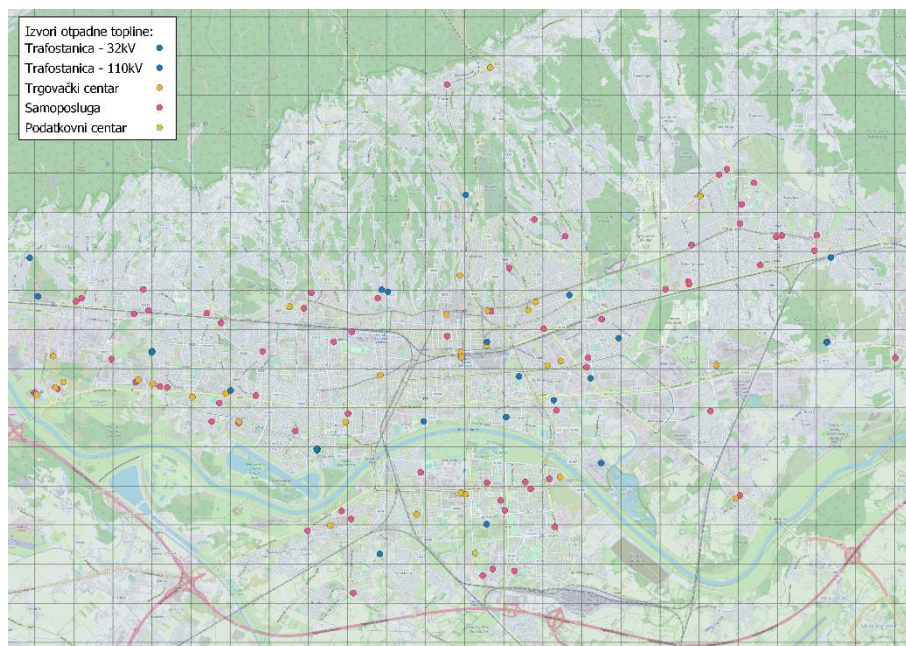
Faktor emisije CO₂, pokazuje koliko se emisija CO₂ proizvelo pri proizvodnji električne energije ili korisne toplinske energije. U prvom scenariju X za distrikte površine 625 ha faktor emisije ugljika prikazan na Slika 48 iznosi 0,08 za većinu distrikta. Minimalni faktor emisije CO₂ 0,06.



Slika 48: Faktor emisije ugljika - 625 ha

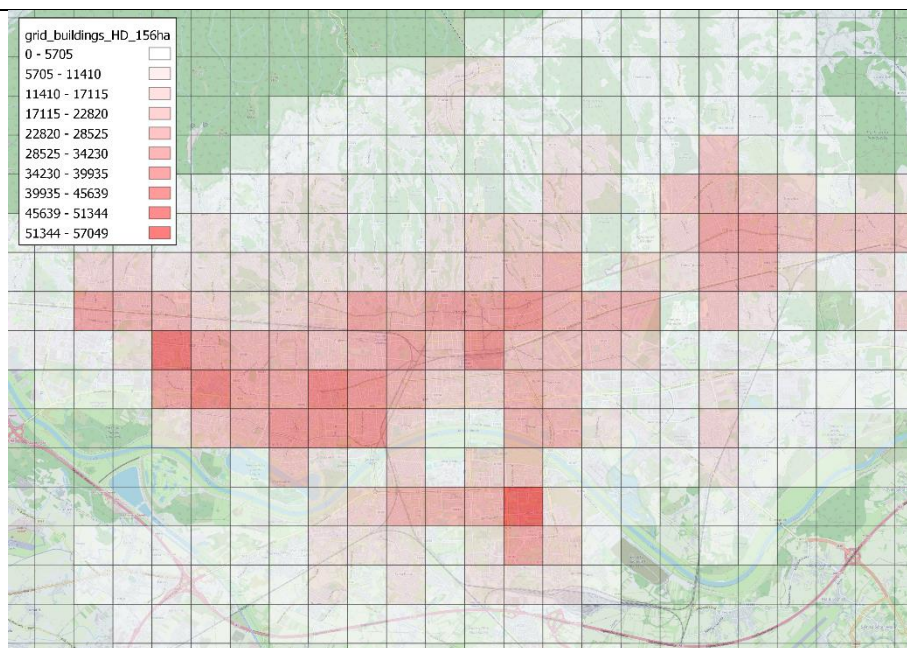
5.2.2. Scenariji Y

U drugom scenariju Y površina Zagreba je podijeljena na 410 distrikta površine 156 ha te su mapirani izvori otpadne topline što pokazuje Slika 49.



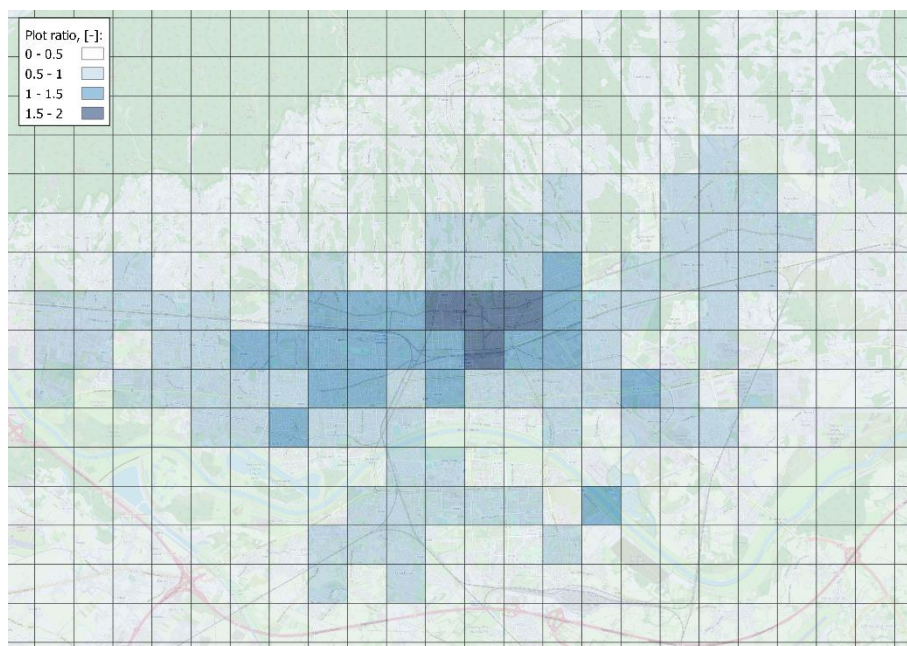
Slika 49: Izvori otpadne topline - 156 ha

Toplinske potrebe su prikazane na Slika 50 tamnijom crvenom bojom gdje su veće potrebe, a prema prigradskim područjima su sve manje potrebe prikazane svjetlijim nijansama. Rezultati gdje su prikazane toplinske potrebe za distrikte površine 625 ha, Slika 50 i Slika 50 toplinskih potreba za distrikte površine 156 ha vidljivo je kako se distribucija toplinskih potreba promijenila kada je manji distrikt.



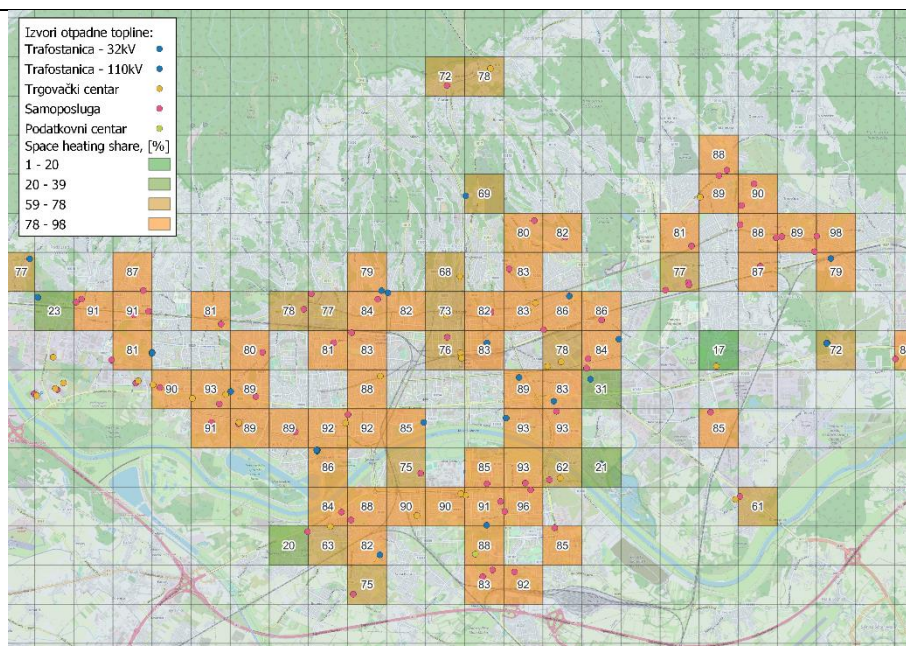
Slika 50: Toplinske potrebe grada Zagreba – 156 ha

Na Sliku 51 prikazan je omjer zgrada i ukupne površine. U središtu grada je najveći omjer između 1,5 i 2, a udaljavanjem iz središta omjer pada prema 1 jer je manja gustoća naseljenosti.



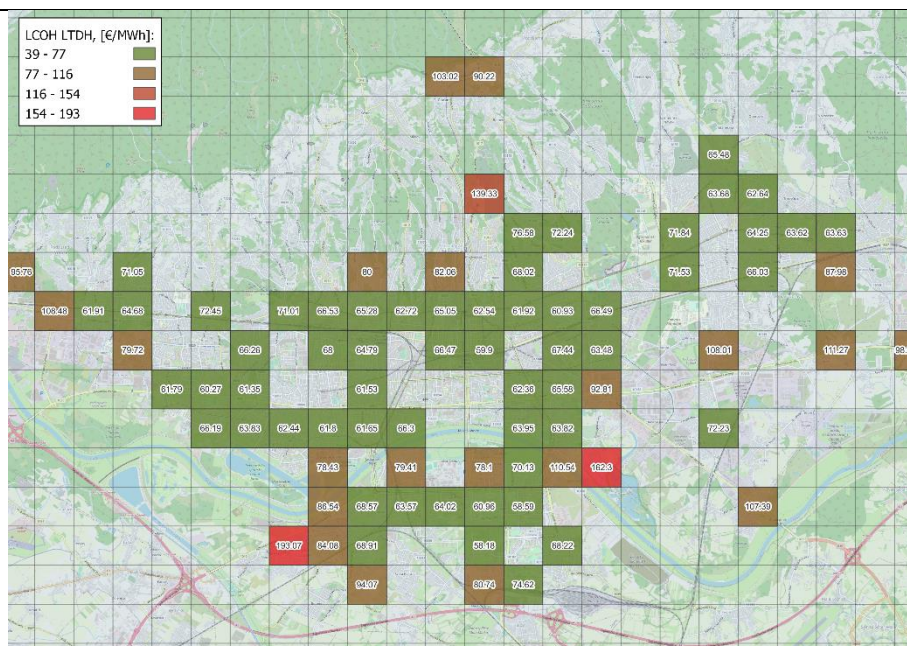
Slika 51: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 156 ha

Slika 52 pokazuje da su visoki postotci grijanog područja preko 85 % za veliku većinu distrikta, gdje postoje urbani toplinski izvori.



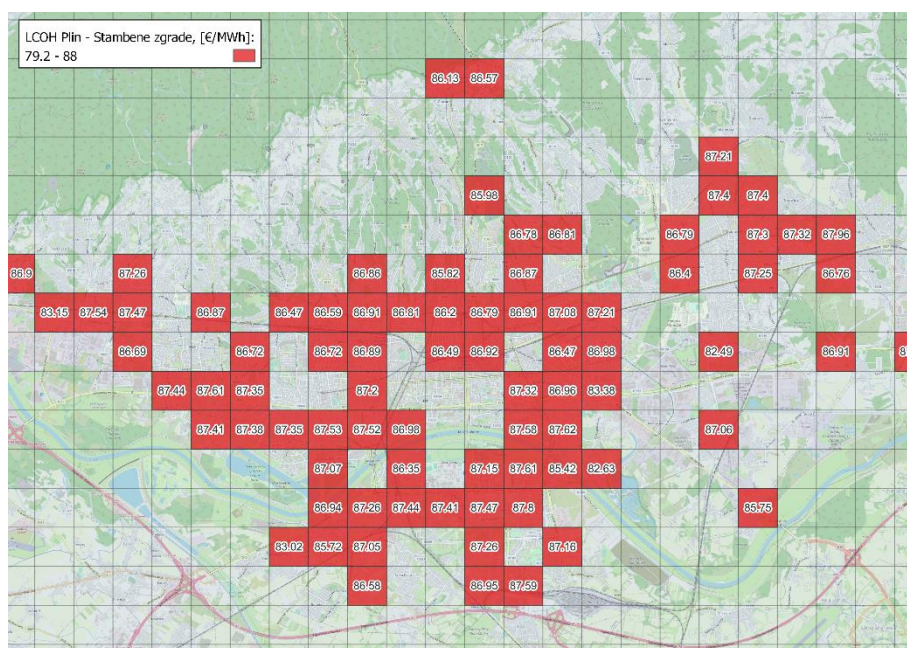
Slika 52: Postotak grijanog područja – 156 ha

Analizom LTDH mreže za svaki distrikt je izračunat LCOH prikazan na Slika 53. Promatrani su distrikti u kojima se nalaze izvori otpadne topline. Najveći LCOH je 193 €/MWh s toplinskim izvorom samoposluge. Dostupna količina otpadne topline iz samoposluge je 800 MWh/godišnje, a toplinske potrebe distrikta su 1510 MWh/ha. Za pokrivanje razlike toplinskih potreba potreban je rad rezervne dizalice topline. Najmanji LCOH je 58 €/MWh. U tom distriktu su izvori topline otpadne topline samoposluge. Dostupna količina otpadne topline je 830 MWh/godišnje, a toplinske potrebe distrikta su 57049 MWh/ha. Za zadovoljavanje ukupnih toplinskih potreba potreban je rad rezervne dizalice topline. LCOH ima prosječnu vrijednost oko 70 €/MWh. Manji dio distrikta ima LCOH iznad 100 €/MWh.



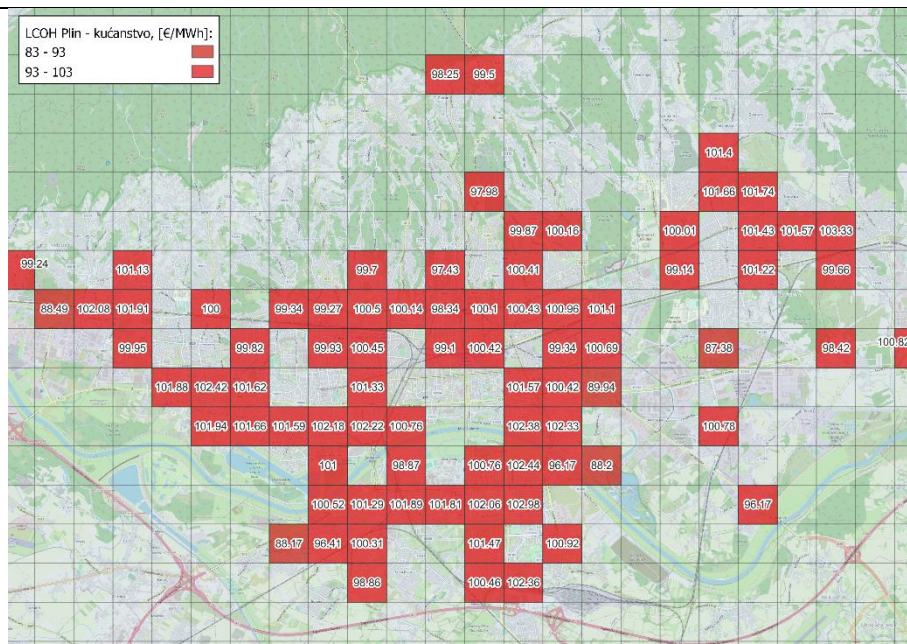
Slika 53: LCOH – LTDH – 156 ha

Za usporedbu rezultata analizira se slučaj da su sve stambene zgrade ili kuće na plinskoj mreži u svakom distriktu. Na Slika 54 LCOH za stambene zgrade tada iznosi između 80 i 88 €/MWh.



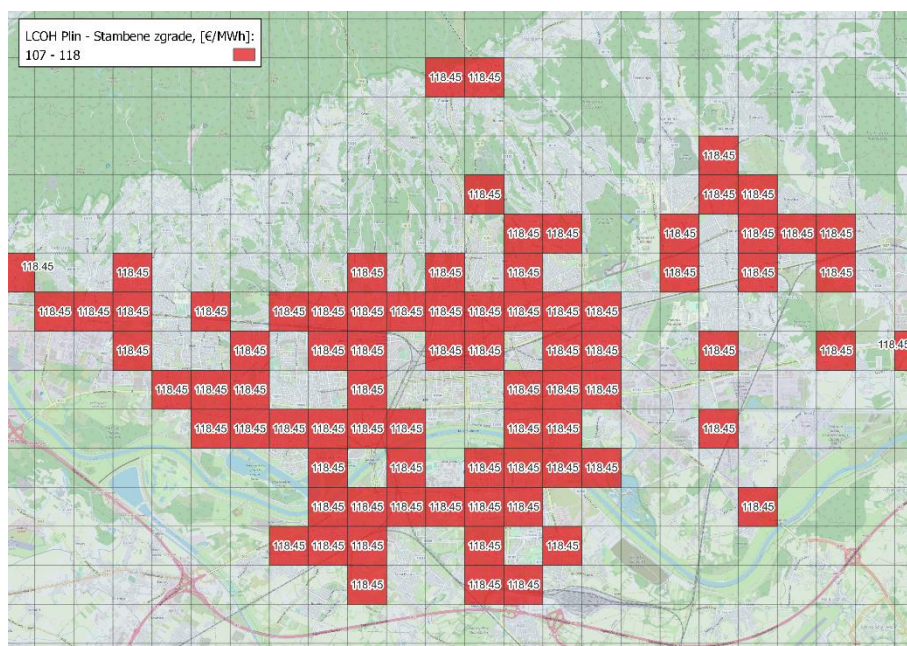
Slika 54: LCOH - plin- stambene zgrade – 156 ha

Na Slika 54 prikazan je LCOH ako su u distriktima sve kuće koje toplinske potrebe zadovoljavaju iz plinskih kondenzacijskih kotlova. Iznos LCOH je nešto veći nego za stambene zgrade te iznosi između 90 i 100 €/MWh.



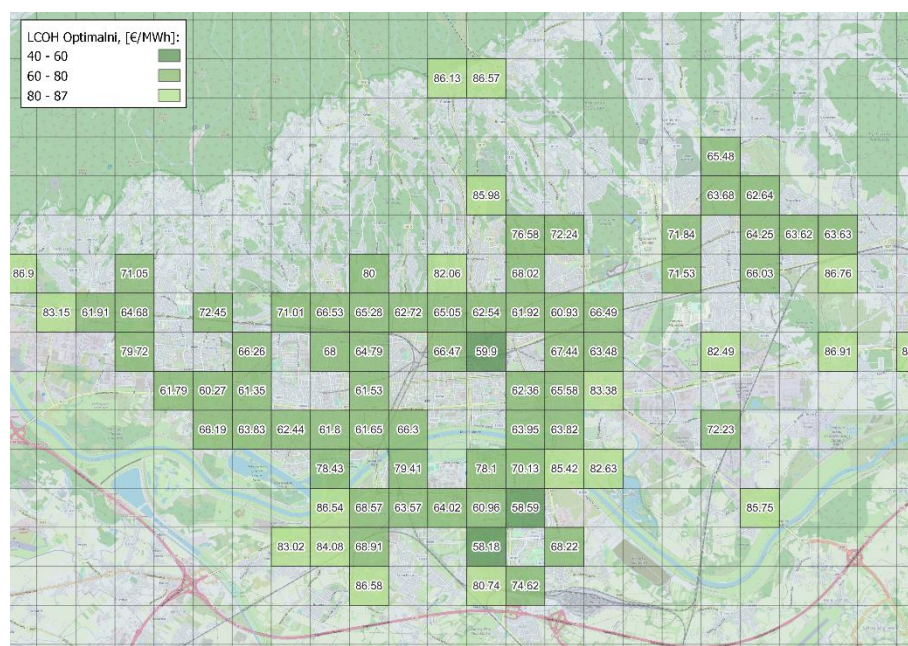
Slika 55: LCOH - plin kućanstva – 156 ha

Trenutni LCOH plinske mreže grada Zagreba je 118,45 €/MWh prikazan na Slika 57.



Slika 56: LCOH CTS – plin – 156 ha

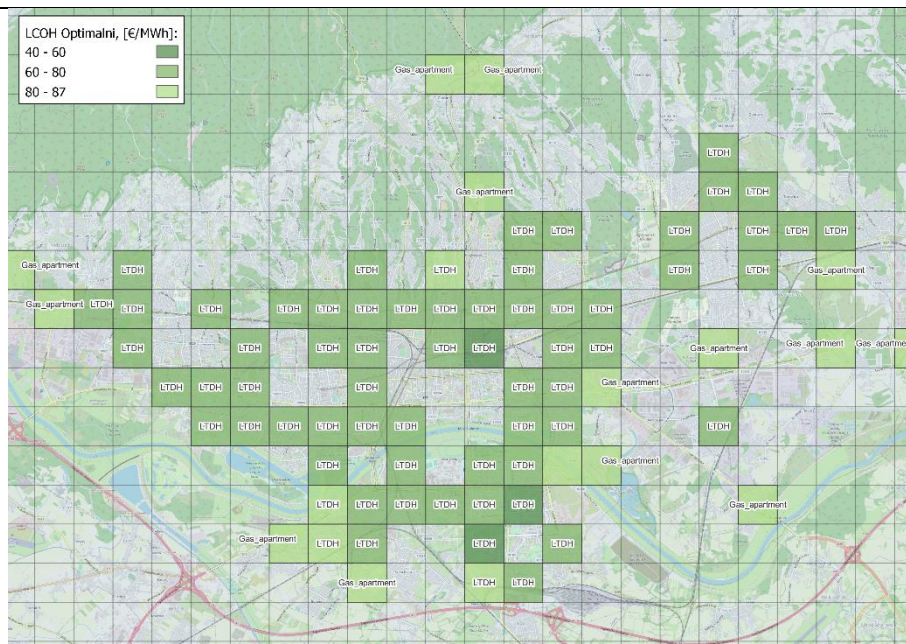
Analizom je izračunat optimalni LCOH za navedene distrikte prikazan na Slika 57. Optimalni LCOH iznosi oko 70 €/MWh te približno duplo manji nego trenutni LCOH plinske mreže vrijednosti 118 €/MWh prikazan na Slika 57.



Slika 57: LCOH - optimalni – 156 ha

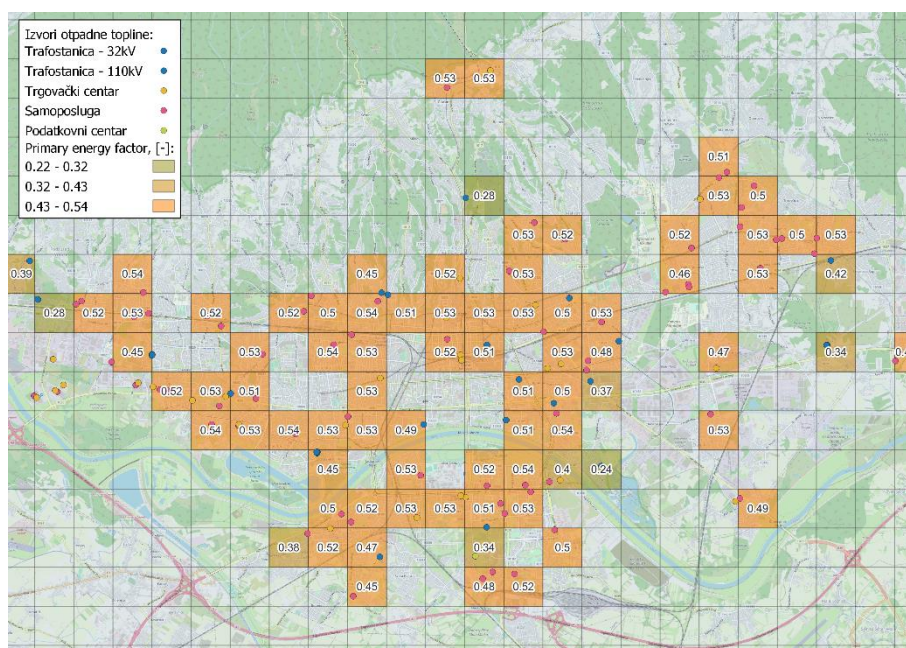
Uspoređujući tehnologije nove LTDH mreže, stambene zgrade na plinskom kondenzacijskom kotlu te kuće na plinskom kondenzacijskom kotlu određena je optimalna tehnologija svakog distrikta. Iz navedenog slijedi da je optimalna tehnologija nova LTDH mreža prikazana na Slika 59 za veći dio grada Zagreba jer je najniži LCOH.

U perifernim područjima je niži LCOH za stambene zgrade te je za ta područja i odabrana ta tehnologija. Vidljiva je isplativost integracije urbanih toplinskih izvora bez obzira na sve investicijske i operativne troškove.



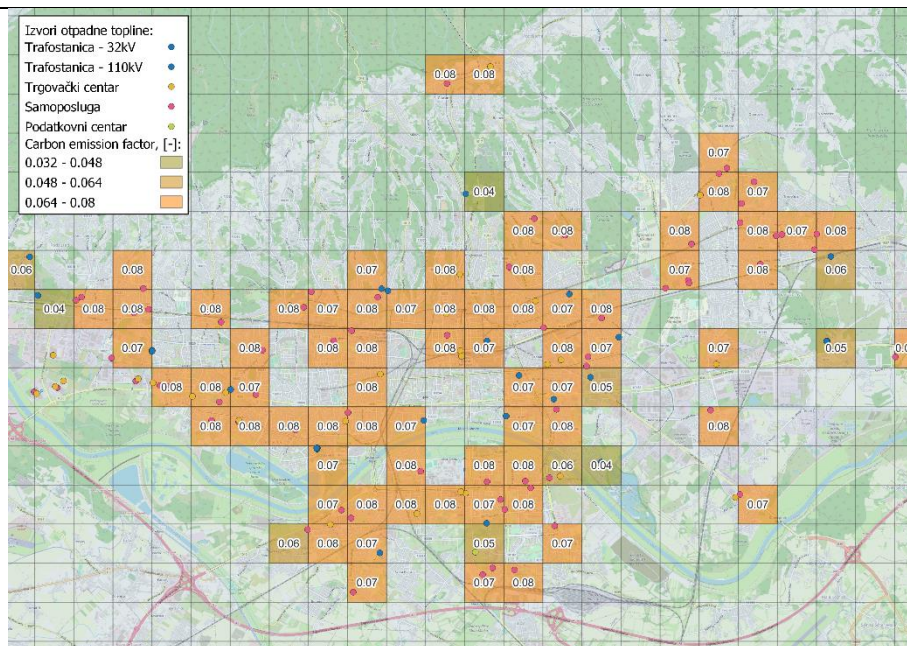
Slika 58: LCOH - optimalni odabir tehnologije – 156 ha

Provedena je ekološka i energetska analiza svakog distrikta promatrajući faktor primarne energije i faktor emisije CO₂. Faktor primarne energije pokazuje koliko se primarne energije koristi za pokrivanje toplinskih potreba. Prikazan je na Slika 59 te iznosi oko 0,5 za veliku većinu distrikta.



Slika 59: Faktor primarne energije – 156 ha

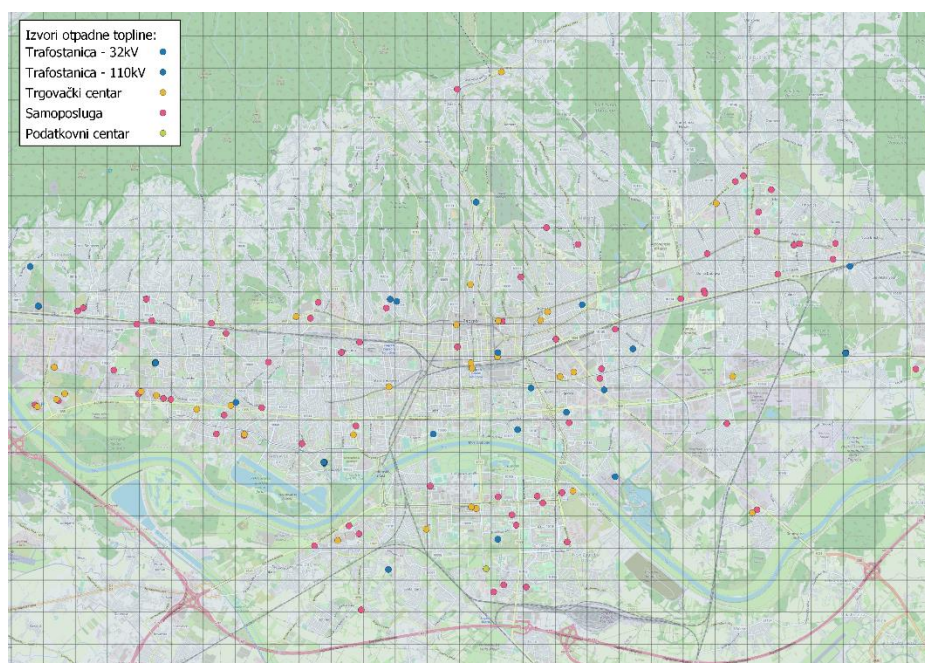
CO₂ faktor prati trendove faktora primarne energije. Kada se koristi više energije, više CO₂ emisija se ispušta u atmosferu. Prikazan je na Slika 59 te iznosi oko 0,08 za distrikte gdje postoji urbani izvori topline.



Slika 60: Faktor emisije ugljika - 156 ha

5.2.3. Scenariji Z

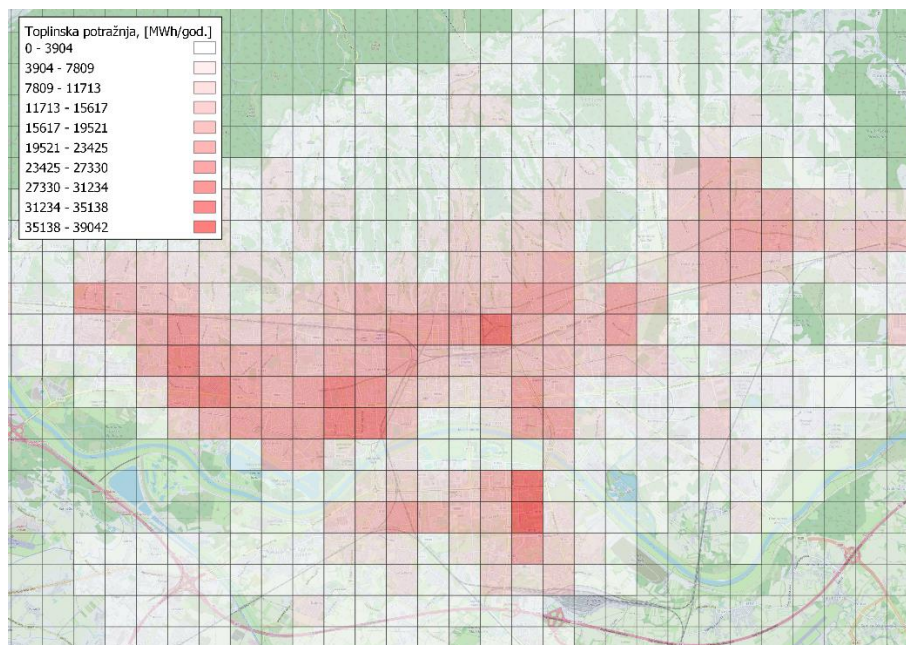
Za scenariji Z površina grada Zagreba je podijeljena na kvadrate površine 100 ha kao što je vidljivo na Slika 62 gdje su prikazane položaji izvora topline, odnosno samoposluge, trgovački centri, podatkovni centar te trafostanice.



Slika 61: Položaj izvora otpadne topline - 100 ha

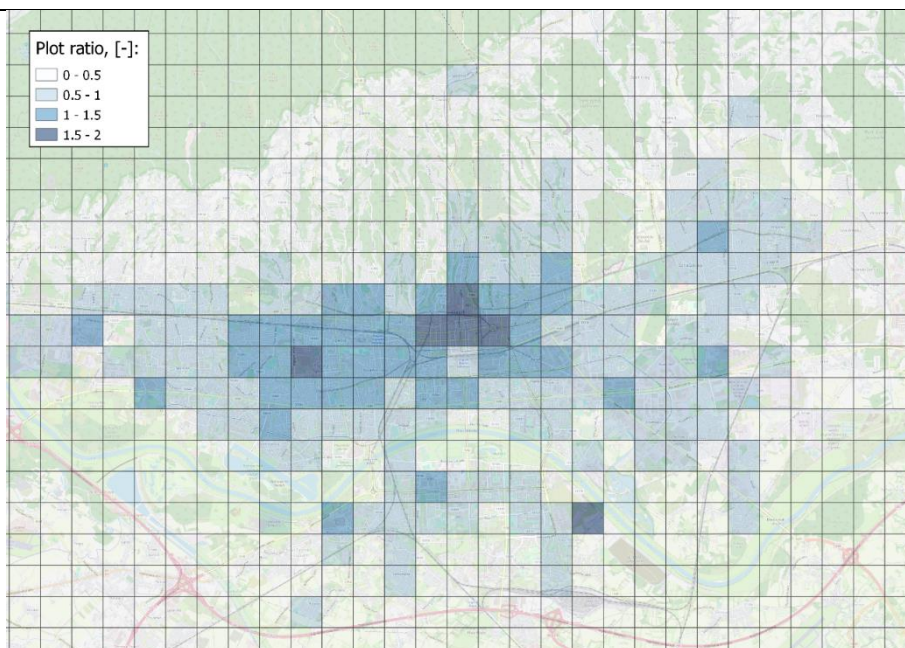
Na Slika 61 prikazane su toplinske potrebe cijelog grada Zagreba podijeljenog na distrikte površine 100 ha.

Tamnija crvena boja prikazuje područja gdje su veće toplinske potrebe, a prema svjetlijoj crvenoj su sve manje potrebe za grijanje i pripremu potrošne tople vode. U ovom scenariju Z površina distrikta je najmanja, 100 ha, te je vidljivo da su toplinske potrebe drugačije, detaljnije nego u scenarijima X i Y.



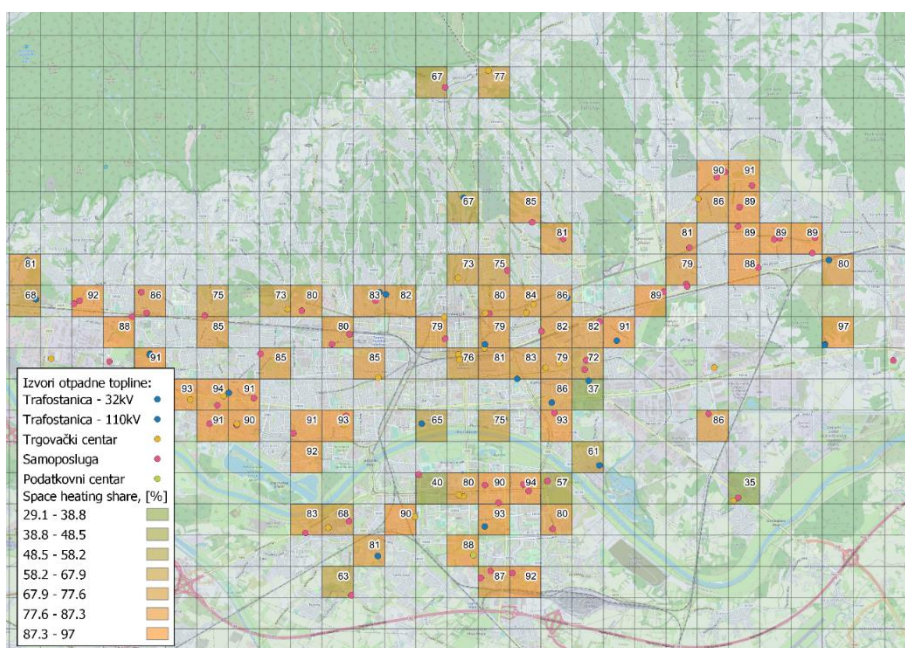
Slika 62: Toplinske potrebe grada Zagreba – 100 ha

U analizi rezultata u obzir su uzeti i omjer površine zgrade i ukupne površine te udio grijanog područja. Omjeri površina su uglavnom između 0,5 i 1,5 prema Slika 63. Očekivano je da će omjer biti veći u središtu grada, kako se ide prema vanjskom dijelu se iznos smanjuje što je u skladu s očekivanjima jer je manja gustoća naseljenosti.



Slika 63: Omjeri površina zgrada i ukupne površine – 100 ha

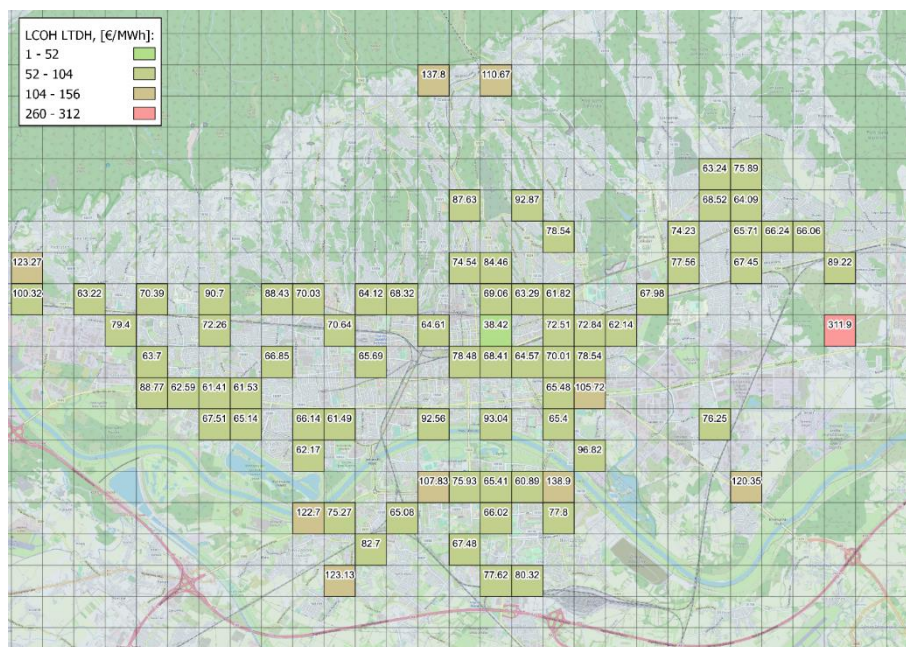
Na Slika 63 je prikazan udio grijanog područja koji je viši od 80%. Udio grijanog područja je veći u središtu grada jer su zgrade starije s lošijim energetske svojstvima.



Slika 64: Postotak grijanog područja – 100 ha

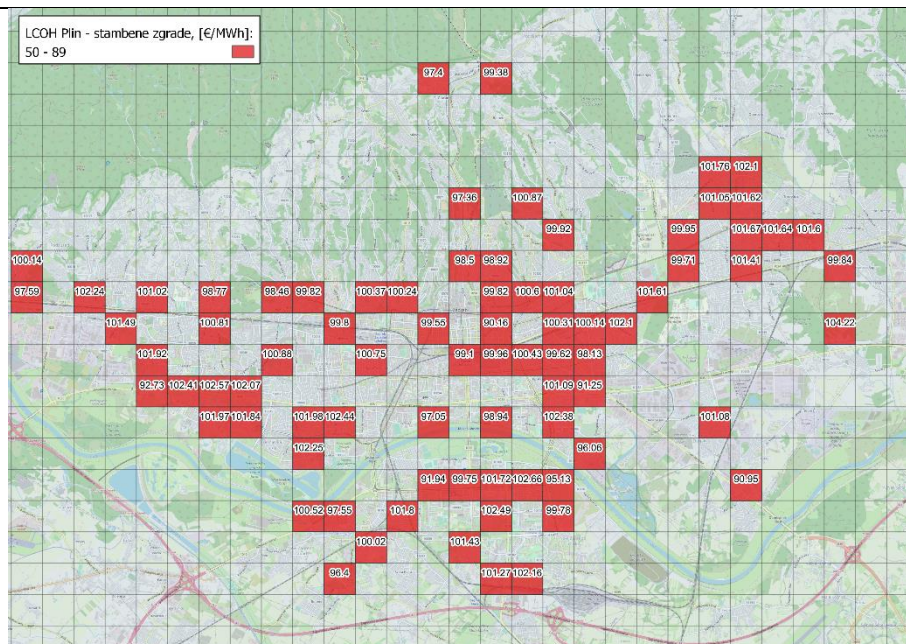
Nakon što su mapirani izvori otpadne topline analizira se koliko i kojih urbanih toplinskih izvora se nalazi u istom području, odnosno kvadratiću kako i prikazuje Slika 64. Pomoću Excela se računa LCOH svakog područja ovisno o tome koja je mreža odabrana LTDH, NTDH, ULTDH. Na Slika 64 su prikazani rezultati za LTDH mrežu. Najveći LCOH je 311 €/MWh, prikazan crveno bojom sa trafostanicom koja je izvor otpadne topline.

Dostupna količina otpadne topline je 570 MWh/godišnje, a toplinske potrebe distrikta su 572 MWh/ha. U tom slučaju čak nije potreban rad rezervne jedinice. Najmanji LCOH je 38,42 €/MWh označen zelenom bojom. Izvor otpadne topline je trafostanica sa dostupnom otpadnom toplinom 2780 MWh/ godišnje, a toplinske potrebe područja su 32176,565 MWh/ha. Iz navedenog slijedi da je za pokrivanje ukupnih toplinskih potreba potreban rad rezervne jedinice.



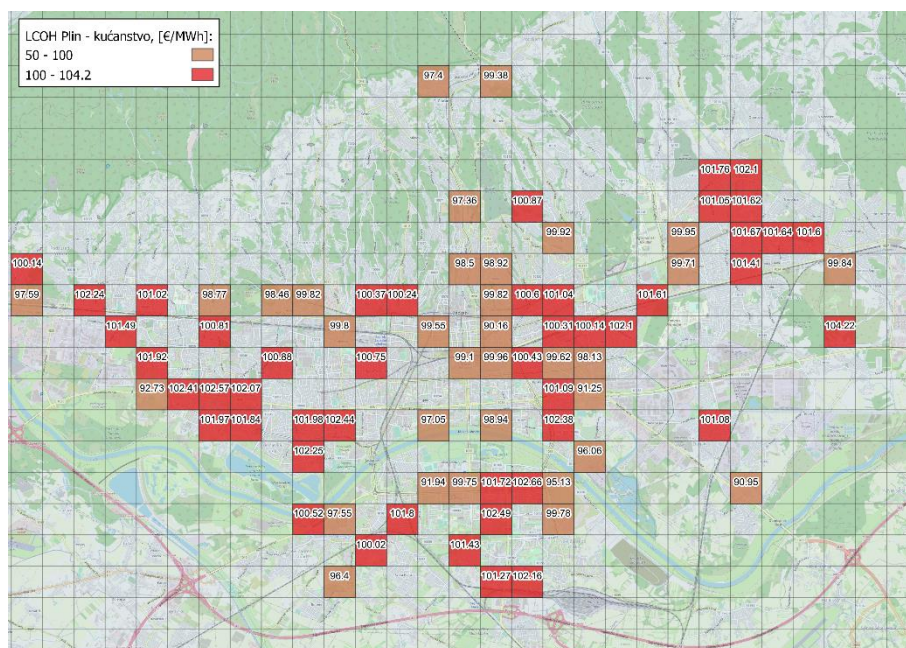
Slika 65: LCOH – LTDH- 100 ha

Za usporedbu rezultat promatran je slučaj da su u distriktima sve stambene zgrade koje zadovoljavaju sve toplinske potrebe plinskim kondenzacijskim kotlom. Tada je LCOH prosječno 95 €/MWh prikazan na Slika 64.



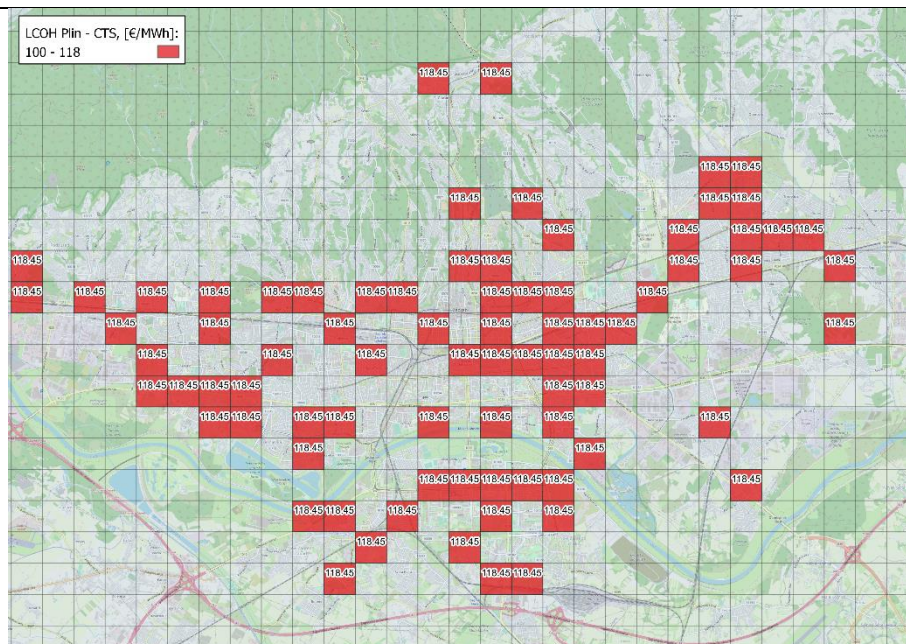
Slika 66: LCOH – plin - stambene zgrade – 100 ha

Također je promatran slučaj da su sve kuće u distriktima koje imaju plinski kondenzacijski kotao te je izračunata vrijednost LCOH kako prikazuje Slika 64. U tom slučaju je prosječna vrijednost LCOH 100 €/MWh.



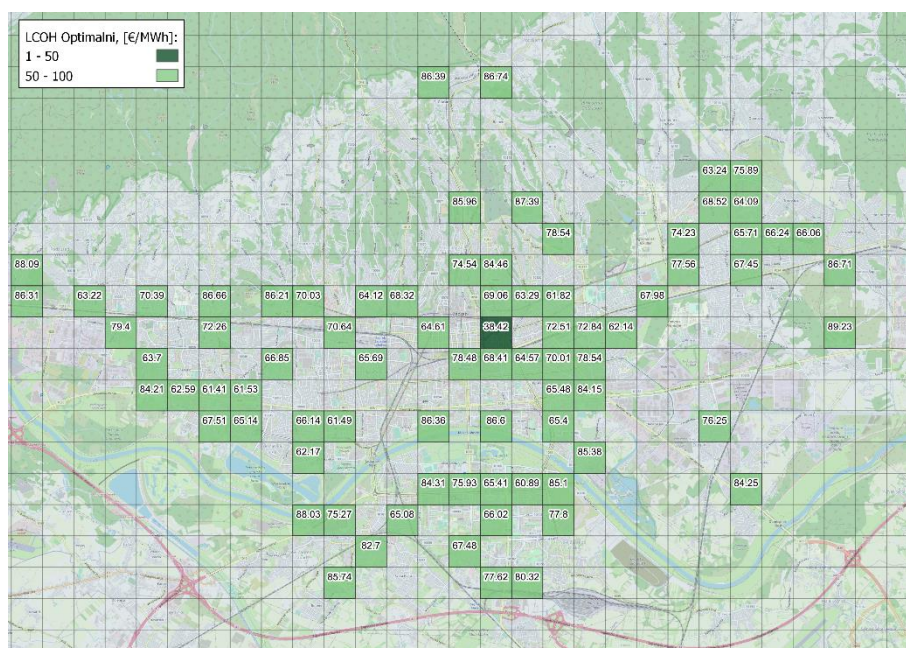
Slika 67: LCOH – plin – kućanstva – 100 ha

Trenutna toplinska mreža grada Zagreba je toplinska i njezin LCOH je 118,45 €/MWh kao što je vidljivo na Slika 68.



Slika 68: LCOH – plin – CTS – 100 ha

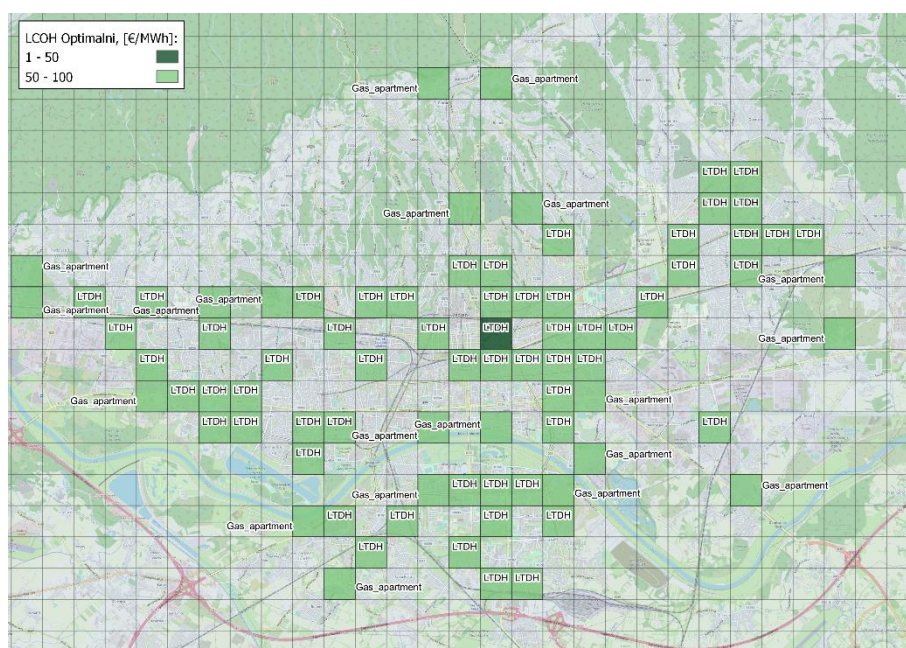
Analiza pokazuje da je pri integraciji urbanih toplinskih izvora LCOH manji od 100 €/MWh za veliku većinu područja uključujući sve investicijske troškove i troškove održavanja prema Slika 69.



Slika 69: LCOH – optimalni – 100 ha

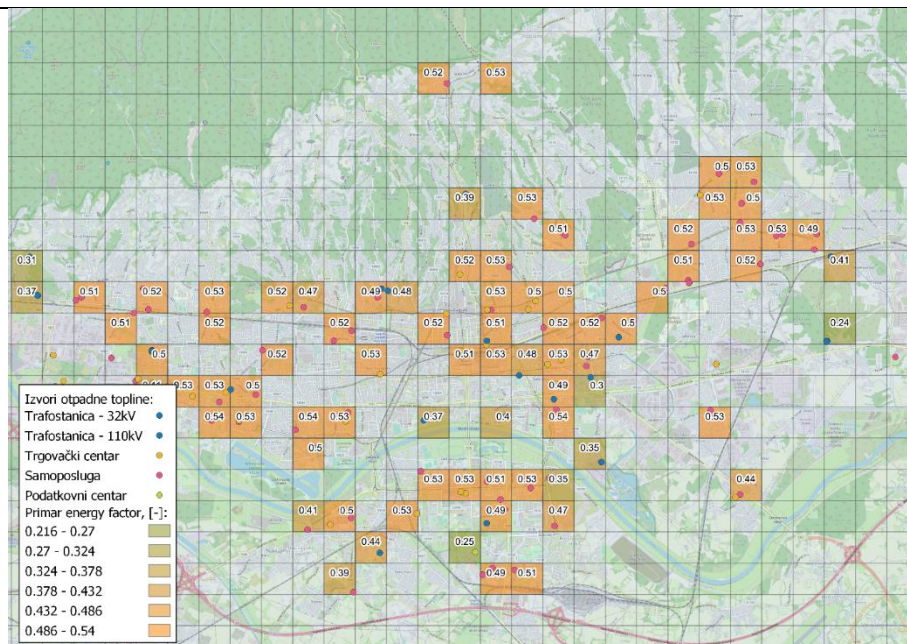
Uzimajući u obzir sve tri promatrane tehnologije, nova LTDH mreža, stambene zgrade i kuće na plinskom kondenzacijskom kotlu odabrana je optimalna tehnologija svakog distrikta prema tome koja tehnologija ima najniži LCOH. Na Slika 70 su vidljivi rezultati.

Promatrajući odabrane tehnologije u scenariju X i Y, vidljivo je da je u scenariju Z malo drugačiji udio optimalnih tehnologija. Veća je zastupljenost stambenih zgrada na plin.



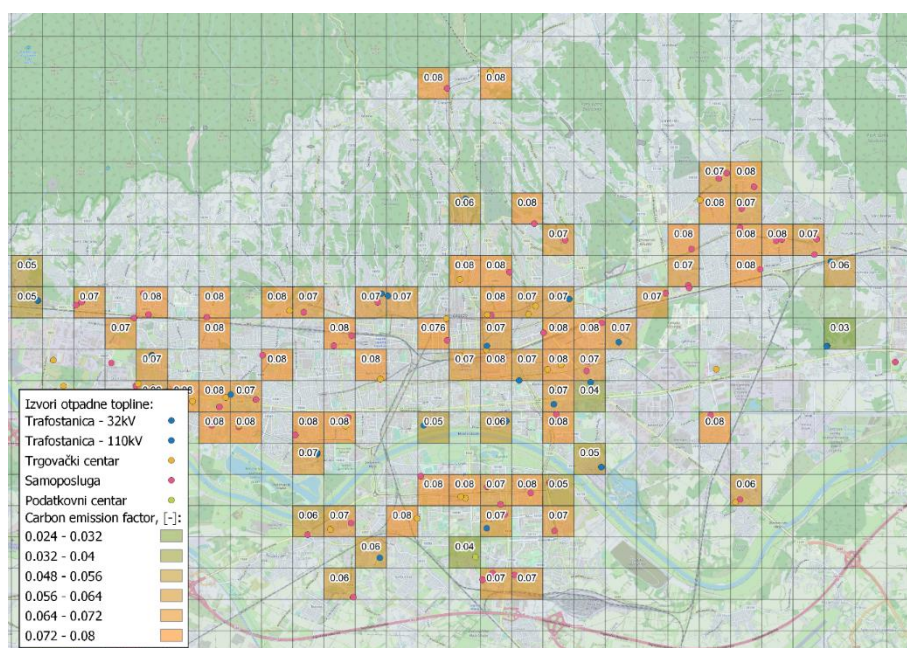
Slika 70: Optimalni odabir tehnologije – 100 ha

Faktor primarne energije pokazuje koliko se primarne energije koristi za proizvodnju jedinice električne energije ili jedinice korisne toplinske energije. Vrijednost se računa za svaki scenarij koji se razlikuje od ostalih u potrošnji energije. Najprije se ukupna potrošnja električne energije ili plina preračuna u primarnu energiju. Rezultat se zatim podijeli na ukupnu godišnju potražnju za toplinom kako bi se izračunao faktor svakog scenarija. Rezultati za Zagreb su vidljivi na Slika 71.



Slika 71: Faktor primarne energije – 100 ha

Faktor emisije ugljika pokazuje koliko je CO₂ plinova ispušteno u atmosferu da bi se proizvela jedinica električne energije ili jedinica iskoristive toplinske energije. Vrijednost se računa za svaki scenarij koji se razlikuje od drugih u potrošnji energije. Najprije je ukupna potrošnja električne energije ili plina preračunata u ekvivalentnu količinu emisija ugljičnog dioksida. Rezultat je zatim podijeljen na ukupnu godišnju potražnju za toplinom kako bi se izračunao CEF za svaki scenarij. Prema Slika 72 najveći faktor emisija je gdje je najveća gustoća naseljenosti.



Slika 72: Faktor emisije ugljika – 100 ha

6. ZAKLJUČAK

Centralizirani toplinski sustavi nove generacije odlikuju se nižim temperaturama te je njihova primjena trenutno na manjim područjima zastupljenosti. Otpadna toplina je sav toplinski nusprodukt koji nastaje tijekom nekog određenog procesa te je ispušten u okoliš na određenoj temperaturi i količini. U ovom diplomskom radu određena je metoda integracije otpadne topline u postojeći centralizirani toplinski sustav. Ulazni podaci za metodu su ukupne toplinske potrebe grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode grada Zagreba. Mapirani su urbani toplinski izvori koji imaju toplinski potencijal, a to su rashladni sustavi i sustavi hlađenja samoposluga, sustavi hlađenja trgovačkih centara, podatkovnih centara i trafostanica. Iznos otpadne topline svakog promatranog modela je dobiven pregledom literature termodinamičkih modela. Pomoću programskog paketa *QGIS* napravljena je prostorna analiza tako što je promatrana površina grada Zagreba podijeljena na određene distrikte od 625 ha, 156 ha i 100 ha. Rezultati su prikazani za svaki "kvadratić" za sva tri scenarija X,Y,Z analizirajući koliko i kojih se izvora otpadne topline nalazi u promatranom "kvadratiću". Radi preglednosti rezultati prostorne, ekonomske i ekološke analize su prikazani pomoću *QGIS-a*. Trenutni LCOH plinske mreže grada Zagreba je 118,45 €/MWh. Za usporedbu isplativost izgradnje nisko-temperaturnog CTS-a u Zagrebu rezultati su uspoređeni s najčešće korištenim tehnologijama za pokrivanje toplinskih potreba u Gradu Zagrebu, a to su plinski kondenzacijski kotlovi za kućanstva, zgrade te CTS koji je baziran na plinskim kotlovima te kogeneracijskim postrojenjima. U scenariju X iznos optimalnog LCOH je između 60 – 80 €/MWh te je za nekoliko distrikta ipak bolje priključenje na plinsku mrežu nego integracija nove toplinske mreže. Isto se pokazalo u scenariju Y gdje je u prigradskim područjima optimalnija tehnologija plinske mreže. U scenariju Z iznos optimalnog LCOH je između 60 – 90 €/MWh. Rezultati pokazuju da je u većini distrikta isplativija nova LTDH mreža, ali ipak postoji određen broj distrikta gdje je bolja isplativost plinske mreže. Najbolji je scenarij Y prema prosječnom iznosu LCOH kada su površine distrikta 156 ha. Tada je radijus ekonomske isplativosti za dekarbonizaciju CTS sustava najisplativiji. Izazov prilikom integracije urbanih toplinskih izvora trenutno čini njihova prostorna raspršenost, vremenska dostupnost otpadne topline kroz godinu te prostorna ograničenost u pokrivanju toplinskih potreba krajnjih korisnika. Metodom je pokazana ekonomska isplativost integracije urbanih toplinskih izvora u mreže CTS – a za određene ispitane površine distrikta te je vidljivo da položaj izvora topline ima utjecaj na isplativost.

Utvrđeno je da je, neovisno o scenariju ekonomski i termodinamički gledano najefikasnije iskoristavati potencijale rashladnih uređaja trafostanica i podatkovnih centara jer oni zahtijevaju konstantno hlađenje tijekom cijele godine.

LITERATURA

- [1] Community heat networks, <https://labmonline.co.uk/features/delivering-better-outcomes-heat-networks/>
- [2] Wiltshire, R.: Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems, Woodhead publishing series in energy, Number 87, Cambridge, UK, 2016.
- [3] Gudmundsson, O.: Distribution of district heating: 4th Generation, Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/distribution-district-heating-4th-generation-oddgeirgudmundsson?trk=mp-reader-card>
- [4] S.Buffa, A.Soppelsa, M.Pipiciello, G.Henze, R.Fedrizzi: „Fifth-Generation District Heating and Cooling Substations: Demand Response with Artificial Neural Network-Based Model Predictive Control“, Energies 2020
- [5] REWARDHeat planning schemes database
- [6] A. B. Petersen and G. Energi, “ReUseHeat Handbook - Experiences from other urban waste heat recovery investments,” no. 768936, 2017, [Online]. Available: http://toolbox.celsiuscity.eu/images/e/e1/Handbook25_cases_of_urban_waste_heat_recovery.pdf.
- [7] M. Karampour, S. Sawalha, and J. Arias, “Eco-friendly supermarkets - an overview Report 2,” pp. 1–53, 2016, [Online] Dostupno: www.supersmart-supermarket.org
- [8] A. Abdi, “Analysis of heat recovery in supermarket refrigeration using carbon dioxide as refrigerant , 2014.
- [9] “Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Systems and Equipment”, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
- [10] M.J. Piña: “Sustainable Shopping Centers: Strategies and Solutions for Retail Facility Managers”
- [11] H. Kauko, K.H. Kvalsvik, D. Rohde, N. Nord, Å. Utne, Dynamic modeling of local district heating grids with prosumers: A case study for Norway, Energy 151 (2018)
- [12] Excess heat from data centre in Val d’Europe, France, ReUseHeat Project, 2017.
- [13] Handbook for increased recovery of urban excess heat, ReUseHeat Project, 2017.
- [14] S. Golden: “The data center that warms homes with waste heat”, article, 2022.
- [15] R. Goić, D. Jakus, and I. Penović, Distribucija električne energije - interna skripta. Split: FESB, 2008.

- [16] Petrovic, S.; Bühler, F.; Radoman, U. Power transformers as excess heat sources. In Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2019), Wrocław, Poland, 23–28 June 2019.
- [17] Trbusic, M.; Marusa, R.; Pihler, J.; Hamler, A. Utilization of dissipated heat of power transformers. *Transform. Mag.* 2019, 6, 84–93
- [18] D. Žarko, “Zakoni sličnosti, zagrijavanje i hlađenje, vijek trajanja, tipska snaga, autotransformator, prenaponi, natpisna pločica - predavanja,” 2017.
- [19] CO2 refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach
- [20] J.Almebäck, R Magniusheat; Export from Supermarkets’ Refrigeration Systems
- [21] C. Mateu-Royo, S. Sawalha, A. Mota-Babiloni, and J. Navarro-Esbri, “High temperature heat pump integration into district heating network,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, no. December 2019, p. 112719, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112719.
- [22] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, “Program energetske učinkovitosti za dekarbonizaciju energetskeg sektora,” 2021.
- [23] ,Decarbonating the EU heating sector: Integration of the power and heating sector, JRC Technical Reports, European Commission, 2019.
- [24] E. Wheatcroft, H. Wynn, K.Lyngnerud, G.Bonvicini, D.Leonte, “The Role of Low Temperature Waste Heat Recovery in Achieving 2050 Goals: A Policy Positioning Paper
- [25] ECOS 2019 - Proc. 32nd Int. Conf. Effic. Cost, Optim. Simul. Environ. Impact Energy Syst., pp. 3435–3447, 2019
- [26] U. Persson and S. Werner, “Heat distribution and the future competitiveness of district heating,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 568–576, 2011.
- [27] U. Persson and S. Werner, “Effective width - The relative demand for district heating pipe lengths in city areas,” *12th Int. Symp. Dist. Heat. Cool.*, pp. 128–131, 2010.
- [28] W. Meesenburg, T. Ommen, J. E. Thorsen, and B. Elmegaard, “Economic feasibility of ultra-low temperature district heating systems in newly built areas supplied by renewable energy,” *Energy*, vol. 191, p. 116496, 2020.
- [29] J. Miškić, H. Dorotić, T. Pukšec, V. Soldo, N. Duić, “Optimization of data centre waste heat integration into the low-temperature district heating networks”, FSB

- [30] “Data Platform – Open Power System Data.” [Online]. Available: https://data.openpower-system-data.org/weather_data/2020-09-16. [Accessed: 22-Apr-2023]
- [29] S. M. Liao, T. S. Zhao, and A. Jakobsen, “Correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 20, no. 9, pp. 831–841, 2000, doi: 10.1016/S1359-4311(99)00070-8.
- [31] Prof.dr.sc. Željko Bogdan, Proračun cijena toplinske i električne energije u kogeneracijskom postrojenju, Zagreb, 2000.
- [32] K. Čuljak, “Diplomski rad,” Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2021.
- [33] W.Meesenburg, T.Ommen, J.E.Thorsen, B.Elmegaard, “Economic feasibility of ultra-low temperature district heating systems in newly built areas supplied by renewable energy”
- [34] D. Dunković, “Strateško menadžersko računovodstvo -,” 2011.
- [35] European Commission, “Assessing the European clean energy finance landscape , with implications for improved macro-energy modelling,” p. 140, 2017, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/macro_eu_clean_energy_finance_final.pdf
- [36] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, “Faktori primarne energije i emisija CO 2,” p. 2014, 2014.
- [37] DEA, “District Heating Assessment Tool,” 2017.
- [38] J. Kim and I. Weidlich, “Identification of Individual District Heating Network Conditions using Equivalent Full Load Cycles,” *Energy Procedia*, vol. 116, pp. 343– 350, 2017.
- [39] C. H. Hansen, O. Gudmundsson, and N. Detlefsen, “Cost efficiency of district heating for low energy buildings of the future,” *Energy*, vol. 177, pp. 77–86, 2019.
- [40] <https://transparency.entsoe.eu/>, svibanj 2023.
- [41] <https://ec.europa.eu/eurostat>, svibanj 2023.
- [42] Resolair 64 i 68 Komfortni klima uređaj s visokoučinkovitim regenerativnim spremnikom topline, tehničke specifikacije

PRILOZI

I. CD-R disc

II.