

# Optimizacija spajanja urbanih toplinskih izvora na postojeće centralizirane toplinske sustave

---

Čuljak, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:235:956589>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Kristijan Čuljak**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

dr. sc. Tomislav Pukšec, dipl. ing.

Student:

Kristijan Čuljak

Zagreb, 2021

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

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Tomislavu Pukšecu, dipl. ing., kao i Hrvoju Dorotiću, mag. ing. na velikodušno pruženoj pomoći, strpljenju i vremenu tijekom izrade ovog rada.

Budući da je ovo kruga (u doba kruga) mog formalnog obrazovanja, na ovom bih se mjestu htio zahvaliti svim svojim učiteljima i učiteljicama, profesorima i profesoricama, predavačima i predavačicama u svim etapama obrazovanja čije sam sate i predavanja ikad slušao u životu. Zahvaljujem im ponajprije na stečenim znanjima, a onda i na pokazanom primjeru za život. Bio on dobar ili ne, svakako je utjecao na mene.

Također, htio bih se zahvaliti Filipu N. i Ivanu M. koji su svoj obol dali ovom radu u obliku resursa bez kojih teško da bi bilo rezultata u realnom vremenu. Hvala prijateljima i kolegama koji su često tvrdili da sam promašio zgradu u Ulici Ivana Lučića.

Na kraju, ali ne najmanje bitno, hvala mojoj majci i baki na svemu pruženom da dospijem do ove faze svog životnog puta te hvala mojoj djevojci Nini na pruženoj podršci.

Kristijan Čuljak



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 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristijan Čuljak** JMBAG: 0035199991

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija spajanja urbanih toplinskih izvora na postojeće centralizirane toplinske sustave**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimisation of urban waste heat source integration into existing district heating systems**

Opis zadatka:

Centralizirani toplinski sustavi se gotovo uvijek nalaze u gusto naseljenim urbanim sredinama gdje postoje različiti izvori topline, kao što su primjerice sustavi hlađenja u supermarketima, trgovačkim centrima, podzemnoj željeznici, trafostanicama, podatkovnim bazama podataka i sl. Navedeni urbani izvori često veliki udio otpadne topline predaju u okoliš, ali ona bi se mogla iskoristiti za djelomično pokrivanje toplinskih potreba u centraliziranim toplinskim sustavima. Temeljni izazov integracije predstavlja prostorna raspodjela urbanih toplinskih izvora u odnosu na postojeću toplinsku mrežu te vremenska distribucija raspoloživosti otpadne toplinske energije kroz dan, odnosno godinu.

U sklopu ovoga diplomskog rada potrebno je izraditi optimizacijski model integracije urbanih toplinskih izvora u postojećim centraliziranim toplinskim sustavima. Kandidat će provesti sljedeće zadatke tokom izrade diplomskoga rada:

1. Napraviti pregled literature vezan za urbane izvore topline i mogućnosti iskorištavanja otpadne topline u centraliziranim toplinskim sustavima;
2. Izraditi metodu za mapiranje različitih urbanih toplinskih izvora koristeći GIS (geografski informacijski sustav) alat;
3. Razviti optimizacijski model integracije urbanih toplinskih izvora u postojeće centralizirane toplinske sustave, uzimajući u obzir temperaturne režime urbanog izvora i postojeće toplinske mreže;
4. Prikazati rezultate modela na određenoj 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:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

4. ožujka 2021.

6. svibnja 2021.

10. – 14. svibnja 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Doc.dr.sc. Tomislav Pukšec

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
POPIS KRATICA .....	XII
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY .....	XIV
1. UVOD.....	15
2. PREGLED TEHNOLOGIJA.....	18
2.1. Razvoj CTS-a.....	18
2.2. Urbani toplinski izvori .....	21
2.2.1. Rashladni uređaji supermarketa .....	21
2.2.2. Sustavi hlađenja prostora trgovačkih centara i supermarketa.....	25
2.2.3. Trafostanice.....	27
3. METODA.....	31
3.1. Urbani toplinski izvori .....	32
3.1.1. Model rashladnog uređaja supermarketa .....	32
3.1.1.1. Rashladno opterećenje .....	33
3.1.1.2. Pregrijanje rashladnog medija.....	34
3.1.1.3. Protok radne tvari kroz isparivače .....	34
3.1.1.4. Sakupljač kapljevine .....	35
3.1.1.5. Korisnost i snaga kompresora.....	36
3.1.1.6. Hladnjak plina i učinkovitost procesa.....	37
3.1.1.7. Rekuperacija topline .....	38
3.1.2. Model sustava hlađenja prostora trgovačkih centara i supermarketa .....	39
3.1.2.1. Rashladno opterećenje .....	40
3.1.3. Model trafostanice .....	41
3.1.3.1. Referentni transformator.....	41
3.1.3.2. Toplinski gubici pri opterećenju .....	41
3.1.3.3. Toplinski gubici sličnog transformatora .....	42
3.1.3.4. Temperaturni režimi.....	43
3.2. Model <i>pinch</i> metode.....	45
3.2.1. Osnove <i>pinch</i> metode.....	45
3.2.2. Tijek proračuna .....	47
3.2.2.1. Izmjenjivač topline.....	47
3.2.2.2. Dizalica topline .....	50
3.3. Prostorna analiza .....	54
3.4. Ekonomska analiza .....	56
4. STUDIJA SLUČAJA: ZAGREB .....	57
4.1. Temperatura zraka.....	57

4.2.	Godišnja potrošnja električne energije rashladnog uređaja supermarketa.....	57
4.3.	Godišnja potrošnja električne energije za sustav hlađenja supermarketa.....	58
4.4.	Godišnja potrošnja električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra.....	59
4.5.	Referentna trafostanica .....	59
4.6.	Relativno opterećenje EES-a .....	60
4.7.	Temperaturni režimi CTS-a .....	61
4.9.	Prostorni podaci .....	62
4.10.	Ekonomski podaci.....	63
5.	REZULTATI .....	65
5.1.	Rashladni uređaji supermarketa .....	65
5.1.1.	Model .....	65
5.1.2.	Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a.....	67
5.1.3.	Satni COP.....	68
5.1.4.	Satno iskorištavanje otpadne topline.....	70
5.2.	Sustav hlađenja prostora supermarketa.....	71
5.2.1.	Model .....	71
5.2.2.	Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a.....	71
5.2.3.	Satni COP.....	73
5.2.4.	Satno iskorištavanje otpadne topline.....	74
5.3.	Sustav hlađenja trgovačkog centra.....	75
5.3.1.	Model .....	75
5.3.2.	Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a.....	75
5.3.3.	Satni COP.....	77
5.3.4.	Satno iskorištavanje otpadne topline.....	78
5.4.	Trafostanice.....	79
5.4.1.	Model .....	79
5.4.2.	Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a.....	79
5.4.3.	Satni COP.....	81
5.4.4.	Satno iskorištavanje otpadne topline.....	83
5.5.	Prostorna analiza .....	84
5.6.	Ekonomska analiza .....	87
6.	ZAKLJUČAK.....	93
	ZAHVALA.....	94
	LITERATURA.....	95
	PRILOZI.....	100

## POPIS SLIKA

Slika 1: Raspodjela energenata u sektoru grijanja za 2015. godinu [9].	16
Slika 2: Trenutno stanje i potencijali temperaturnih režima u odabranim gradovima [16][19]	20
Slika 3: Sheme sustava s radnom tvari R744: a) kao prijenosnik energije b) kaskadni rashladni sustav s direktnom ekspanzijom CO <sub>2</sub> c) transkritični rashladni CO <sub>2</sub> <i>booster</i> [25]	24
Slika 4: Principijelna shema iskorištavanja otpadne topline rashladnog uređaja kao izvora te CTS-a kao izvora [10]	25
Slika 5: Klimatizacijsko postrojenje s grijanjem i hlađenjem zraka [28]	26
Slika 6: Prikaz klima komore koja radi u načinu <i>free cooling</i> [22]	27
Slika 7: Dijelovi transformatora [29]. Napomena: željezna jezgra se nalazi ispod namota i dijelova za učvršćenje, pa nije vidljiva na slici.	28
Slika 8: Primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora pomoću izmjenjivača topline ulje – voda i dizalice topline [33]	30
Slika 9: Shema metode	31
Slika 10: Shematski prikaz transkritičnog rashladnog CO <sub>2</sub> <i>booster</i> sustava. Adaptirano prema [34]	32
Slika 11: Prikaz ph dijagrama za radnu tvar R744 u navedenim projektnim parametrima	33
Slika 12: Shematski prikaz sakupljača kapljevine	35
Slika 13: Izentropska ovisnost kompresora u ovisnosti o kompresijskom omjeru	36
Slika 14: Prikaz relativnih opterećenja prosječnog supermarketa u ovisnosti o vanjskoj temperaturi [10]	38
Slika 15: Shematski prikaz referentnog sustava hlađenja	39
Slika 16: Prikaz ph dijagrama za radnu tvar R410a u navedenim projektnim parametrima	39
Slika 17: Načelna shema prijenosa topline na granici sustava klima komore i radne tvari	40
Slika 18: Grafički prikaz ukupnih gubitaka u ovisnosti o opterećenju	42
Slika 19: Promjena gubitaka sličnog distribucijskog transformatora u odnosu na promjenu snage transformatora	42
Slika 20: Načelna shema temperaturne stratifikacije u transformatoru te prikaz ključnih temperaturnih točaka. Izrađeno prema [32]	43
Slika 21: Funkcijska ovisnost stacionarne nadtemperature gornjeg sloja ulja o opterećenju	44
Slika 22: a) Prikaz tople struje u T-H dijagramu b) prikaz hladne struje u T-H dijagramu [40]	45
Slika 23: Prikaz svojstva pomicanja po osi apscise pravaca struja [40]	46
Slika 24: Prikaz izmjene topline između tople i hladne struje [40]	47
Slika 25: Shema algoritma za izračunavanje kapaciteta izmjenjivača topline u <i>pinch</i> metodi	48
Slika 26: Načelna shema opreme za iskorištavanja otpadne topline pomoću <i>pinch</i> metode	49
Slika 27: Shema termodinamičkog kruga i T-H dijagrama za formulaciju Lorenzova COP-a [41]	50
Slika 28: Prikaz Lorenzove korisnosti u ovisnosti o temperaturnim razlikama između logaritamskih temperatura toplije i hladnije struje s pripadajućom regresijskom linijom za radnu tvar amonijak [41]	51
Slika 29: Prikaz iskorištavanja otpadne topline pomoću BHP	52
Slika 30: Prikaz konkretnih slučajeva <i>pinch</i> metode: a) kada nema izmjene, b) kada je izmjena topline isključivo izmjenjivačem topline (HE), c) kada je izmjena topline isključivo dizalicom topline (BHP) (COP=4,607) te d) kada je izmjena topline i izmjenjivačem topline i dizalicom topline (COP=6,358)	53



Slika 31: Načelna shema prostorne analize .....	54
Slika 32: Prikaz sučelja QGIS alata i dodatka OSM .....	55
Slika 33: Godišnji hod satne temperature zraka za prosječno desetogodišnje razdoblje za Zagreb [43] .....	57
Slika 34: Potrošnja električne energije za rashladne uređaje supermarketa za Beč za karakteristični dan tijekom ljeta i zime [44].....	57
Slika 35: Godišnja potrošnja električne energije za rashladne sustave .....	58
Slika 36: Potrošnja električne energije za sustav hlađenja supermarketa za Beč za karakterističan dan tijekom ljeta i zime [44] .....	58
Slika 37: Potrošnja električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra za Beč za karakterističan dan tijekom ljeta i zime [44] .....	59
Slika 38: Primjeri gradskih trafostanica u gradu Zagrebu: a) TS 110/10(20) Ferenščica kao prijenosna – distribucijska mreža [46] i b) trafostanica u Dugavama kao distribucijska mreža - potrošači.....	59
Slika 39: Relativno opterećenje EES-a prema [47].....	60
Slika 40: Prikaz temperaturnih režima polaza i povrata pretpostavljenih scenarija i trenutnog stanja CTS-a grada Zagreba .....	61
Slika 41: Primjer poligona promatranih objekata .....	62
Slika 42: Specifična cijena izmjenjivača topline za iskorištavanje otpadne topline [48] .....	64
Slika 43: a) Ovisnost tlaka i COP-a o vanjskoj temperaturi b) ovisnost temperatura prije i poslije hladnjaka plina o vanjskoj temperaturi zraka za model rashladnog uređaja supermarketa .....	65
Slika 44: Satni prikaz dostupne otpadne te rekuperirane otpadne topline za potrebe grijanja supermarketa .....	66
Slika 45: Satni prikaz temperature izvora otpadne topline za model rashladnog uređaja supermarketa .....	66
Slika 46: a) Ovisnost izmijenjene toplinske energije pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) izmijenjena toplinska energija pomoću DT za određeni promjer priključka CTS-a i rashladnog uređaja supermarketa.....	67
Slika 47: Prikaz omjera dobivene toplinske energije pomoću IT-a i nazivnog promjera .....	67
Slika 48: Ukupna godišnja izmijenjena toplinska energija pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija za rashladni uređaj supermarketa .....	68
Slika 49: Prikaz COP-a za sva tri scenarija tijekom godine (gore – A; sredina – B i dolje – C) .....	69
Slika 50: Satno iskorištavanje otpadne topline rashladnih uređaja supermarketa (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C) .....	70
Slika 51: a) Ovisnost tlaka i COP-a o vanjskoj temperaturi b) ovisnost temperatura prije i poslije hladnjaka o vanjskoj temperaturi zraka za model sustava hlađenja prostora supermarketa .....	71
Slika 52: a) Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za promjer priključka CTS-a i sustava hlađenja.....	72
Slika 53: Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera .....	72
Slika 54: Ukupna godišnja toplinska energija izmijenjena pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija za rashladni uređaj supermarketa .....	72
Slika 55: Satno iskorištavanje otpadne topline sustava hlađenja supermarketa (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C).....	74

Slika 56: Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za određeni promjer priključka CTS-a i sustava hlađenja prostora trgovačkih centara .....	75
Slika 57: Prikaz otpadne topline sustava za hlađenje prostora supermarketa .....	76
Slika 58: Prikaz izvora topline sustava za hlađenje prostora supermarketa i trgovačkog centra .....	76
Slika 59: Prikaz otpadne topline sustava za hlađenje prostorija trgovačkog centra.....	76
Slika 60: Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera .....	76
Slika 61: Ukupna godišnja toplina izmijenjena pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija .....	77
Slika 62: Satno iskorištavanje otpadne topline sustava hlađenja trgovačkog centra za scenarij A .....	78
Slika 63: Satni prikaz otpadne topline trafostanica .....	79
Slika 64: Satni prikaz temperaturnog izvora trafostanice .....	79
Slika 65: a) Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS- a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za određeni promjer priključka CTS-a i rashladnog uređaja supermarketa.....	80
Slika 66: Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera za sva tri scenarija .....	80
Slika 67: Ukupna godišnja izmijenjena toplina pomoću IT i DT, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija .....	81
Slika 68: Prikaz COP-a za sva tri scenarija tijekom godine (gore – A; sredina – B i dolje – C) .....	82
Slika 69: Satno iskorištavanje otpadne topline trafostanice (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C) .....	83
Slika 70: Prostora raspodjela supermarketa u Zagrebu s pripadajućim ukupnim površinama dobivenim pomoću QGIS-a.....	84
Slika 71: Prostorna raspodjela trgovačkih centara u Zagrebu s pripadajućim ukupnim površinama dobivenim pomoću QGIS-a.....	84
Slika 72: Prostorna raspodjela trafostanica 110 kV/x u Zagrebu .....	85
Slika 73: Potencijal rashladnih uređaja supermarketa u dijelu Zagreba [kWh god <sup>-1</sup> ].....	85
Slika 74: Potencijal rashladnih uređaja prostorija trgovačkih centara u dijelu Zagreba [kWh god <sup>-1</sup> ] .....	86
Slika 75: LCOH u ovisnosti o duljini priključka za rashladne uređaje supermarkete .....	87
Slika 76: LCOH u ovisnosti o duljini priključka za sustave hlađenja prostora supermarketa .	88
Slika 77: LCOH u ovisnosti o duljini priključka za sustave hlađenja prostora trgovačkih centara. Napomena: Scenariji B i C za slučaj izmjene topline metodom IT+DT izostavljeni su s prikaza zbog višestruko veće skale koja ekonomski nije ostvariva. .....	88
Slika 78: LCOH u ovisnosti o duljini priključka za trafostanice .....	88
Slika 79: a) Usporedni prikaz LCOH za metodu izmjene topline pomoću IT (priključak 100 m) za promatrane objekte b) detalj realnijih iznosa troškova .....	89
Slika 80: a) Usporedni prikaz LCOH za metodu izmjene topline pomoću IT+DT (priključak 100 m) za promatrane objekte b) detalj realnijih iznosa troškova .....	89
Slika 81: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline rashladnih uređaja supermarketa metodom IT .....	90
Slika 82: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline rashladnih uređaja supermarketa metodom IT+DT .....	90

Slika 83: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora supermarketa metodom IT .....	91
Slika 84: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora supermarketa metodom IT+DT .....	91
Slika 85: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora trgovačkih centara metodom IT.....	91
Slika 86: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora trgovačkih centara metodom IT+DT. Napomena: Scenariji B i C su za oba slučaja analize izostavljeni s prikaza zbog višestruko veće skale koja ekonomski nije ostvariva.....	92
Slika 87: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline trafostanica metodom IT .....	92
Slika 88: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline trafostanica metodom IT+DT .....	92

**POPIS TABLICA**

Tablica 1: Primjeri raznih generacija CTS-a u Europi [15] .....	19
Tablica 2: Prikaz realnih primjera iskorištavanja otpadne topline u Europi [21]. .....	22
Tablica 3: Naponske razine mrežnih i distribucijskih transformatora i njihova primjena [29]	27
Tablica 4: Oznake načina hlađenja [32] .....	29
Tablica 5: Tehnički podaci referentnog transformatora [38] .....	41
Tablica 6: Trafostanice 110/x kV u gradu Zagrebu [45].....	60
Tablica 7: Pretpostavljeni parametri strujanja medija u priključku CTS-a.....	61
Tablica 8: Karakteristike odabranih izvora otpadne topline .....	62
Tablica 9: Ulazni podaci ekonomske analize .....	63
Tablica 10: Specifična cijena vrelovodne cijevi [48].....	64
Tablica 11: Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT-a do temperature polaza u CTS-u za rashladni uređaj supermarketeta ....	68
Tablica 12: Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline za rashladne uređaje supermarketeta.....	70
Tablica 13: Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT do temperature polaza u CTS-u za rashladni uređaj supermarketeta.....	73
Tablica 14: Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline .....	73
Tablica 15: Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline .....	77
Tablica 16: Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT do temperature polaza u CTS-u za trafostanice .....	81
Tablica 17: Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline .....	81
Tablica 18: Numerički rezultat spacijalne analize .....	86

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$P_{\text{tot}}'$	kW	ukupni toplinski gubici pri opterećenju
$\bar{Q}_{\text{waste}}$	kWh m <sup>-2</sup>	prosječni iznos otpadne topline
$\bar{T}_C$	K	logaritamska temperatura hladnije struje
$\bar{T}_H$	K	logaritamska temperatura toplije struje
$p_{gc}$	-	kompresijski omjer
$p_{MT}$		
$\Delta T_{pp}$	°C	<i>pinch</i> točka, najmanja temperaturna razlika struja u izmjenjivaču
$\Delta T_{pp}$	°C	<i>pinch</i> točka, najmanja temperaturna razlika struja
$\Delta T_{SH}$	°C	temperaturna razlika pregrijanja
$\Delta T_{ubac}$	°C	temperaturna razlika zraka koji se ubacuje
$\Delta \theta_{to}$	K	stacionarna nadtemperatura gornjeg sloja ulja
$\Delta \theta_{tor}$	K	nazivna stacionarna temperatura gornjeg sloja ulja
$\Delta \theta_{bo}$	K	stacionarna nadtemperatura donjeg sloja ulja
$\Delta \theta_{bor}$	K	nazivna stacionarna temperatura donjeg sloja ulja
$h_{12}$	kJ kg <sup>-1</sup>	entalpija radne tvari na usisu u kompresor
$h_{13s}$	kJ kg <sup>-1</sup>	izentropska entalpija radne tvari na isisu kompresora
$h_6$	kJ kg <sup>-1</sup>	entalpija radne tvari prije srednjeterapeuturnog isparivača
$h_7$	kJ kg <sup>-1</sup>	entalpija radne tvari poslije srednjeterapeuturnog isparivača
$h_8$	kJ kg <sup>-1</sup>	entalpija radne tvari prije niskotemperaturnog isparivača
$h_9$	kJ kg <sup>-1</sup>	entalpija radne tvari poslije niskotemperaturnog isparivača
$h_{sp}$	kJ kg <sup>-1</sup>	specifična entalpija početnog stanja struje
$h_{tg}$	kJ kg <sup>-1</sup>	specifična entalpija konačnog stanja struje
$C_{Hs}$	W °C <sup>-1</sup>	toplinski kapacitet hladne struje
$C_{Ts}$	W °C <sup>-1</sup>	toplinski kapacitet tople struje
$CAPEX_{DT}$	EUR	kapitalni troškovi dizalice topline
$CAPEX_{IT}$	EUR	kapitalni troškovi izmjenjivača topline
$COP_{Lor}$	-	Lorenzov toplinski množitelj
$E_{comp}$	MWh	električna energija utrošena za rad kompresora DT
$LCOH_{DT}$	EUR	nivelirani trošak toplinske energije dizalice topline
$LCOH_{IT}$	EUR	nivelirani trošak toplinske energije izmjenjivača topline
$LCOH_{IT+DT}$	EUR	nivelirani trošak toplinske energije dizalice topline i izmjenjivača topline
$O\&M_{fix}$	EUR kWh <sup>-1</sup>	fiksni operativni troškovi DT
$O\&M_{var}$	EUR MWh <sup>-1</sup>	varijabilni operativni troškovi DT

$OPEX_{DT,fix}$	EUR	fiksni operativni troškovi dizalice topline
$OPEX_{DT,var}$	EUR	varijabilni operativni troškovi dizalice topline
$OPEX_{DT}$	EUR	ukupni operativni troškovi dizalice topline
$OPEX_{IT}$	EUR	fiksni operativni troškovi izmjenjivača topline
$P_0$	kW	gubici praznog hoda
$P_k$	kW	gubici pri opterećenju
$P_{LT}$	kW	snaga niskotemperaturnog kompresora
$P_{MT}$	kW	snaga srednjemperaturnog kompresora
$P_{tot}$	kW	ukupni gubici
$Q_{CTS,rekup}$	kWh god <sup>-1</sup>	isporučena toplinska energija dobivena rekuperacijom iz izvora otpadne topline
$Q_{waste}(t)$	kWh m <sup>-2</sup>	otpadna toplina na satnoj razini dobivena iz modela
$S_n$	MVA	nominalna snaga
$T_1$	°C	izlazna temperatura radne tvari iz hladnjaka plina
$T_7$	°C	temperatura nakon srednjemperaturnog isparivača
$T_9$	°C	temperatura nakon niskotemperaturnog isparivača
$T_{amb}$	°C	okolišna temperatura
$T_{C,i}$	K	ulazna temperatura hladnije struje
$T_{C,o}$	K	izlazna temperatura hladnije struje
$T_{evap}$	°C	temperatura isparivanja
$T_{H,i}$	K	ulazna temperatura toplije struje
$T_{H,o}$	K	izlazna temperatura toplije struje
$T_{ind}$	°C	projektna temperatura unutar promatranog objekta
$T_{LT}$	°C	temperatura isparavanja niskotemperaturnog opterećenja
$T_{MT}$	°C	temperatura isparavanja srednjemperaturnog opterećenja
$T_{sp}$	°C	temperatura početnog stanja struje
$T_{tg}$	°C	temperatura konačnog stanja struje
$U_h$	kV	primarni napon
$U_l$	kV	sekunadni napon
$c_{DT}$	MEUR MW <sup>-1</sup>	specifična cijena DT
$c_{elen}$	EUR kWh <sup>-1</sup>	cijena električne energije za nekućanske potrošače
$c_{p,Hs}$	W °C <sup>-1</sup>	specifični toplinski kapacitet hladne struje
$c_{p,Ts}$	W °C <sup>-1</sup>	specifični toplinski kapacitet tople struje
$c_p$	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	specifični toplinski kapacitet
$inv_{DT}$	EUR	investicija dizalice topline
$inv_{IT,fix}$	EUR	fiksni dio investicije izmjenjivača topline
$inv_{IT,var}$	EUR	varijabilni dio investicije izmjenjivača topline
$inv_{IT}$	EUR	ukupna investicija izmjenjivača topline
$kp_{Hs}$	[°C W <sup>-1</sup>	koeficijent nagiba pravca hladne struje

$kp_{Ts}$	$^{\circ}\text{C W}^{-1}$	koeficijent nagiba pravca tople struje
$p_{gc}$	bar	tlak u hladnjaku plina
$p_{LT}$	bar	tlak isparavanja niskotemperaturnog opterećenja
$p_{MT}$	bar	tlak isparavanja srednjetemperaturnog opterećenja
$q_{m,BP}$	$\text{kg s}^{-1}$	protok radne tvari kroz zaobilazni vod
$q_{m,Hs}$	$\text{kg s}^{-1}$	maseni protok hladne struje
$q_{m,i}$	$\text{kg s}^{-1}$	protok radne tvari u isparivačima
$q_{m,LT}$	$\text{kg s}^{-1}$	protok radne tvari u niskotemperaturnom isparivaču
$q_{m,MT}$	$\text{kg s}^{-1}$	protok radne tvari u srednjetemperaturnom isparivaču
$q_{m,Ts}$	$\text{kg s}^{-1}$	maseni protok tople struje
$q_{m,WF}$	$\text{kg s}^{-1}$	protok radne tvari u cijelom sustavu
$s_{12}$	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	entropija radne tvari na usisu kompresora
$s_{13s}$	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	izentropska entropija radne tvari na isisu kompresora
$x_2$	-	stupanj zasićenja radne tvari na ulazu u sakupljač
$\Phi_{\text{cond}}$	kW	toplinski tok na kondenzatoru DT-a
$\Phi_{DT,naz}$	kW	nazivni kapacitet DT-a
$\Phi_{HP}$	kW	toplinski tok na isparivaču DT-a
$\Phi_{\text{loss}}$	kW	otpadna toplina
$\Phi_{LT}$	kW	niskotemperaturno rashladno opterećenje
$\Phi_{MT}$	kW	visokotemperaturno rashladno opterećenje
$\alpha_{Hs}$	$^{\circ}$	kut nagiba pravca hladne struje
$\alpha_{Ts}$	$^{\circ}$	kut nagiba pravca tople struje
$\eta_{Lor}$	-	Lorenzova korisnost
$\Delta\bar{T}_{\text{lift}}$	K	temperaturna razlika između logaritamskih temperatura toplije i hladnije struje
$\Delta T_C$	K	najveća temperaturna razlika hladnije struje
$\Delta T_H$	K	najveća temperaturna razlika toplije struje
$\Delta T_{SH}$	$^{\circ}\text{C}$	temperaturna razlika pregrijanja
$h$	$\text{kJ kg}^{-1}$	specifična entalpija
$\eta$	-	izentropska korisnost kompresora
$CAPEX$	EUR	kapitalni troškovi (engl. <i>Capital expenditures</i> )
$CRF$	-	faktor povrata kapitala (engl. <i>Capital recovery factor</i> )
$K$	-	relativno opterećenje transformatora
$LCOH$	EUR	nivelirani trošak toplinske energije (engl. <i>Levelized Cost Of Heat</i> )
$OPEX$	EUR	operativni troškovi (engl. <i>Operating expenses</i> )
$R$	-	omjer gubitaka opterećenja i gubitaka jezgre pri nazivnom opterećenju
$d$	-	diskontna stopa
$inv$	EUR	ukupna investicija

---

$n$	god	životni vijek postrojenja
$q$	$\text{kJ kg}^{-1}$	specifični toplinski tok
$v$	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	specifični volumen
$v$	$\text{m s}^{-1}$	brzina strujanja
$\beta$	-	faktor ostatka otpadne topline nakon rekuperacije za grijanje
$\gamma$	-	udio operativnih troškova IT u investiciji
$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$	gustoća
$\chi$	-	eksponent hlađenja ulja



## POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
CHP	kogeneracija (engl. <i>Combined Heat and Power</i> )
COP	toplinski množitelj
CTS	centralizirani toplinski sustav
DH	engl. <i>District heating</i>
DN	nazivni promjer
DT	dizalica topline
EEA	Europska okolišna agencija (engl. <i>European Environment Agency</i> )
EES	elektroenergetski sustav
EU	Europska unija
EZP	europski zeleni plan
GIS	geografski informacijski sustav
GWP	potencijal globalnog zagrijavanja (engl. <i>Global Warming Potential</i> )
ICE	motor s unutarnjim izgaranjem (engl. <i>Internal Combustion Engine</i> )
IT	izmjenjivač topline
IV	industrijski viškovi
LT	niskotemperaturno
LU	loživo ulje
MT	srednjetemperaturno
OIE	obnovljivi izvori energije
OPEC	Organizacija zemalja izvoznica nafte (engl. <i>Organization of the Petroleum Exporting Countries</i> )
OSM	engl. <i>OpenStreetMap</i>
OT	otpadna toplina
PP	prirodni plin
PTV	potrošna topla voda
SAD	Sjedinjene Američke Države
SCOP	sezonski toplinski množitelj
UNFCCC	okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime
VAM	engl. <i>Ventilation Air Mounted</i>
VBA	engl. <i>Visual Basic for Applications</i>
VRV	engl. <i>Variable Refrigerant Volume</i>
WACC	prosječni ponderirani trošak kapitala (engl. <i>Weighted Average Cost of Capital</i> )

## SAŽETAK

U diplomskom radu prikazan je jedan od načina spajanja urbanih izvora otpadne topline u centralizirane toplinske sustave (CTS). Prema literaturi postoji oko 1,2 EJ (1 eksa džul =  $10^{18}$ ) dostupne niskotemperaturne otpadne topline koja se ispušta u okoliš. Trenutne temperaturne razine CTS-a u Republici Hrvatskoj, ali i diljem Europe ne dozvoljavaju direktnu rekuperaciju otpadne topline. Zbog toga, ali i činjenice postojanja sve većeg udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom miks, sve češće se za ovakvu integraciju otpadne topline upotrebljavaju dizalice topline. Integracija dizalica topline i izmjenjivača topline u smislu iskorištavanja otpadne topline, izrađena je pomoću modela *pinch* metode. Ona se zasniva na vrednovanju izmjene topline između dviju struja pomoću minimalne temperaturne razlike između njih. U radu je njen proračun potpomognut programskim jezikom *Visual Basic for Applications* (VBA) u sklopu računalnog paketa Microsoft Excela. Također, osim samog VBA, u radu je za potrebe mapiranja urbanih toplinskih izvora korišten i QGIS alat. Urbani toplinski izvori koji su mapirani jesu: rashladni uređaji supermarket, sustavi hlađenja prostora trgovačkih centara i supermarket te trafostanice. Pomoću *pinch* metode ispitani su uvjeti spajanja ovih izvora na tri različita temperaturna režima CTS-a. Njome je dobiven termodinamički uvid u mogućnosti spajanja: načini rekuperacije, vrijeme u godini kada ju je moguće rekuperirati ju te toplinski množitelj za svaki od objekata i scenarija. Pokazano je da su izvori topline rashladnih sustava supermarket i trafostanica ekonomski i termodinamički izvedivi.

Ključne riječi:

urbani izvori otpadne topline, *pinch* metoda, trafostanice, supermarketi, trgovački centri, CTS

## **SUMMARY**

In this master thesis, the concept of urban waste heat sources was presented. In Europe, there is a huge potential for waste heat. Some approximations are cited about 1,2 EJ of waste heat available. The challenge is to integrate these sources to the newest generations of district heating networks. After a literature review, the method is represented with the model of every chosen urban heat source – supermarkets, shopping malls, and power substations. Integration of all these sources to the network was implemented with the pinch method. The pinch method was supported in Visual Basic for Applications (VBA) as one part of MS Excel. By implementing a pinch method, two ways of utilizing were implemented. First is the direct use with heat exchanger and second by using heat pumps. The results are thermodynamic and economic quantification of urban heat sources in different DH networks. The most economically feasible heat sources are refrigeration systems of supermarkets and power substations.

Keywords:

urban heat sources, district heating, supermarkets, shopping malls, power substations

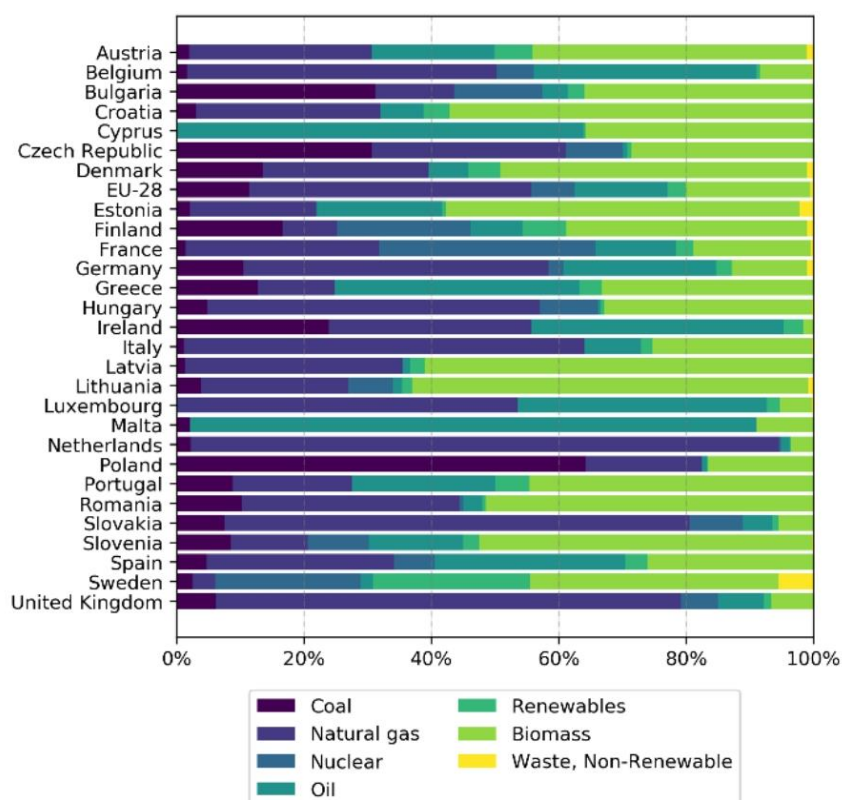
## 1. UVOD

Čovjekov suživot s energijom svoje korijene vuče u same početke čovječanstva, ali je njegova sveopća briga o usklađivanju energetske potrebe s okolišem tek novijeg doba. Naglu promjenu energetske paradigme izazvala je naftna kriza u sedamdesetim godinama dvadesetog stoljeća. Ona je izravna posljedica dugogodišnjih političkih sukoba na Bliskom istoku, a eskalirala je u listopadu 1973. g. kada su arapske članice Organizacije zemalja izvoznica nafte (engl. *Organization of the Petroleum Exporting Countries*; OPEC) uvele embargo na izvoz i smanjile proizvodnju nafte [1]. Temelj Pariškog sporazuma i Protokola iz Kyota, dvaju ključnih dokumenata vezanih uz klimatske promjene te njihovih prilagodbi na prijelazu stoljeća, predstavlja okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC) iz 1994. godine [2]. Protokol iz Kyota prihvaćen je u prosincu 1997. godine. Njime su se stranke obuhvaćene Prilogom 1 UNFCCC-a obvezale na redukciju ukupnih antropogenih emisija stakleničkih plinova (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC i SF<sub>6</sub>) u minimalnom iznosu od 5,2% prosječne emisije u razdoblju od 2008. do 2012. godine uspoređujući s referentnom godinom [3]. Pariški sporazum postignut je 12. prosinca 2015. godine, a na snagu je stupio 4. listopada 2016. godine, nakon ratifikacije Europske unije (EU). U cilju održivog razvoja i nastojanja za iskorjenjivanje siromaštva te kako bi se pojačao globalni odgovor na opasnost od klimatskih promjena, stranke ovog sporazuma obvezale su se na sljedeće mjere [4]:

- zadržavanje povećanja globalne prosječne temperature na razini koja je znatno niža od 2 °C iznad razine u predindustrijskom razdoblju te ulaganje napora u ograničavanje povišenja temperature na 1,5 °C iznad razine u predindustrijskom razdoblju;
- povećanje sposobnosti prilagodbe negativnim utjecajima klimatskih promjena te poticanje otpornosti na klimatske promjene i razvoja s niskim razinama emisija stakleničkih plinova na način kojim se ne ugrožava proizvodnja hrane;
- usklađivanja financijskih tokova s nastojanjima usmjerenima na niske emisije stakleničkih plinova i razvoj otporan na klimatske promjene.

Europska unija definirala je ciljeve za 2020. g.: smanjenje za 20% emisija stakleničkih plinova u odnosu na razinu iz 1990. godine; 20% udjela obnovljivih izvora energije (OIE) u ukupnoj potrošnji primarne energije te povećanje za 20% energetske učinkovitosti u odnosu na projekcije iz 2007. za 2020. godinu [5].

Prema podacima Europske okolišne agencije (engl. *European Environment Agency*; EEA) [6] cilj vezan uz OIE bi s 19,4% iz 2019. g. trebao biti ispunjen, uz emisije stakleničkih plinova je na razini 24%, a cilj vezan uz energetska učinkovitost jedini nije ostvaren te je na oko 13%. Energetska tranzicija nastavlja se i u sljedećem desetljeću jer je Europska unija postavila još ambicioznije ciljeve za 2030. godinu: smanjenje za 40% emisija stakleničkih plinova, ostvariti udio od 32% OIE-a i povećanje za 32,5% energetske učinkovitosti [7]. Daljnji korak bilo je donošenje europskog zelenog plana (EZP). EZP pandan je američkom New Dealu iz 1933. g., ali s ciljem ostvarivanja klimatski neutralnog kontinenta do 2050. godine. Kako bi EU dostigla taj cilj, prepoznala je pametnu integraciju OIE-a, energetska učinkovitost i druga održiva interdisciplinarna rješenja kao jedne od glavnih mjera EZP-a [8]. Upravo te tri mjere mogu se odlično uklopiti u sektor toplinarstva u kojem je prirodni plin najčešće korišteno gorivo za dobivanje toplinske energije. Regionalnu raspodjelu korištenja energenata za grijanje kućanstava unutar EU prikazuje Slika 1.



**Slika 1:** Raspodjela energenata u sektoru grijanja za 2015. godinu [9].

Prirodni plin najkorišteniji je energent za potrebe grijanja kućanstava s čak 44% primarne energije koja na njega otpada (1297 TWh). Od toga 14% čine centralizirani toplinski sustavi (dalje CTS), dok su ostatak individualna rješenja u formi kotlova [9].

Korištenje ugljena u toplinarskom sektoru praktički je prepolovljen u periodu od 1990. do 2015. g. s 780 TWh na 333 TWh, pri čemu se dvije trećine koriste u CTS-u, a ostatak u individualnim rješenjima [9]. Od ostalih fosilnih goriva najzastupljenije je loživo ulje čija je potrošnja u spomenutom razdoblju pala s 777 TWh na 427 TWh. Uz klasične izvore za CTS, kao što su kogeneracije i energane na otpad, sve veću ulogu u modernim CTS-ovima dobivaju i izvori otpadne topline. Osim primarne zadaće opskrbljivanja potrošača toplinskom energijom, u literaturi [10] se uloga CTS-a dodatno proširuje na svojevrsno uravnoteženje električne mreže. Usklađivanjem intermitencije OIE-a i dostupnosti otpadne topline, koja bi se ovako i onako odbacila u okoliš, stvara se prilika za iskorištavanje viškova električne energije da bi se podigla energetska razina izvora pomoću dizalica topline (DT). Ovakve situacije u kojima će se sve više koristiti OIE, a balansiranje električne mreže nužnost, bit će sve češće te CTS može poslužiti kao spremnik topline. Nekoliko studija koje su provedene u Danskoj, zemlji predvodnici korištenja DT-a u toplinskim mrežama, pokazale su da bi se CTS-om moglo opskrbljivati od 50 do 70% budućih potreba za toplinskom energijom [11]. Neke od glavnih prednosti CTS-ova budućih generacija jesu mogućnost implementacije niskotemperaturnih izvora topline, učinkoviti prijenos i distribucija te skladištenje u spremnicima topline [11]. Otpadnom toplinom može se odrediti svaki onaj toplinski nusprodukt određenog procesa čija daljnja integracija u taj isti proces nije moguća te ju je potrebno ispustiti u okoliš na određenoj temperaturnoj razini i u određenoj količini. Postoji široka lepeza različitih izvora otpadne topline iz industrijskih procesa, a oni se generalno mogu podijeliti u tri skupine prema iznosu temperature na kojima se odvija industrijski proces: niskotemperaturni (ispod 100 °C), srednjetemperaturni (između 100 i 350 °C) te visoko temperaturni (iznad 350 °C) [12]. Procijenjeni je iznos otpadne topline u Europskoj uniji 304,13 TWh god<sup>-1</sup> i to najvećim dijelom na temperaturnim režimima između 100 i 200 °C [13]. Procesi koji se najčešće navode kao potencijalni izvori za implementaciju u CTS-u jesu oni iz papirne, prehrambene, kemijske, automobilske, metalurške, tekstilne i drvne industrije [14]. Iako nužno ne mora biti pravilo, većina ovakvih izvora otpadne topline nalazi se na prostorima gdje ne postoji CTS i potreba za toplinskom energijom. U fokusu ovog rada urbani su toplinski izvori na znatno nižim temperaturama nego industrijski koji su temeljni na rashladnim ciklusima supermarketa, ciklusima hlađenja u supermarketima i trgovačkim-centrima te trafostanicama pri prijelazu s prijenosne na distribucijsku električnu mrežu.

## 2. PREGLED TEHNOLOGIJA

### 2.1. Razvoj CTS-a

Pionir razvoja CTS-a u svijetu bio je SAD. Iako su postojali već demonstracijski projekti, 1880-ih razvijeni su prvi oblici CTS-a [15] u kojima ogrjevni medij bila je para. S obzirom na to da tada nije bila razvijena električna mreža, para nije služila za grijanje već za dobavu parnih turbina kako bi se mogla proizvesti električna energija. S razvojem distribucijske električne mreže uloga medija promijenila se te on postaje isključivo ogrjevni medij, a ta praksa u SAD-u i dalje živi. Takve je CTS-e karakterizirala visoka radna temperatura (200 °C), veliki toplinski gubici te samim time i nemogućnost proširivanja mreže na veće udaljenosti [15]. Sljedeća, druga, generacija CTS-a počela se razvijati 1930-ih godina. Nju su karakterizirale manje radne temperature (više od 100 °C) nego prethodne, pri visokim tlakovima, ali u kapljevitom stanju. Pojavljuju se i prvi sekundarni krugovi, betonski kanali, veliki izmjenjivači topline vrste cijev u plaštu i masivni ventili [16]. Treća generacija CTS-a pojavljuje se četrdeset godina kasnije i dalje s kapljevitom vodom na relativno visokim tlakovima, ali na nižim temperaturama (manje od 100 °C) te s novom opremom kao što su predizolirane cijevi direktno položene u zemlju, kompaktne toplinske podstanice s pločastim izmjenjivačima izrađenim od nehrđajućeg čelika i sl. Na strani proizvodnje, počinje integracija OIE te često korištenje visokoučinkovite kogeneracije. Primjeri svih generacija CTS-a, koji se mogu pronaći u praksi, prikazuje Tablica 1. Četvrtu generaciju CTS-a, , karakteriziraju niske radne temperature (oko 50 i 60 °C), niske toplinske potrebe potrošača, optimizirana interakcija između toplinskog izvora, distribucije i potrošnje [15]. Preduvjeti za ovu generaciju su niski energetske potrošači, razvijena mreža, dostupnost nisko-temperaturnih izvora topline te mogućnost spajanja toplinskog i električnog sektora, odnosno pretvorba električne energije u toplinsku (engl. *power to heat*) pomoću dizalica topline ili električnih kotlova. Kako se često CTS-ima, osim potreba za grijanje, pokrivaju i potrebe za pripremom potrošne tople vode (PTV) javlja se i sanitarni kriteriji. Naime, pri određenom temperaturnom rasponu vode (25-55°C) dolazi do stvaranja povoljnih uvjeta za rast i nekontrolirano razmnožavanje patogenih mikroorganizma te su preporučene vrijednosti za kupaonice 35-45°C, a za kuhinje 55-60°C [17]. Daljnji problem koji se nadovezuje uz pripremu PTV-a jest veličina izmjenjivača koji se povećava zbog smanjenog temperaturnog režima uz zadržavanje istog toplinskog kapaciteta. Problemi preniske temperature rješavaju se dogrijavanjem pomoću električnog grijača ili rekuperacijom topline [16].

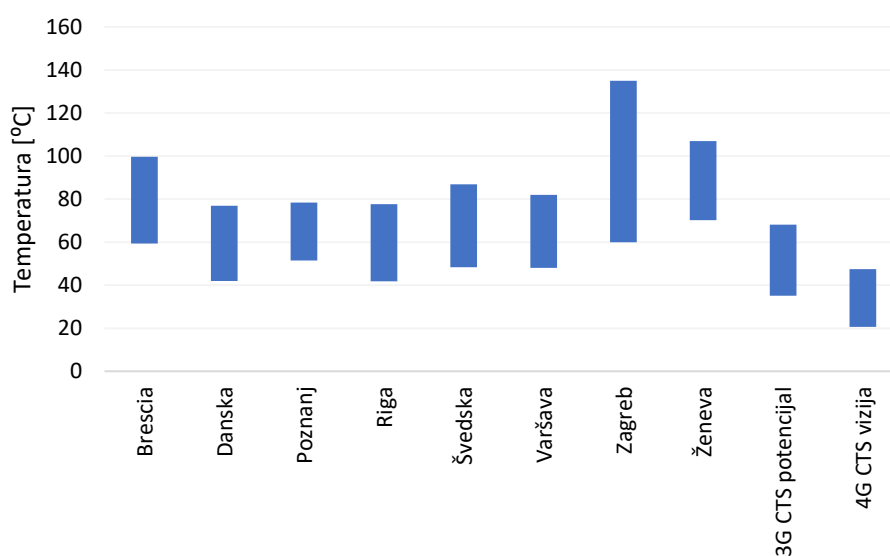
Tablica 1: Primjeri raznih generacija CTS-a u Europi [15]

Generacija	Lokacija	Godina izgradnje	Karakteristike	Toplinska potreba	Miks isporučene topline [%]
2,3	Chemnitz (DE)	1930.	lokalno dostupan lignit	1 TWh god <sup>-1</sup> vršno opterećenje 2008.: 353 MW	CHP PP: 40 CHP lignit: 55 kotao PP: 5
3	Copenhagen (DK)	1923.	jedan od najvećih CTS-ova koji se širi i dalje	10 TWh god; 93% kućanstva, 6% tercijarne djelatnosti, 1% lokalna industrija	CHP PP: 20 CHP biom: 21 CHP LU: 12 CHP ugljen: 18 kotao OT: 29
3	Brescia (IT)	1972.	kogeneracija na otpad od 180 MW, otpadna toplina iz čeličana	1 TWh; 21 000 zgrada; 80% kućanstva, 20% tercijarne djelatnosti	CHP biom: 60 CHP ugljen: 27 kotao PP: 12 IV: 1
3	Tartu (EE)	1967.	lokalna proizvodnja energenata	500 GWh, peak 2015. 328 MW; većinom kućanstva (80 000)	kotao / CHP biom: 94 kotao PP: 6
3	Lyon (FR)	1930.		1 TWh; 50000 kućanstava, komercijalni potrošači	CHP PP: 29 CHP biom: 20 kotao PP: 5 kotao LU: 1 IV: 45
4	Gram (DK)	2015.	solarni CTS, niskotemperaturni sa sezonalnim spremnikom topline (122 000 m <sup>3</sup> , 8500 MWh; 20 - 74 c)	20 GWh; 1171 stambenih zgrada, niskotemperaturni, sezonski spremnik	CHP PP: 9 kotao PP: 7 kotao elen: 14 IV: 3 DT: 5 solar: 62
4	Paris Saclay (FR)	2017.	DT i bioplin za osnovno opterećenje, kotao PP i biomasa za vršna	40 GWh peak 37 MW najviše opskrba tercijarnog sektora; dvije geotermalne bušotine od 700 m, 30 °C, spremnik topline	kotao PP: 4 GEO: 60 DT: 36
4	Hamburg Hafencity (DE)	2014.		6 GWh, niskotemperaturne toplinske potrebe	CHP bioplin: 10 kotao biom: 40 kotao PP: 24 kotao LU: 1 DT: 25

CHP (engl. *Combined Heat and Power*) – kogeneracija; PP – prirodni plin; LU – lož ulje; OT- otpadna toplina; biom – biomasa; DT-dizalice topline; GEO – geotermalna; IV – industrijski viškovi



Prijelaz na niže temperature CTS-a otežavat će i činjenica da trenutne stambene jedinice nisu projektirane za uvjete nižih temperatura, kao ni da su u skladu s niskoenergetskim standardima. U literaturi [18] se navodi da bi potrošnja energije stambenih jedinica koje će biti snabdijevane nižim temperaturama CTS-a, morale biti dvostruko manje od trenutno najmanjih. Konkretno, to znači da bi s trenutnih vrijednosti između 50 i 150 kWh m<sup>-2</sup> potrošnja energije za kućanstva trebala pasti na 25. Snižavanje vrijednosti temperatura polaza podrazumijeva i promjenu ogrjevnih tijela na ona koja mogu efikasno funkcionirati na tim parametrima, a to su nisko temperaturni radijatori i površinsko podno grijanje. Trenutno stanje u nekim gradovima te potencijale temperaturnih režima prikazuje Slika 2.



**Slika 2:** Trenutno stanje i potencijali temperaturnih režima u odabranim gradovima [16][19]

## 2.2. Urbani toplinski izvori

Urbani toplinski izvori za razliku od industrijskih većinom se nalaze u područjima veće gustoće naseljenosti što samim time znači da je i potražnja za toplinskom energijom blizu samog izvora. Oni predstavljaju značajan izvor otpadne topline, prema nekim istraživanjima [20] u Europi postoji oko 1,2 EJ (1 eksa džul =  $10^{18}$ ) dostupne niskotemperaturne otpadne topline. Ako se uračunaju i industrijski izvori, sva ta otpadna toplina mogla bi pokriti oko 25% trenutnih potreba CTS-a [20]. Urbani toplinski izvori su, osim promatranih u radu, i data centri, podzemne željeznice, postrojenja za obradu otpadnih voda, rashladni uređaji bolnica, krematorijska postrojenja i industrijske luke. Prema literaturi [21] u Europi postoji 25 ostvarenih, u tijeku ili završenih projekata s ciljem iskorištavanja otpadne topline. Trinaest njih se nalazi u Danskoj, a ostatak je diljem Europe. Neke od primjera prikazuje Tablica 2.

### 2.2.1. Rashladni uređaji supermarketa

Broj supermarketa, kao jedne od kategorija trgovina, povećao se u prvom desetljeću trećeg milenija s 53 532 na 58 858 odnosno 10% [22]. Taj trend povećanja pratio je i trend povećanja samih površina supermarketa u iznosu od 26% pa je tako ukupna površina supermarketa u Europi iznosila 44,177 milijuna metara kvadratnih. Samim time i potrošnje energije je narasla. Rashladni uređaji u supermarketima su najveći potrošač električne energije s 47% udjela u ukupnoj potrošnji [22]. Oni su praktički u stalnom pogonu jer skladišni uvjeti za određene namjernice moraju biti stalno smrznuti pa je potrošnja praktički konstantna tijekom godine. Ovakvi uređaji temeljeni su na ljevokretnom ciklusu dvotemperaturnog hlađenja, a u osnovi sastoje se od: dva isparivača, dva kompresora, kondenzatora, dva ekspanzijska ventila te sakupljača kapljevine. Dvije temperaturne razine postoje za zamrznutu hranu koja se održava na razini  $-12$  do  $-18$  °C te onu u hladnjaku koja se održava na razini  $1$  do  $14$  °C [22]. To znači da je temperatura isparavanja na niskotemperaturnom opterećenju u rasponu od  $-40$  do  $-30$  °C, a na srednjetemperaturnom od  $-15$  do  $5$  °C. Kao radni medij najčešće se koriste: klorodifluorometan (HCFC22 ili R22), 1,1,1,2-tetrafluoroetan (R134a) i trifluoroethane (HFC-125 ili R404a) koji spadaju u F-gas regulativu te je u cilju smanjiti njihovu uporabu [22]. Cilj F gas regulative u području tehničkog hlađenja supermarketa jest ograničiti uporabu radnih medija na vrijednosti GWP-a (engl. *Global Warming Potential* – potencijal globalnog zagrijavanja) 2500 od 2020. za novu stacionarnu klimatizacijsku opremu te ograničenje GWP-a na 150 od 2022. za velike multi-kompresorske setove (iznad 40 kW) [23].

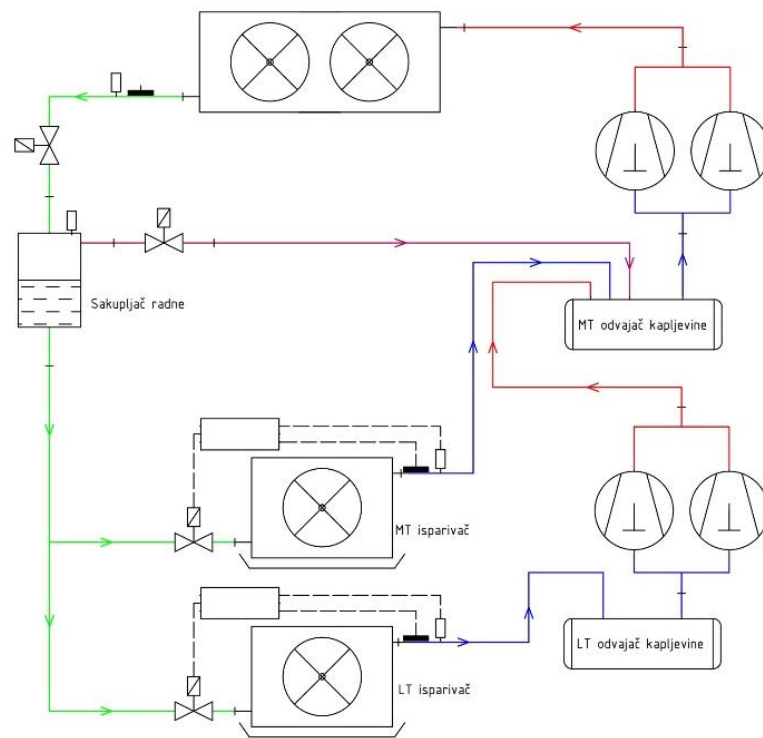
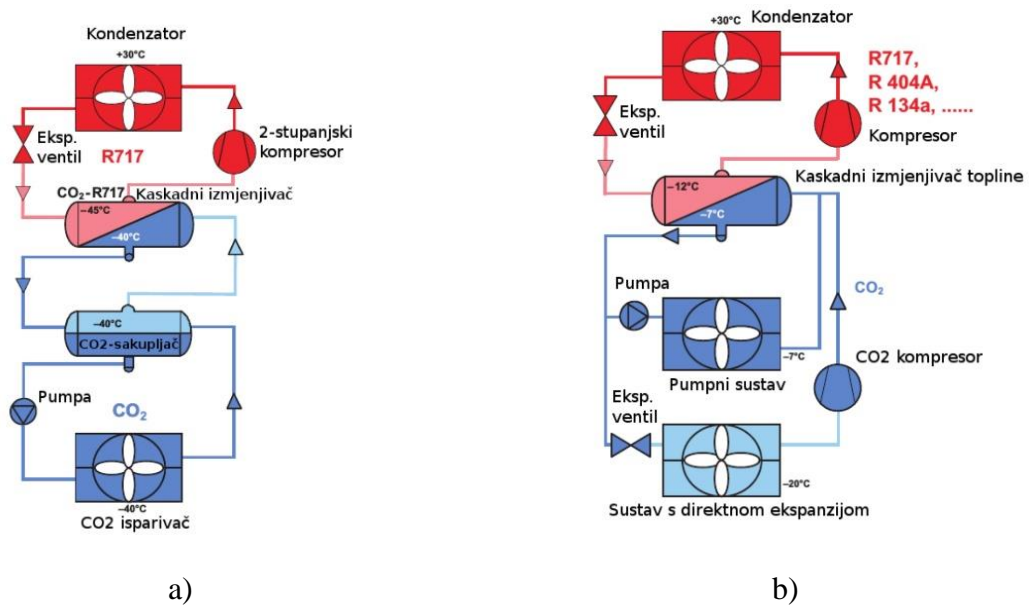
**Tablica 2:** Prikaz realnih primjera iskorištavanja otpadne topline u Europi [21].

Lokacija	Godina izgradnje	Izvor	Instalirani kapacitet [MW]	Temperatura izvora [°C]	COP [-]	Rekuperirana toplina [MWh god <sup>-1</sup> ] / [%]	Investicija [mil. EUR]	Povrat investicije [god]
Skjern (DK)	2012.	tvornica papira	3 x 1,33 DT + 2,0 IT	43	6,9	52% lokalnog CTS-a	3,67	5
Rødskær (DK)	2017.	mljekara	1,6 DT	22-25	4,6	6500	1,87	7
Viborg (DK)	2017.	rashladnici bolničkog kompleksa	2,5 DT	43	7,9	4700 (većina u tri najtoplija mjeseca)	1,00	-
London (UK)	2012.	podzemna željeznica	1 DT + 2 x 0,237 CHP PP ICE	22-28	-	-	-	-
Bergheim (DE)	2014.	rudnik lignita	0,865 DT + 0,314 CHP	27	3,04	-	-	-
Mäntsälä (FI)	2015.	data centar	4,0 DT	40	-	-	-	-
Sandvika (NO)	1989.	otpadne vode	23 DT (ogrjevni) + 9 DT (rashladni)	12	-	-	-	-
Singen (DE)	2004.	otpadne vode	0,243 (ogrjevni) + 0,200 (rashladni)	15	3,9	2000	0,7	-
Aalborg (DK)	2010.	krematorij	2 x 0,550 peći s direktnim IT	800	-	530	0,04	-

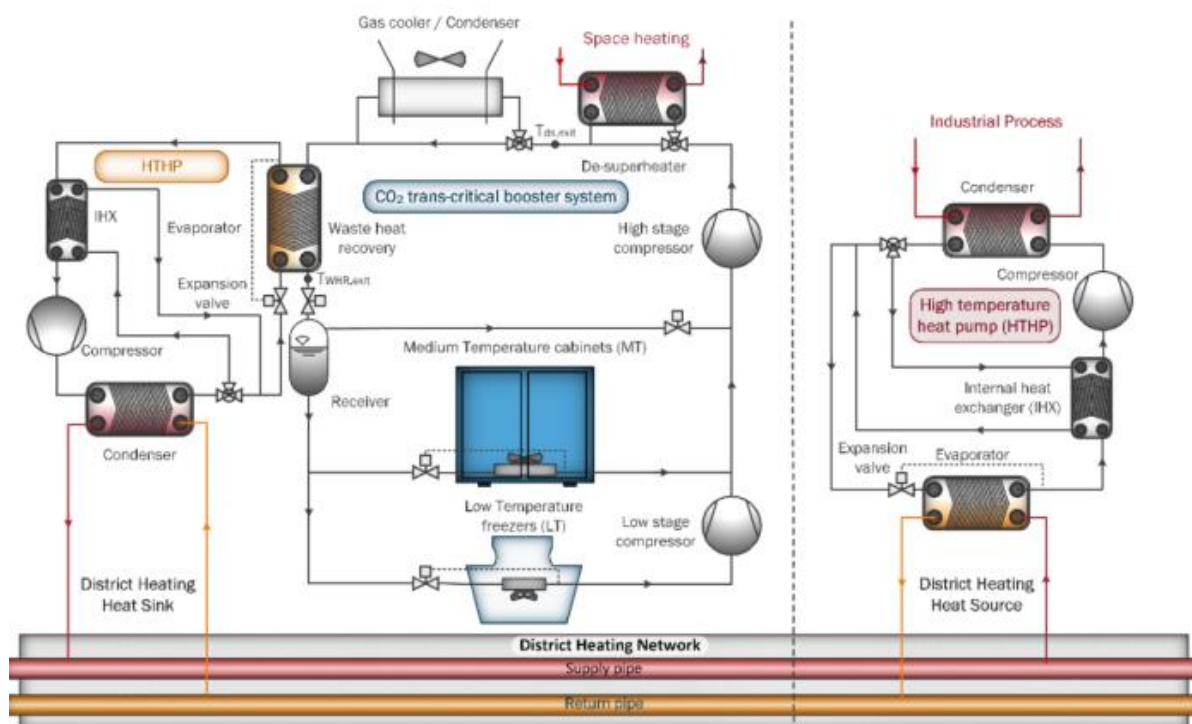
„-“ – podatak nije naveden u literaturi

DT – Dizalica topline; IT – izmjenjivač topline; CHP - (engl. *Combined Heat and Power*) - kogeneracija; ICE – (engl. *Internal Combustion Engine*) - motor s unutarnjim izgaranjem; PP – prirodni plin

Radni mediji koji se navode kao ekološki prihvatljivi u literaturi te dobivaju sve veći zamah su propan (R290) i ugljikov dioksid (R744) [22]. Korištenje R744 kao radnog medija poznato je više od stotinjak godina [24], ali njegova uporaba nije još zaživjela u potpunosti zbog nepoznatosti široj inženjerskoj javnosti. Iako ima malu Carnotovu učinkovitost, R744 nudi puno više prednosti među kojima se ističu: niska kritična točka (31,06 °C i 73,8 bara), jako dobra termodinamička svojstva u podkritičnom i nadkritičnom stanju. U podkritičnom području ima više vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta, omjer kapljevite faze u odnosu na paru povoljniji je u odnosu na druge radne medije što rezultira homogenijem protoku te na kraju, GWP iznosi 1 [24]. R744 najčešće se kao radna tvar koristi u tri vrste ciklusa, a to su kao posredni prijenosnik energije, kaskadni rashladni sustav s direktnom ekspanzijom CO<sub>2</sub> te transkritični rashladni CO<sub>2</sub> *booster* sustav [25]. Kad R744 se koristi kao prijenosnik energije onda postoji primarna tvar koja je najčešće amonijak, R404A ili propan koji kruži u parnom ciklusu. Time se radna tvar u primarnom krugu, koja je u sva tri slučaja zapaljivija i otrovnija, ograničava na strojarnicu. Za niže temperature isparavanja, ispod -30°C najčešće se koristi kaskadni rashladni sustav s direktnom ekspanzijom CO<sub>2</sub>. Glavni nedostatak ovakvog tipa rashladnog sustava je temperaturna razlika između temperature kondenzacije CO<sub>2</sub> i temperature isparavanja primarne radne tvari koja mora postojati kako bi došlo do izmjene topline [25]. Transkritični rashladni CO<sub>2</sub> *booster* sustav je specifičan zbog toga što se ispuštanje topline u okoliš odvija na nadkritičnim vrijednostima tlaka te se zbog toga ne koristi više naziv kondenzator već hladnjak plina (engl. *Gas-Cooler*). Iako ovakvih sustava nema puno u Europi, procijenjeni broj je oko 5500 [22], zbog već spomenutih regulativa oni se sve više ugrađuju u nove supermarkete. S obzirom na to da prema nekim procjenama [22] godišnja potrošnja supermarketa kreće se u rasponu od 327 do 600 kWh, a već spomenuti udio potrošnje jest oko 50%, postoji veliki potencijal otpadne topline. Najučinkovitija rekuperacija događa se *in situ* za pokrivanje dijela potreba za grijanje dok i nakon toga ostane između 5 i 45% topline koja se pomoću hladnjaka plina treba ispustiti u okoliš [10]. Analize [26] pokazuju da je direktna izmjena topline pomoću izmjenjivača topline (IT) termodinamički učinkovita tijekom ljeta kada su temperaturni režimi u CTS-u mali dok je tijekom međusezone (proljeće i jesen) optimalno rješenje kaskadna DT sa zeotropskim radnim medijem. Principijelnu shemu iskorištavanja otpadne topline kao izvora i kao ponora topline prikazuje Slika 4. Na lijevoj strani prikazan je slučaj kada se CTS koristi kao ponor preko DT koja zagrijava povrat dok je desni primjer obrnut slučaj. DT koristi se kako bi dignula temperaturnu razinu polaza za neki od odabranih industrijskih procesa.



**Slika 3:** Sheme sustava s radnom tvari R744: a) kao prijenosnik energije b) kaskadni rashladni sustav s direktnom ekspanzijom CO<sub>2</sub> c) transkritični rashladni CO<sub>2</sub> booster [25]

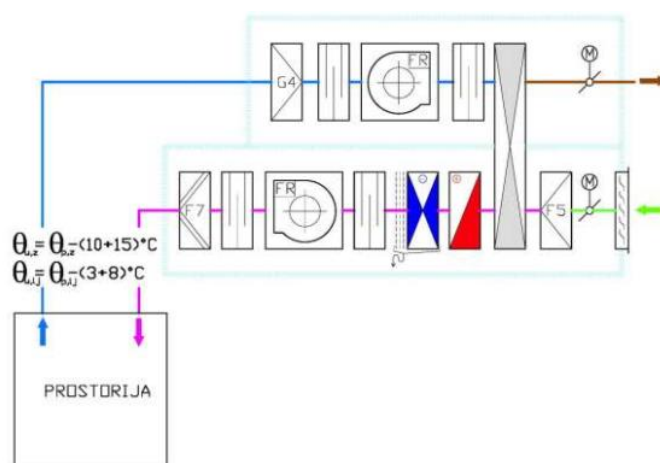


**Slika 4:** Principijelna shema iskorištavanja otpadne topline rashladnog uređaja kao izvora te CTS-a kao izvora [10]

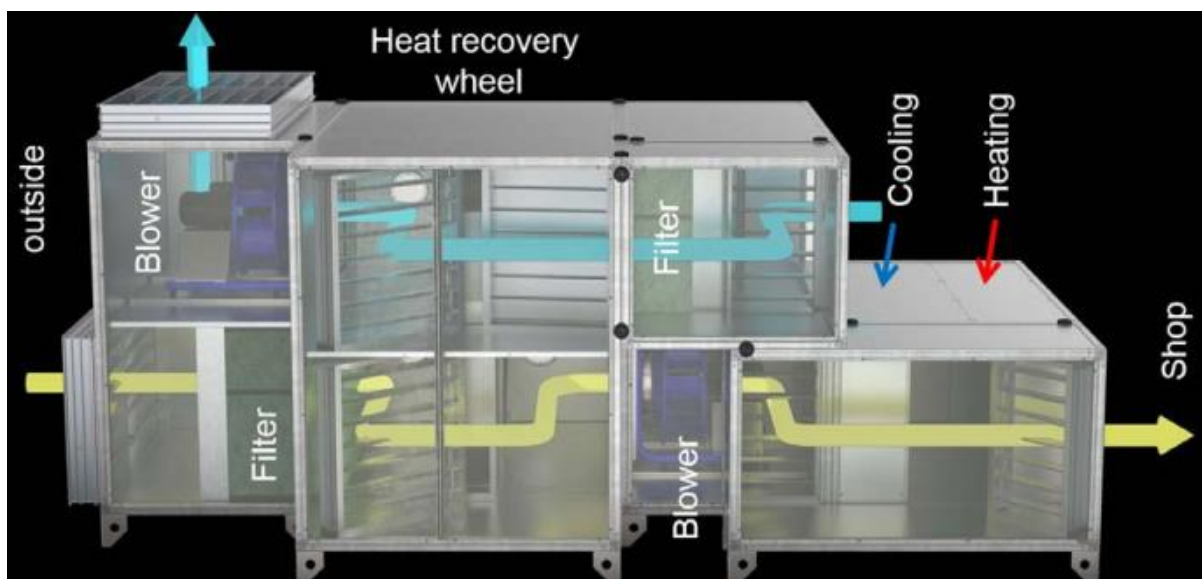
### 2.2.2. Sustavi hlađenja prostora trgovačkih centara i supermarketa

Sustavi hlađenja trgovačkih centara i supermarketa bitan su čimbenik ovih objekata. Naime, prema nekim podacima [27] oko 60% kupaca smatra bitnim toplinsku ugodnost u trgovačkom centru prilikom kupnje ili posjete istom. Trgovački centri u odnosu na supermarkete i nisu toliko veliki potrošači. Njihova je prosječna godišnja potrošnja električne energije za hlađenje u rasponu između 118 i 333 kWh [22]. Potrošnja energije vezana uz sustav hlađenja direktno je vezana uz vrstu klime odnosno vanjsku temperaturu. Podaci potrošnje energije za SAD, koji je podijeljen u pet klimatskih zona, pokazuju da je potrošnja energije za hlađenje u najhladnijim zonama i do 8 puta manja u odnosu na najtoplije koje koriste oko 8% energije za hlađenje [22]. U projektiranju postoje tri načina kako riješiti klimatizacijske sustave, čija je osnovna funkcija hlađenje, trgovačkih centara: VRV sustav u kombinaciji sa VAM zračnim sustavom, paketni jednozonski sustav (zračni sustav) i zračno – vodeni sustav [28]. Kombinacija zračnog sustava – VAM (engl. *Ventilation Air Mounted*) s jedinicama promjenjivog protoka radne tvari – VRV (engl. *Variable Refrigerant Volume*) često se naziva klimatizacijskim sustavom, ali zapravo to nije. Riječ je o odvojenom rješenju za održavanje vlažnosti i ventilaciju pomoću VAM-a te posebnom rješenju za pokrivanje toplinskih gubitaka odnosno dobitaka. Prednosti su manja investicija, manji pogonski troškovi, fleksibilnost u preketanju režima rada te pogon isključivo na električnu energiju [28].

Paketni jednozonski sustav (zračni sustav) rješenje koje je kompaktno i objedinjuje sve potrebne klimatizacijske elemente u jednu cjelinu. Koristi se najčešće za manje prostore, a može se koristiti i u paketnim jedinicama. Postoji mogućnost, uz dodatnu ugradnju potrebnih uređaja, da se ostvari povrat topline, ali generalno ima više nedostataka. Oni se očituju u manjem stupnju iskorištenja, većim troškovima, kompliciranija izvedba povrata topline te shodno položaju (na krovu tzv. *rooftop* jedinica) izloženost vanjskim uvjetima [28]. Treće rješenje jest vodeno-zračni sustav koji se sastoji od vanjske jedinice (klima komore) te unutarnjih jedinica za dopremu zraka smještenih u prostorijama. Izvedbe mogu biti takve tako da u potpunosti pokriju grijanje, hlađenje i ventilaciju prostorija ili parcijalno ili da isključivo rade samo s ventilacijom. Pri projektiranju prvo rješenje se smatra najjednostavnijim jer se time pokrivaju cjelogodišnje potrebe. Shemu ovakvog rješenja prikazuje Slika 5. Vrste klima komora za uporabu u supermarketima u literaturi [22] dijele se na kompaktne i *split* sustave. Dobava toplinske energije događa se ili u grijaču ili u hladnjaku i to pomoću vode ili nekog drugog medija. Primjer klima komore prikazuje Slika 5. Dominantni radni mediji u klima komorama namijenjenima za supermarkete jesu R134a, R410A (*EcoFluor* R410 i *Forane* 410A) i R407C [22]. Preporučene vrijednosti temperatura u prostorijama tijekom ljeta prema njihovoj namjeni u trgovačkom centru nalaze se u rasponu između 22 i 26 °C osim za trgovine s velikim toplinskim opterećenjem i one sa živežnim namjericama [28]. Realna temperatura isparivanja radnog medija iznosi otprilike 3 °C dok idealna ostvariva ide do 12 °C [22].



Slika 5: Klimatizacijsko postrojenje s grijanjem i hlađenjem zraka [28]



**Slika 6:** Prikaz klima komore koja radi u načinu *free cooling* [22]

### 2.2.3. Trafostanice

Trafostanice su bitan čimbenik u svakom elektroenergetskom sustavu (EES). Sastavni su dio prijenosne i distribucijske mreže koje čine uz izvore električne energije i potrošače temeljne elemente EES-a [29]. Prijenosna i distribucijska mreža razlikuju se u naponima na kojima se održavaju te samoj funkciji prijenosa električne energije. Prijenosnom mrežom se električna energija transportira od elektrana do distribucijske mreže i velikih potrošača te razmjenjuje snaga između povezanih elektroenergetskih sustava dok se distribucijskom mrežom električna energija preuzeta iz prijenosne mreže ili manjih elektrana priključenih na distribucijsku mrežu distribuira do srednjih i malih potrošača [29]. Naponske razine i njihova primjena kao ključne razlike mrežnih ili prijenosnih te distribucijskih mreža i prikazuje Tablica 3.

**Tablica 3:** Naponske razine mrežnih i distribucijskih transformatora i njihova primjena [29]

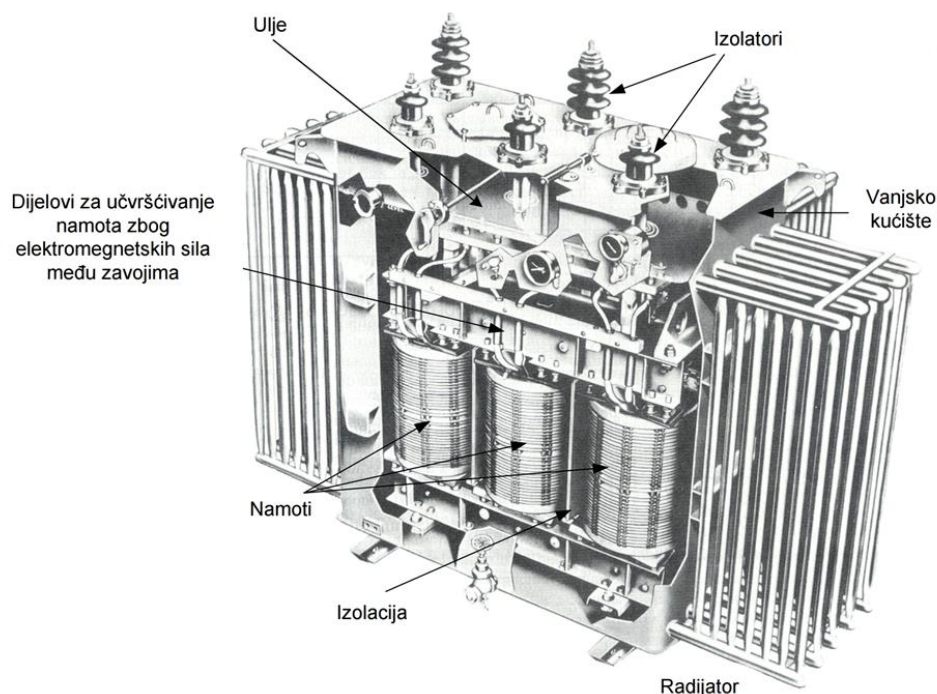
	Put transformacije	Primjeri naponskih razina [kV]
mrežni/ prijenosni	podmreža - podmreža	400/220, 220/110, 400/110
	prijenosna - distribucijska	110/35, 110/10
	prijenosna - veliki industrijski potrošač	110/6
distribucijski	podmreža - podmreža	35/10, 10/0,4
	distribucijska - veliki industrijski potrošač	35/6, 10/0,4



Transformatori su, prema definiciji [30], mirujući elektromagnetski uređaji koji na načelu elektromagnetske indukcije pretvaraju sustav izmjeničnog napona u drugi ili više drugih sustava napona iste frekvencije. Uloga transformatora najznačajnija je u elektroenergetskom sektoru kod prijenosa i razdiobe električne energije. Osnovni dijelovi transformatora su kako slijedi prema [29] te su prikazani na Slika 7.

- željezna jezgra
- primarni, sekundarni, (tercijarni) namot
- izolacija
- kućište transformatora
- dijelovi za učvršćivanje
- rashladni sustav transformatora

Realni transformator se od idealnog razlikuje u postojanju gubitaka koji povećanjem dimenzija samog transformatora praktički iščeznu. Današnji transformatori dostižu učinkovitost čak od 99,8% [29]. Ukupni gubici mogu se podijeliti na gubitke uslijed praznog hoda koji se povezuju s gubicima u željeznoj jezgri te gubitke pri opterećenju koji se povezuju s gubicima u bakru [30].



**Slika 7:** Dijelovi transformatora [29].

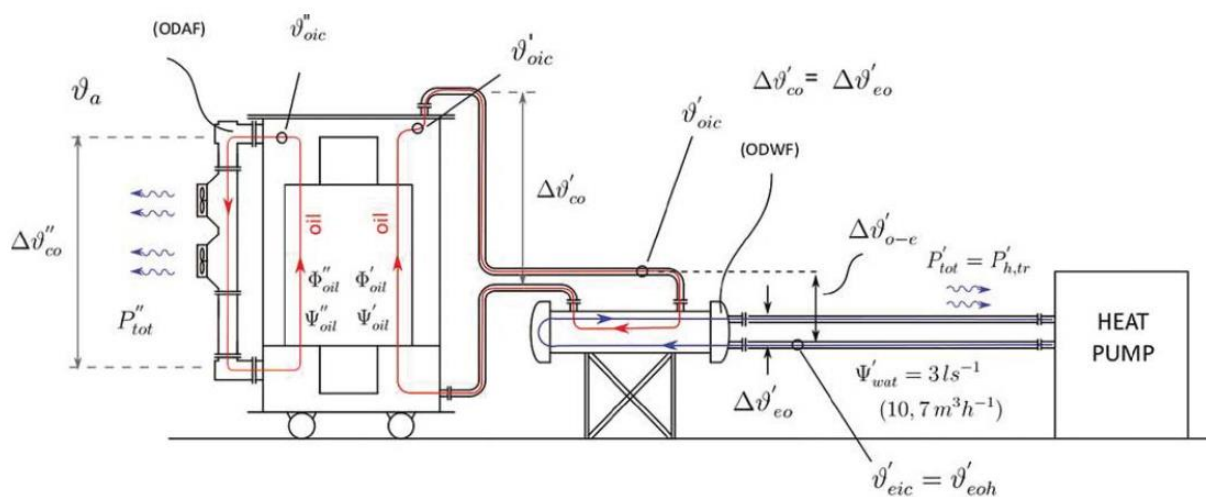
Napomena: željezna jezgra se nalazi ispod namota i dijelova za učvršćenje, pa nije vidljiva na slici.

Gubici praznog hoda posljedica su gubitaka uslijed vrtložnih struja; činjenice da permeabilnost željeza nije konstanta, a ovisnost indukcije i jakosti magnetskog polja nije jednoznačno određena te postojanosti gubitaka uzrokovanih magnetnom pobudom vezanih uz dielektrične gubitke. Gubici pri opterećenju primarno vezane uz kvadrat jakosti struje opterećenja te realnog omskog otpora, gubicima vrtložnih struja izazvane rasutim tokovima u samoj jezgri [30]. Normalne vrijednosti omjera gubitaka u bakru i gubitaka u željezu su između 2 i 5 [28]. Prema zakonu sličnosti [28], snaga transformatora se mijenja s četvrtom potencijom promjene linearne dimenzije, snaga gubitaka odnosno direktno s njima povezana otpadna toplina s trećom potencijom, a površina samog transformatora s drugom potencijom promjene linearne dimenzije. Uzimajući u činjenicu navedeno, iako su veći transformatori učinkovitiji, kod njih je teže odvoditi razvijenu toplinu te je odnos razvijene i odvedene nepovoljniji nego kod manjih. Taj omjer razvijenih gubitaka i površine koja je direktno povezana s odvođenjem topline je vezan s prvom potencijom promjene linearnih dimenzija. Oznaka načina hlađenja koja u 4 slova sažme sve bitno za sustav odvođenja topline transformatora sastoji se od četiri slova: 1. Rashladno sredstvo namota; 2. Način hlađenja namota; 3. Rashladno sredstvo vanjskog hlađenja te 4. Način hlađenja za vanjsko hlađenje. Tablica 4 prikazuje sistematski pregled danih oznaka. Prednosti hlađenja zrakom prirodnom konvekcijom jesu: ekonomska isplativost, nema potrebe za pumpama i ventilatorima, relativno dug životni vijek, skoro nikakvo održavanje te tihi rad, a najveća mana je što zauzima veliku površinu. Jedna od glavnih prednosti prisilnog hlađenja zrakom je mogućnost fleksibilnog rada i široke lepeze opterećenja te manja površina, a nedostatak je što su ventilatori bučni te izloženi atmosferskim uvjetima [31].

**Tablica 4:** Oznake načina hlađenja [32]

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 materijali		

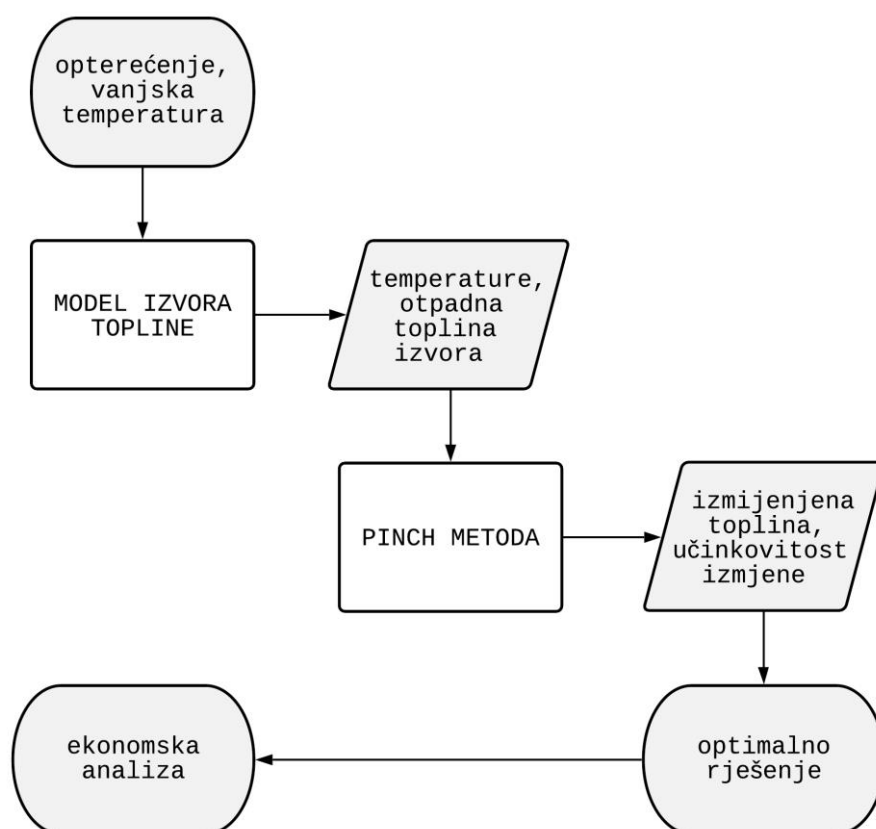
Najveći kapacitet hlađenja, najmanje kontaktnih točaka sa samim transformatorom te kompaktnost mogu osigurati sustavi koji se hlade vodom. Daljnja njihova prednost je mala ili nikakva buka dok su najveće mane mogućnost kontaminacije ulja, obrastanje u cijevima te mogućnost kvara pumpi. U literaturi se iskorištavanje otpadne topline trafostanica jako teško pronalazi. Konkretni primjeri su u Londonu i Innsbrucku. U Londonu, trafostanica 240-MVA, 400/132 kV, opskrbljuje osnovnu školu toplinskom energijom dok se u Innsbrucku toplinskom energijom iskorištava oko 80% otpadne topline trafostanice [11]. Slika 8 prikazuje primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora pomoću izmjenjivača topline ulje – voda s naznačenim nekim projektnim parametrima. Kako će kasnije biti pokazano, razvijena temperatura u transformatoru ponajprije ovisi o opterećenju istog te je upravo zbog toga najučinkovitiji način kvantificiranja toplinskih gubitaka pri nominalnom opterećenju [33]. Ovakvo rješenje ne predstavlja preveliku intervenciju na sami transformator zbog toga što se sami izmjenjivač nalazi na pomičnoj platformi. Također, ovakav način hlađenja vodom, prema procjeni [33] sa 100 kW izmjenjivačem može produžiti vijek trajanja izolacije na dvostruku vrijednost.



**Slika 8:** Primjer iskorištavanja otpadne topline transformatora pomoću izmjenjivača topline ulje – voda i dizalice topline [33]

### 3. METODA

U ovom poglavlju pojašnjeni su modeli odabranih urbanih toplinskih izvora te je prikazana metodologija *pinch* metode i mapiranja izvora u geografskom informacijskom sustavu (GIS). Modeli i proračuni napravljeni su pomoću *Microsoft Excela* i programskog dodatka za termodinamička svojstva *CoolProp* dok je mapiranje izvršeno pomoću *QGIS 3* računalnog paketa. Metoda se zasniva na termodinamičkim modelima promatranih objekata uz ulazne podatke opterećenja te temperaturu zraka nakon čega su dobiveni rezultati u obliku ulazne i izlazne temperature izvora te samog iznosa otpadne topline. Ti podaci ulaze u *pinch* metodu te na kraju rezultat predstavlja optimalno rješenje za koje se provodi ekonomska analiza. Za svaki model izvora topline, ovisno o pretpostavkama, dobivena je temperaturna ovisnost i ovisnost o opterećenju sustava. Objasnjena metoda, shematski prikazuje Slika 9.



Slika 9: Shema metode

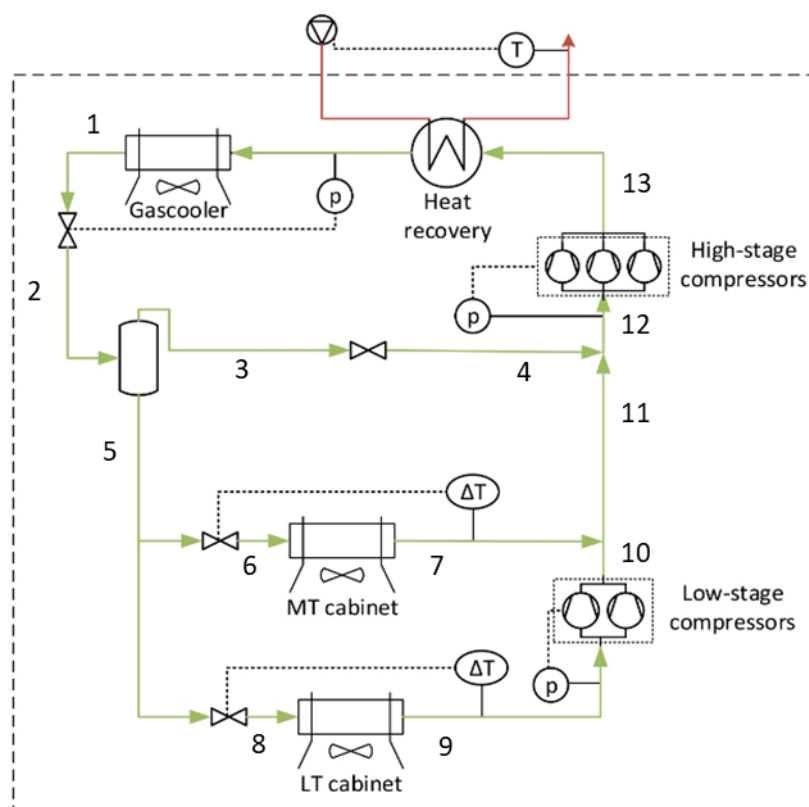
### 3.1. Urbani toplinski izvori

#### 3.1.1. Model rashladnog uređaja supermarketa

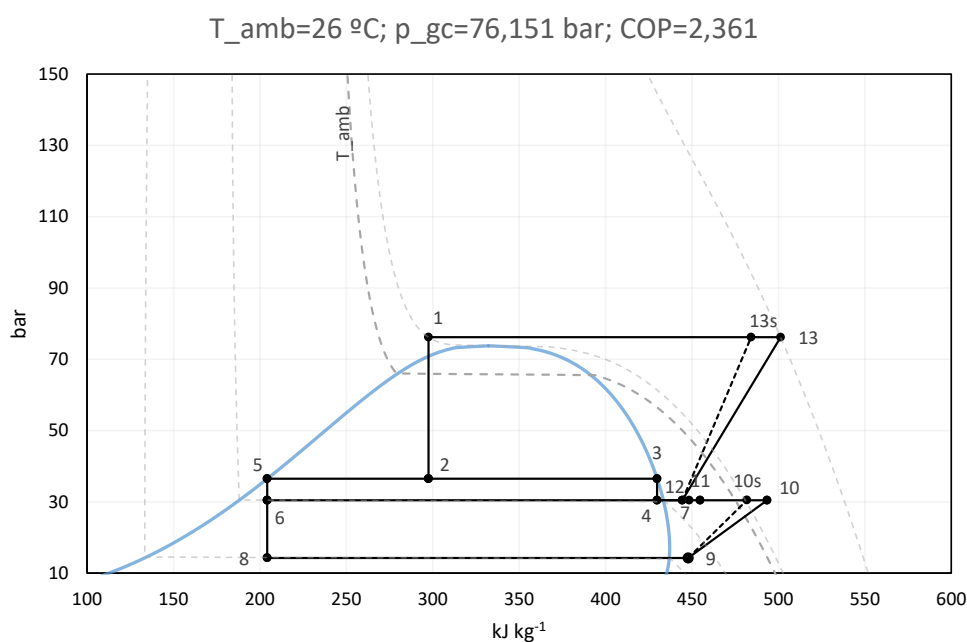
Model rashladnog uređaja supermarketa temelji se na transkritični rashladnom CO<sub>2</sub> *booster* sustavu (radna tvar R744). Shematski prikaz transkritičnog rashladnog CO<sub>2</sub> *booster* sustava prikazuje Slika 10 dok ph dijagram (dijagram tlaka i specifične entalpije) prikazuje Slika 11.

Referentni rashladni sustav sastoji se od:

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



**Slika 10:** Shematski prikaz transkritičnog rashladnog CO<sub>2</sub> *booster* sustava. Adaptirano prema [34]



**Slika 11:** Prikaz p-h dijagrama za radnu tvar R744 u navedenim projektним parametrima

### 3.1.1.1. Rashladno opterećenje

Prema već spomenutom u Poglavlju 2.2.1 vezanom za temperature opterećenja, pretpostavljene su temperature isparavanja radne tvari za nisko i srednjetemperaturno opterećenje. Shodno tome, uz pomoć *CoolPropa* za radnu tvar dobiven je tlak isparavanja. Toplinsko opterećenje pretpostavljeno je prema podacima iz [35] i [34].

$T_{LT} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$	- temperatura isparavanja niskotemperaturnog opterećenja
$p_{LT} = 14,728\text{ bar}$	- tlak isparavanja niskotemperaturnog opterećenja
$T_{MT} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	- temperatura isparavanja srednjetemperaturnog opterećenja
$p_{MT} = 30,459\text{ bar}$	- tlak isparavanja srednjetemperaturnog opterećenja
$\Phi_{LT} = 20\text{ kW}$	- niskotemperaturno rashladno opterećenje
$\Phi_{MT} = 123\text{ kW}$	- visokotemperaturno rashladno opterećenje

### 3.1.1.2. Pregrijanje rashladnog medija

Pregrijanje rashladnog medija, odnosno povišenje temperatura u oba isparivača iznad temperature isparivanja, vrši se kako bi se izbjegla kapljevitost faza pri ulazu u kompresor koja izaziva hidraulički udar. Temperaturne razlike pregrijanja obično iznose od 5 do 10 °C. Konzervativno je prema [25] odabrana viša vrijednost. Poznavanjem iznosa pregrijanja lako se preko temperatura i tlakova dolazi do stanja u točki 7 odnosno 9.

$$T_9 = T_{LT} + \Delta T_{SH}$$

$$T_7 = T_{MT} + \Delta T_{SH}$$

- $\Delta T_{SH} = 10 \text{ °C}$  - temperaturna razlika pregrijanja  
 $T_9$  - temperatura nakon niskotemperaturnog isparivača  
 $T_7$  - temperatura nakon srednjeteraturnog isparivača

### 3.1.1.3. Protok radne tvari kroz isparivače

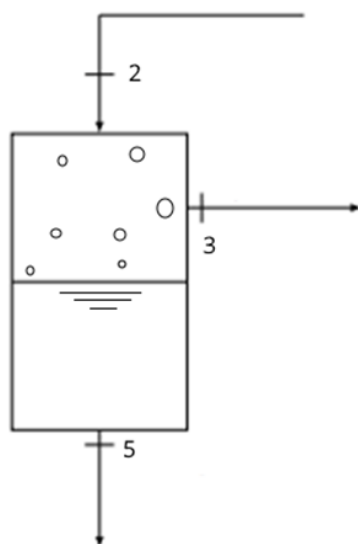
$$q_{m,LT} = \frac{\Phi_{LT}}{h_9 - h_8}$$

$$q_{m,MT} = \frac{\Phi_{MT}}{h_7 - h_6}$$

- $h_6$  - entalpija radne tvari prije srednjeteraturnog isparivača [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $h_7$  - entalpija radne tvari poslije srednjeteraturnog isparivača [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $h_8$  - entalpija radne tvari prije niskotemperaturnog isparivača [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $h_9$  - entalpija radne tvari poslije niskotemperaturnog isparivača [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $q_{m,MT}$  - protok radne tvari u srednjeteraturnom isparivaču [kg s<sup>-1</sup>]  
 $q_{m,LT}$  - protok radne tvari u niskotemperaturnom isparivaču [kg s<sup>-1</sup>]

### 3.1.1.4. Sakupljač kapljevine

U rashladnom CO<sub>2</sub> *booster* sustavu sakupljač ima dvojaku funkciju, upotrebljava se kao spremnik radne tvari i kao odvajač kapljevine i pare [25]. U sakupljač ulazi mokra para radne tvari sa stanja 2, a kapljevina i para odvajaju se na stanja 3 i 5. Obilazni vod (tzv. *bypass*) s ventilom omogućuje održavanje tlaka u sakupljaču i to na način da uslijed promjene tlaka u sakupljaču ventil povećava ili smanjuje protok pare radne tvari. Razlika tlaka između sakupljača i isparivača s najvećom temperaturom isparavanja, u ovom slučaju isparivač srednjetermperaturnog opterećenja, određena je uvjetom ostvarivanja protoka kroz ekspanzijski ventil [25] te samom čvrstoćom sakupljača. Postavljanjem zakona očuvanja mase za realne plinove uz pretpostavku savršeno izoliranog mješališta, mogu se dobiti protoci kroz zaobilazni vod te ukupan protok radne tvari.



**Slika 12:** Shematski prikaz sakupljača kapljevine

$$q_{m,WF} = q_{m,LT} + q_{m,MT} + q_{m,BP} = q_{m,i} + q_{m,BP}$$

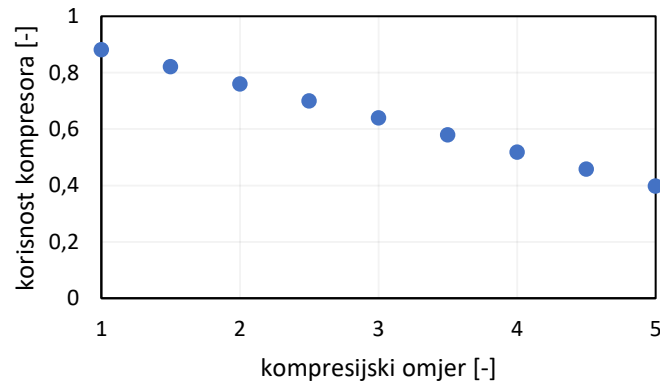
$$q_{m,WF} = \frac{q_{m,i}}{(1 - x_2)}$$

- $q_{m,WF}$  - protok radne tvari u cijelom sustavu [kg s<sup>-1</sup>]
- $q_{m,i}$  - protok radne tvari u isparivačima [kg s<sup>-1</sup>]
- $q_{m,BP}$  - protok radne tvari kroz zaobilazni vod [kg s<sup>-1</sup>]
- $x_2$  - stupanj zasićenja radne tvari na ulazu u sakupljač [-]



### 3.1.1.5. Korisnost i snaga kompresora

Empirijski izraz za izentropsku korisnost kompresora Danfoss A/S namijenjenog za rad s radnom tvari R744 u funkciji kompresijskog omjera dan je u [36].



**Slika 13:** Izentropska ovisnost kompresora u ovisnosti o kompresijskom omjeru

$$\eta = 1,003 - 0,121 \frac{p_{gc}}{p_{MT}}$$

$$h_{13} = \frac{h_{13s} - h_{12}}{\eta} + h_{12}$$

$$h_{13s} = f(s_{13s} = s_{12}, p_{gc})$$

$$P_{MT} = q_{m,WF}(h_{13} - h_{12})$$

$$P_{LT} = q_{m,LT}(h_9 - h_8)$$

- $\eta$  - izentropska korisnost kompresora [-]
- $\frac{p_{gc}}{p_{MT}}$  - kompresijski omjer [-]
- $h_{12}$  - entalpija radne tvari na usisu u kompresor [kJ kg<sup>-1</sup>]
- $h_{13s}$  - izentropska entalpija radne tvari na isisu kompresora [kJ kg<sup>-1</sup>]
- $s_{13s}$  - izentropska entropija radne tvari na isisu kompresora [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]
- $s_{12}$  - entropija radne tvari na usisu kompresora [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]
- $p_{gc}$  - tlak u hladnjaku plina [bar]
- $P_{MT}$  - snaga srednjetemperaturnog kompresora [kW]
- $P_{LT}$  - snaga niskotemperaturnog kompresora [kW]

### 3.1.1.6. Hladnjak plina i učinkovitost procesa

Za razliku od podkritičnih vrijednosti tlaka kada se pri kondenzaciji pojavljuje klasičan kondenzator u kojem je temperatura kondenzacije povezana s tlakom, pri nadkritičnim vrijednostima ne pojavljuje se jednoznačna povezanost između tlaka i temperature. Za istu temperaturu, ali veći nadkritični tlak, povećava se rad kompresora te se ekspanzijska točka približava nižim vrijednostima zasićenja. Zbog navedenog, potrebno je odabrati optimalan tlak u hladnjaku plina kako bi sustav imao maksimalnu učinkovitost. Da bi se dobio optimalan iznos tlaka u hladnjaku plina, nužno je definirati izlaznu temperaturu i to prema iskustvenom podatku kako slijedi.

$$T_1 = f(T_{\text{amb}}) = \begin{cases} 20 \text{ }^\circ\text{C}, & T_{\text{amb}} < 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{\text{amb}} + \Delta T_{\text{pp}}, & T_{\text{amb}} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

$T_1$  - izlazna temperatura radne tvari iz hladnjaka plina [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{\text{amb}}$  - okolišna temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T_{\text{pp}}$  - *pinch* točka, najmanja temperaturna razlika struja u izmjenjivaču [ $^\circ\text{C}$ ]

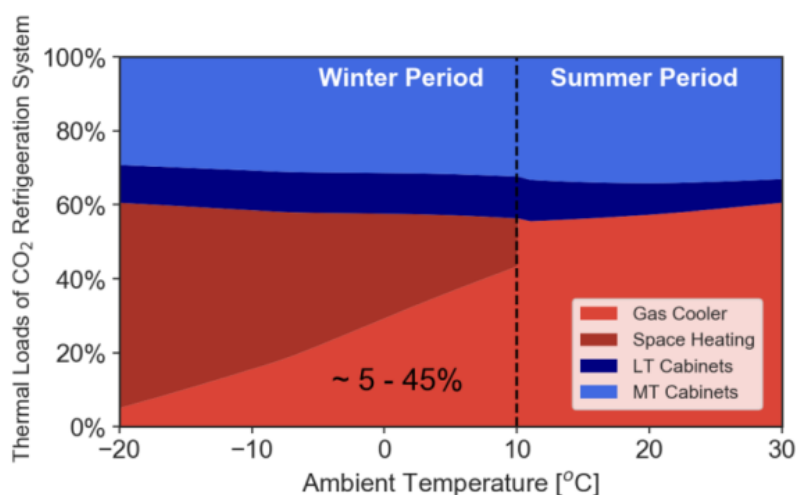
Za funkciju cilja odabrano je maksimiziranje učinkovitosti pomoću toplinskog množitelja – COP-a (engl. *Coefficient Of Performance*). On je definiran za ljevokretne termodinamičke cikluse kao omjer rashladnog učina i priključne snage isparivača.

$$COP = \frac{\Phi_{\text{MT}} + \Phi_{\text{LT}}}{P_{\text{MT}} + P_{\text{LT}}}$$

Funkcija cilja	$COP = f(p_{\text{gc}})$
Vrsta optimizacije	maksimizacija
Prividno ograničenje	$20 \text{ }^\circ\text{C} < T_1 < T_{\text{amb,max}} + \Delta T_{\text{pp}}$
Metoda	GRG Nonlinear
Optimizacijska varijabla	$p_{\text{gc}}$

### 3.1.1.7. Rekuperacija topline

Iako su transkritični rashladni sustavi među jednima od najučinkovitijih upravo zbog činjenice da operiraju na višim tlakovima, i dalje postoji određeni iznos toplinske energije koju moraju ispustiti u okoliš. Neke studije [22] su pokazale da se skladištenjem otpadne topline iz ovakvih procesa može uštedjeti 50 % potrebne energije za viškove tijekom zime.



**Slika 14:** Prikaz relativnih opterećenja prosječnog supermarketa u ovisnosti o vanjskoj temperaturi [10]

Kao što prikazuje Slika 14, tijekom godine nakon podmirivanja svih potreba ostaje između 5 i 45% otpadne topline koja se mora izmijeniti sa vanjskim zrakom pomoću hladnjaka plina. Definirana je krivulja koja opisuje koliko i pri kojoj se temperaturi rekuperira topline. Množeci faktor  $\beta$  s definiranom toplinom koja se mora ispustiti pomoću hladnjaka plina dobiva se otpadna topline nakon rekuperacije.

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

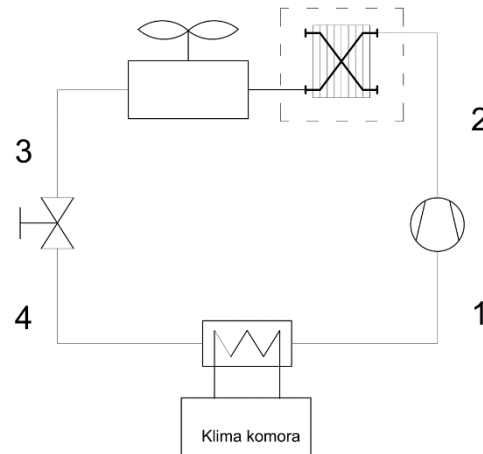
$\beta$  - faktor ostatka otpadne topline nakon rekuperacije za grijanje [-]

$T_{amb}$  - vanjska temperatura zraka [°C]

### 3.1.2. Model sustava hlađenja prostora trgovačkih centara i supermarketa

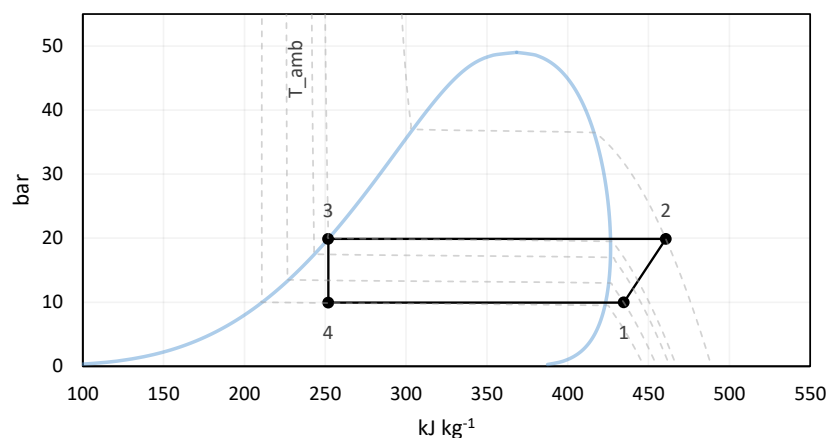
U ovom je potpoglavlju predstavljen ljevokretni ciklus hlađenja za supermarket i trgovački centar. Za referentnu radnu tvar odabran je R410a kao najzastupljenije rashladno sredstvo u primjeni za trgovačke centre i supermarkete [37]. Slično kao i u prethodnom potpoglavlju, referentni sustav sastoji se od:

- kompresora
- kondenzatora
- ekspanzijskog ventila
- isparivača povezanog na klima komoru
- pločastog izmjenjivača topline za rekuperaciju



**Slika 15:** Shematski prikaz referentnog sustava hlađenja

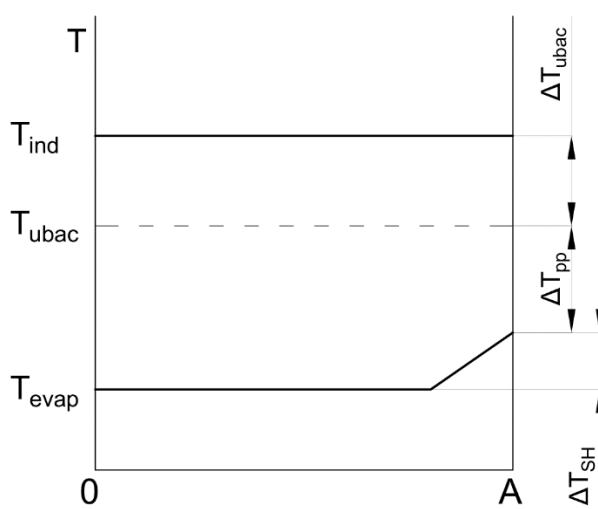
$$T_{amb}=27\text{ }^{\circ}\text{C}; p_{gc}=19,88\text{ bar}; \text{COP}=7,01$$



**Slika 16:** Prikaz ph dijagrama za radnu tvar R410a u navedenim projektним parametrima

### 3.1.2.1. Rashladno opterećenje

Kako je već spomenuto, ostvarive temperature isparavanja radne tvari nalaze se u rasponu između 3 i 12 °C. Da bi se došlo do te temperature, potrebno je postaviti okvirnu shemu izmjene topline. Polazišna je točka ambijentalna temperatura unutar trgovačkog centra odnosno supermarketa. Temperatura ubacivanja zraka u prostoriju prema [28] mora biti između 3 i 8 °C. Na to se nadovezuje *pinch* točka koja se pojavljuje u razlici temperature nakon pregrijanja radnog medija i temperature ubacivanja. Opisano riječima prikazuje Slika 17.



**Slika 17:** Načelna shema prijenosa topline na granici sustava klima komore i radne tvari

$$T_{evap} = T_{ind} - \Delta T_{ubac} - \Delta T_{pp} - \Delta T_{SH}$$

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| $T_{ind} = 24 \text{ °C}$        | - projektna temperatura unutar promatranog objekta [°C]         |
| $\Delta T_{ubac} = 7 \text{ °C}$ | - temperaturna razlika zraka koji se ubacuje [°C]               |
| $\Delta T_{pp} = 5 \text{ °C}$   | - <i>pinch</i> točka, najmanja temperaturna razlika struja [°C] |
| $\Delta T_{SH} = 5 \text{ °C}$   | - temperaturna razlika pregrijanja [°C]                         |
| $T_{evap} = 7 \text{ °C}$        | - temperatura isparivanja [°C]                                  |

Temperatura na kondenzatoru i učinkovitost u obliku COP-a modelirani su prema principu prikazanom u 3.1.1.6, dok je učinkovitost kompresora modelirana prema principu iz 3.1.1.5.

### 3.1.3. Model trafostanice

U ovom poglavlju predstavljen je model trafostanice koji se sastoji od tri ključna dijela: odabira referentnog transformatora, kvantifikacije ukupnih toplinskih gubitaka i same temperature izvora. No, da bi se dobila cjelokupna slika trafostanice, potrebno je odrediti i referentnu trafostanicu. Referentna trafostanica ovisi o standardu koji se koristi u upotrebljava u pojedinoj zemlji te će referentna trafostanica biti definirana kasnije.

#### 3.1.3.1. Referentni transformator

Referentni transformator sa svim svojim dostupnim podacima preuzet je iz [38]. To je energetska transformator tvrtke ABB iz 1992. godine za prijenos električne energije s primarnog na sekundarni napon prijenosne mreže grada Milana. Tablica 5 prikazuje tehničke podatke referentnog transformatora korištene u modelu.

**Tablica 5:** Tehnički podaci referentnog transformatora [38]

Naziv	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
primarni napon	$U_h$	220	kV
sekundarni napon	$U_l$	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	$\Phi_{loss}$	236	kW
udio otpadne topline	$\Phi_{loss}/P_n$	0,37%	

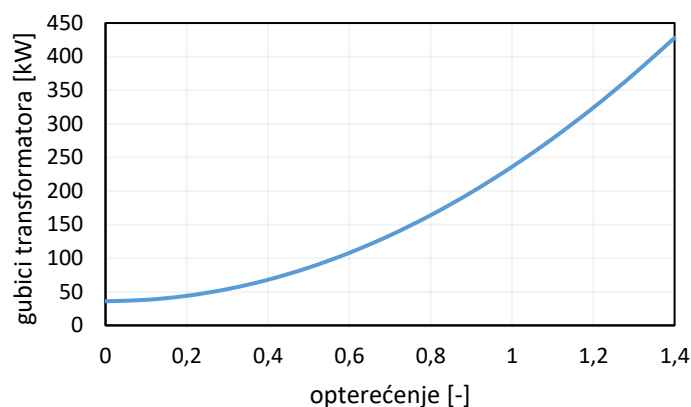
#### 3.1.3.2. Toplinski gubici pri opterećenju

S obzirom na činjenicu da gubici uslijed opterećenja odnosno gubici u bakru ovise direktno o jakosti struje koja prolazi kroz transformator, a posljedično tome i snazi, za ovisnost tih gubitaka u funkciji opterećenja uzet je izraz iz [33]. Grafički prikaz ove funkcije pokazuje Slika 18.

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

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

$K$           relativno opterećenje transformatora [-]

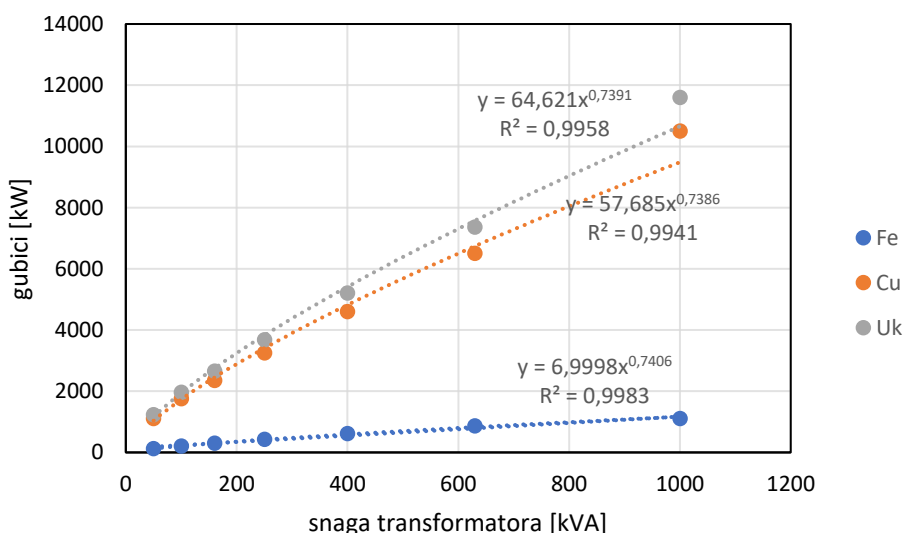


**Slika 18:** Grafički prikaz ukupnih gubitaka u ovisnosti o opterećenju

### 3.1.3.3. Toplinski gubici sličnog transformatora

Snaga transformatora mijenja se polinomom četvrtog reda u ovisnosti o promjeni linearne dimenzije, a gubici s trećim polinomom. Realni podaci za distributivne transformatore marke Končar D&ST serije 8EuTBN s pripadajućim regresijskim krivuljama prikazuje Slika 19. Preklapajući spomenuta dva izraza tako da se eliminira promjena linearne dimenzije dobiva se sljedeći izraz:

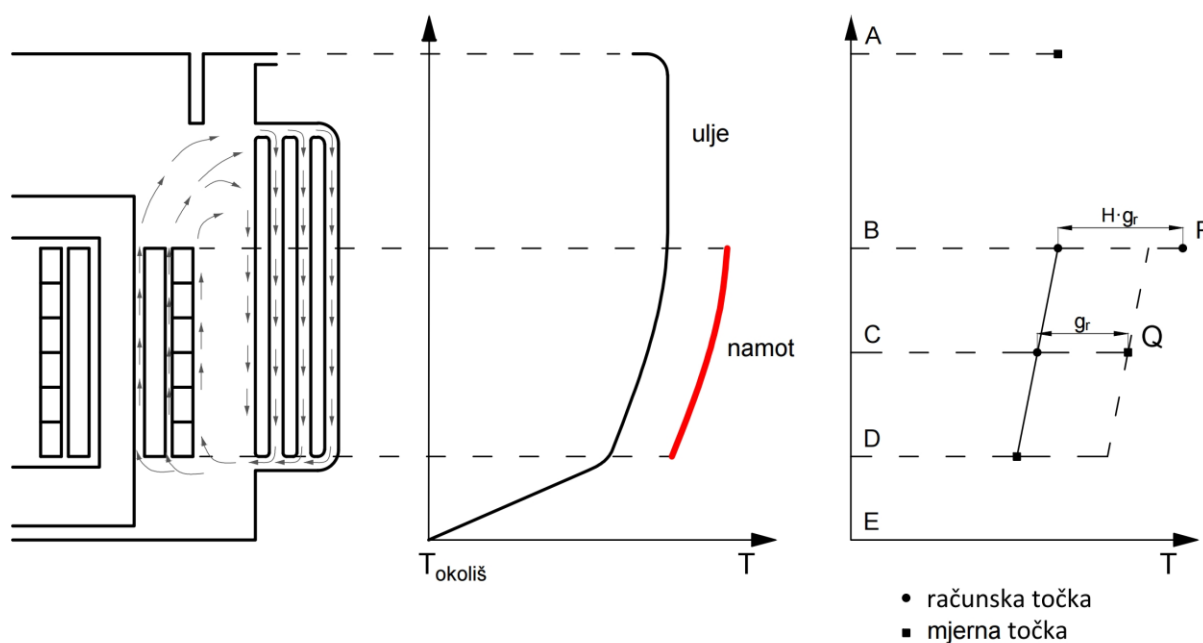
$$Q' = Q \left( \frac{P'}{P} \right)^{\frac{3}{4}}$$



**Slika 19:** Promjena gubitaka sličnog distribucijskog transformatora u odnosu na promjenu snage transformatora

### 3.1.3.4. Temperaturni režimi

Tijekom eksploatacije transformatora, dio dovedene energije troši se na pokrivanje gubitaka te se većinom ista pretvara u toplinu. Posljedično tome, temperatura tijela povisuje se iznad okolišne te se ta temperatura naziva nadtemperaturom. Najviše se topline razvija u vodičima namota čija je izolacija u usporedbi s ostatkom transformatora, najosjetljivija na utjecaj povišenih temperatura [30]. U transformatorima potopljenima uljem, a koji su prema literaturi najčešći u praksi [31], postoji temperaturna visinska stratifikacija. Nju prikazuje Slika 20 kao i prikaz ključnih temperaturnih točaka duž visinske kote transformatora. Na slici je temperaturna raspodjela linearno ovisna o visinskoj koti, a to ponajprije ovisi o načinu hlađenja samog transformatora, tj. o eksponentu hlađenja  $\chi$ .



**Slika 20:** Načelna shema temperaturne stratifikacije u transformatoru te prikaz ključnih temperaturnih točaka. Izrađeno prema [32]

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-spot*; P – najtoplija točka (*hot-spot*); Q – srednja temperatura namota određena iz mjerenja otpora



Nadtemperatura na vrhu ulja (Slika 20 točka B) kao i nadtemperatura ulja na dnu transformatorskog kotla (Slika 20 točka D) računaju su prema sljedećim izrazima iz standarda za transformatore uronjene u uljno rashladno sredstvo [39]. Slika 21 grafički prikazuje tu funkcijsku ovisnost.

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

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

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

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

$K$  opterećenje [-]

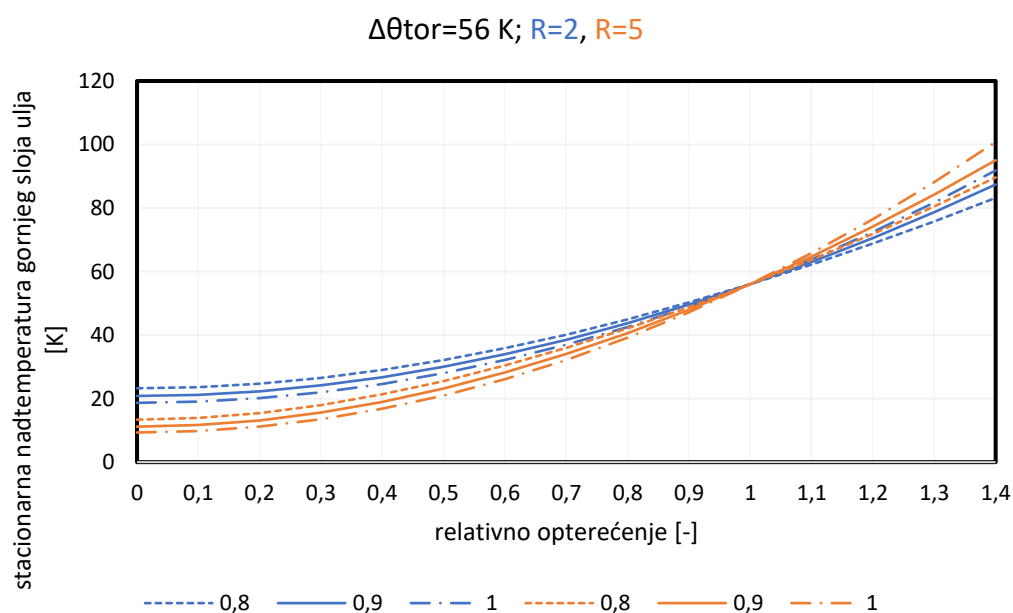
$\chi = 0,8$  eksponent hlađenja ulja [-]

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

$\Delta\theta_{bo}$  stacionarna nadtemperatura donjeg sloja ulja [K]

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

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

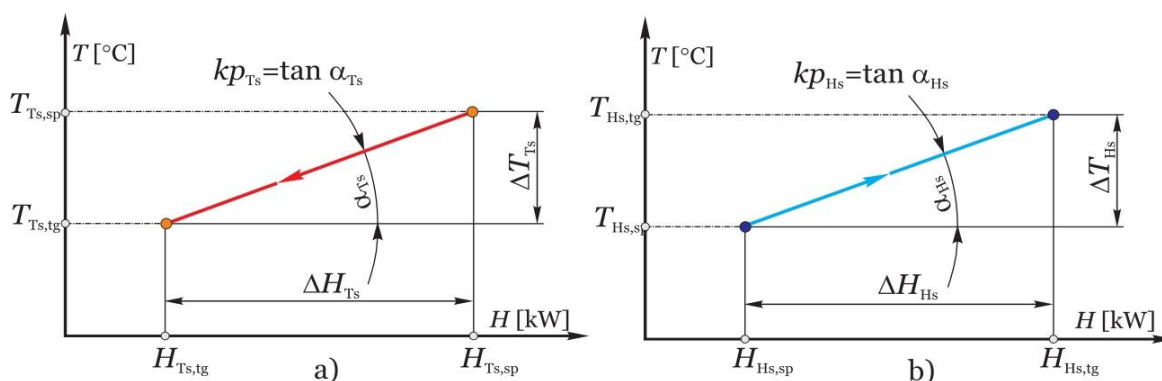


**Slika 21:** Funkcijska ovisnost stacionarne nadtemperature gornjeg sloja ulja o opterećenju

### 3.2. Model pinch metode

#### 3.2.1. Osnove pinch metode

Pinch metoda jedna je od osnovnih metoda sinteze mreže izmjenjivača topline kojom se koristi u projektiranju procesa i postrojenja. To je grafičko-matematička metoda koja se temelji na termodinamičkim osnovama prvog glavnog stavka. Dijagram u kojem se promatraju struje naziva se dijagram temperatura – entalpija zbog toga što se na osi apscisa nalazi entalpija, a na osi ordinata temperatura.



Slika 22: a) Prikaz tople struje u T-H dijagramu b) prikaz hladne struje u T-H dijagramu [40]

Polazeći od diferencijalnog oblika prvog glavnog stavka termodinamike te dodajući člana uz diferencijal tlaka (zbog toga što se ovakvi procesi događaju pri konstantnom tlaku) mogu se dobiti izrazi koji egzaktno opisuju tople i hladne struje koje prikazuje Slika 22. U drugom koraku integracije vidljivo je da je glavna pretpostavka konstantan specifični toplinski kapacitet.

$$dq = dh - vdp$$

$$dq = dh$$

$$q = \int_{h_{sp}}^{h_{tg}} dh = h_{tg} - h_{sp} = \int_{T_{sp}}^{T_{tg}} c_p dT = c_p (T_{tg} - T_{sp})$$

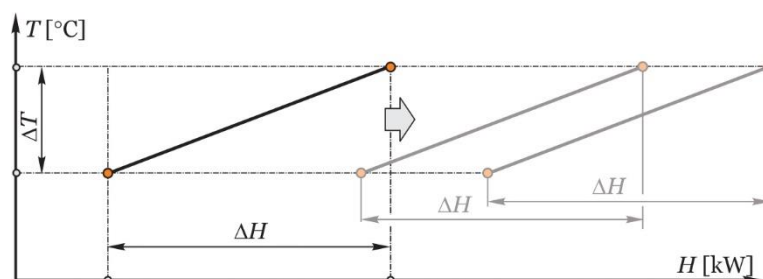
$$Q = q_m \cdot q = q_m c_p (T_{tg} - T_{sp}) = C_p (T_{tg} - T_{sp}) =$$

$$kp_{Ts} = \tan \alpha_{Ts} = \frac{-1}{C_{Ts}} = \frac{-1}{q_{m,Ts} c_{p,Ts}}$$

$$kp_{Hs} = \tan \alpha_{Hs} = \frac{1}{C_{Hs}} = \frac{1}{q_{m,Hs} c_{p,Hs}}$$

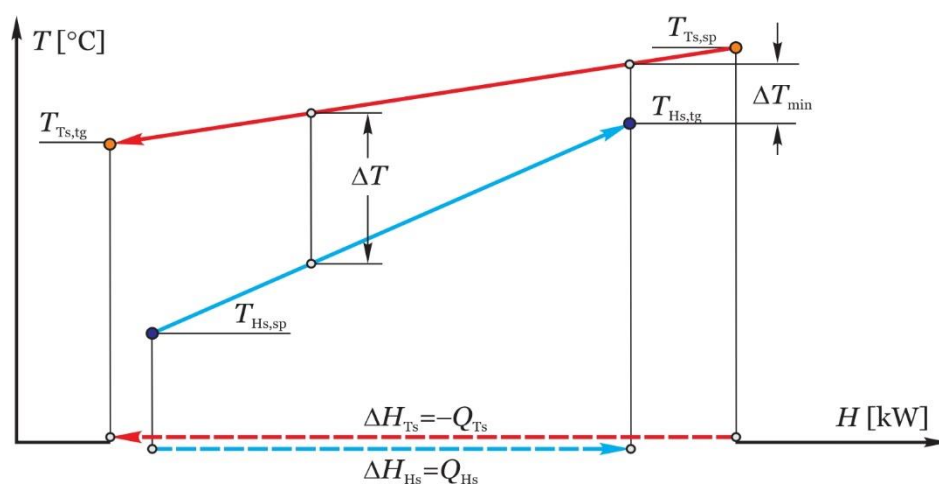
$q$	- specifični toplinski tok [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]
$h$	- specifična entalpija [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]
$v$	- specifični volumen [ $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ]
$h_{\text{tg}}$	- specifična entalpija konačnog stanja struje [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]
$h_{\text{sp}}$	- specifična entalpija početnog stanja struje [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]
$T_{\text{tg}}$	- temperatura konačnog stanja struje [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{sp}}$	- temperatura početnog stanja struje [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$kp_{\text{Ts}}$	- koeficijent nagiba pravca tople struje [ $^{\circ}\text{C W}^{-1}$ ]
$\alpha_{\text{Ts}}$	- kut nagiba pravca tople struje [ $^{\circ}$ ]
$C_{\text{Ts}}$	- toplinski kapacitet tople struje [ $\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$c_{p,\text{Ts}}$	- specifični toplinski kapacitet tople struje [ $\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$q_{m,\text{Ts}}$	- maseni protok tople struje [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
$kp_{\text{Hs}}$	- koeficijent nagiba pravca hladne struje [ $^{\circ}\text{C W}^{-1}$ ]
$\alpha_{\text{Hs}}$	- kut nagiba pravca hladne struje [ $^{\circ}$ ]
$C_{\text{Hs}}$	- toplinski kapacitet hladne struje [ $\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$c_{p,\text{Hs}}$	- specifični toplinski kapacitet hladne struje [ $\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$q_{m,\text{Hs}}$	- maseni protok hladne struje [ $\text{kg s}^{-1}$ ]

Iz prikazanih jednadžbi razvidno je da entalpijski pad odnosno rast ovise isključivo o toplinskom kapacitetu i padu temperature iz čega proizlazi da je na T-H dijagramu bitna samo razlika, a ne apsolutne vrijednosti početne i krajnje točke. To znači da se pravci po dijagramu mogu pomicati u smjeru osi apscisa, što prikazuje Slika 23.



**Slika 23:** Prikaz svojstva pomicanja po osi apscise pravca struje [40]

*Pinch* na engleskom znači pritisnuti ili uštipnuti što odlično opisuje samu metodu. Naime pri promatranju dviju struja točka u kojoj su dvije struje najbliže naziva se *pinch* točkom. Gledano termodinamički, ali i geometrijski, da bi se ostvarila izmjena topline potrebna su tri uvjeta: u skladu s drugim glavnim stavkom potrebna je temperaturna razlika dviju struja, odgovarajuća veličina i smjer promjene entalpije definirane početnom i krajnjom temperaturom te na kraju postojanje minimalne dozvoljene temperaturne razlike tj. *pinch* točke. Ova tri uvjeta prikazuje Slika 24.

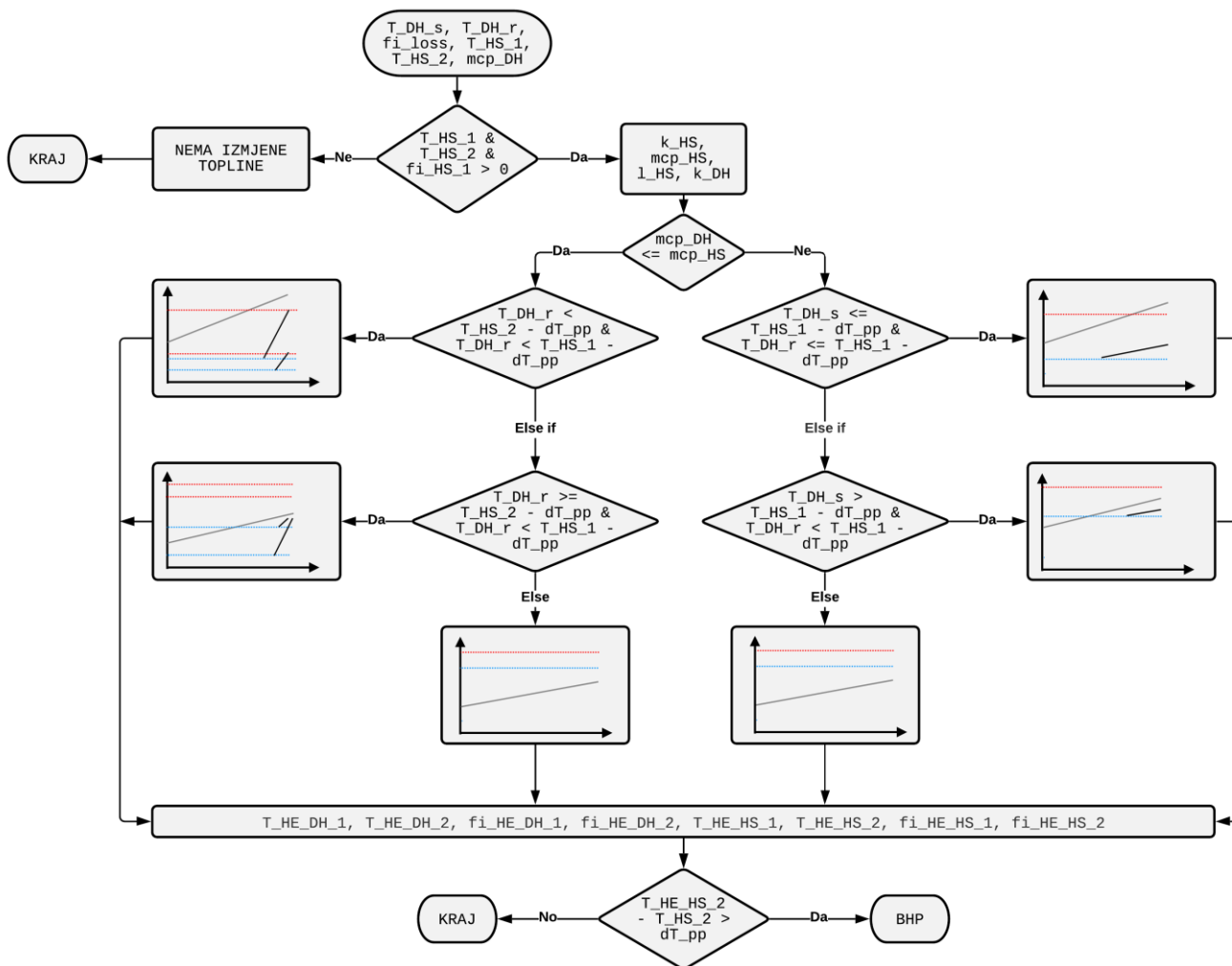


**Slika 24:** Prikaz izmjene topline između tople i hladne struje [40]

### 3.2.2. Tijek proračuna

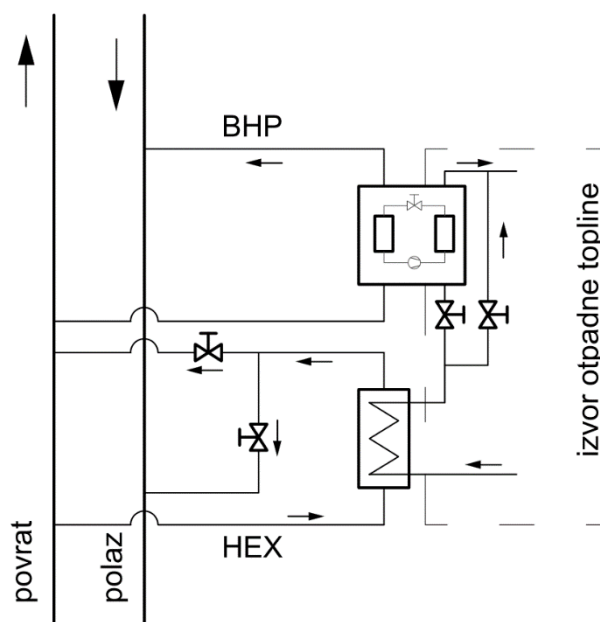
#### 3.2.2.1. Izmjenjivač topline

Prema definiranom modelu pravo prvenstva u iskorištavanju dostupne otpadne topline ima izmjenjivač topline. Slika 25 prikazuje shemu algoritma za izračunavanje kapaciteta izmjenjivača topline u *pinch* metodi. Dani se algoritam sastoji od četiri razine odlučivanja. Na prvoj razini odlučivanja provjerava se postoji li uopće izvor otpadne topline ( $T_{HS1}$ ,  $T_{HS2}$  i  $\Phi_{HS1}$ ). Nakon odlučivanja da postoji izvor topline, algoritam iz termodinamičkih parametara računa parametre pravca (nagib i odsječak na osi ordinata). S obzirom na to da postoji činjenica da se odlučivanje provodi varijacijom kroz sva tehnički moguća rješenja, toplinski kapacitet mreže dobiva se iz pretpostavljenih parametara. Toplinski se kapaciteti ( $mc_{pDH}$  i  $mc_{pHS}$ ) na drugoj razini odlučivanja uspoređuju te se prema njima određuje daljnji korak algoritma u kojem će se ovisno o položaju temperatura povrata i polaza ( $T_{DH,S}$  i  $T_{DH,R}$ ) smjestiti pravac CTS-a.



Slika 25: Shema algoritma za izračunavanje kapaciteta izmjenjivača topline u *pinch* metodi

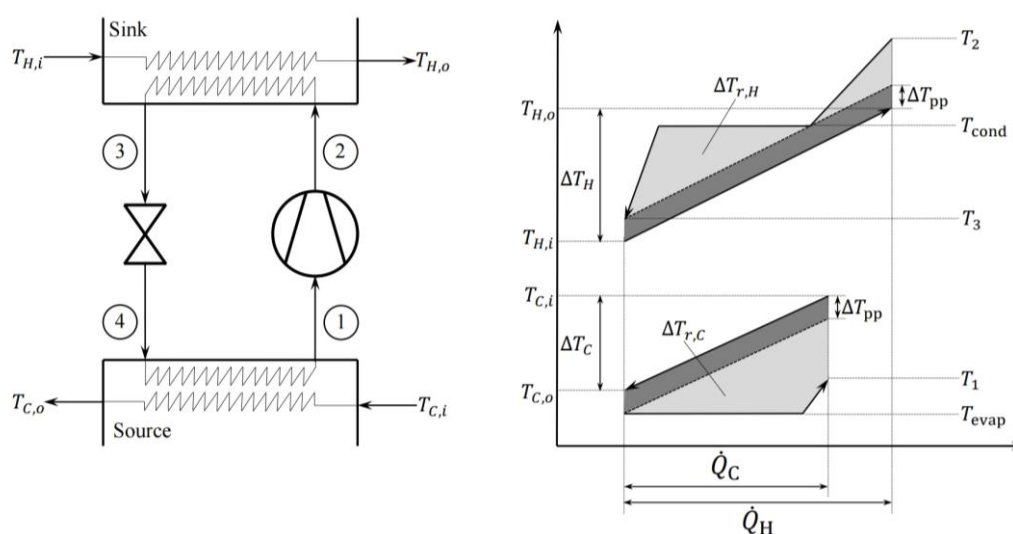
Na trećoj, odnosno četvrtoj razini odlučivanja uz zadane parametre položaj pravca CTS-a pozicionira se tako da se iskoristi maksimalno mogući iznos topline. Taj iznos topline ovisi o *pinch* točki, položaju temperatura polaza i povrata CTS-a te toplinskom izvoru. Na trećoj razini odlučivanja algoritma ako se temperatura polaza CTS-a nalazi ispod najniže temperature izvora, pravac se pozicionira, ako je to moguće tako da je početna temperatura CTS-a temperatura povrata, a krajnja temperatura temperatura polaza.. Ako nije moguće doseći temperaturu polaza onda se struja CTS-a zagrijava do maksimalno moguće temperature određene toplinskim tokom koji je moguće izmijeniti i *pinch* točkom. U slučaju da je toplinski kapacitet mreže veći nego toplinski kapacitet izvora, onda se rijetko događa situacija da se dostigne temperatura polaza, a pokušava se izvući maksimalni iznos toplinske energije. Do potvrde četvrte razine odlučivanja dolazi samo ako su i polazna i povratna temperatura CTS-a veće od najviše temperature izvora. Tada nije moguća izmjena topline pomoću izmjenjivača topline prema drugom glavnom stavku termodinamike Ako je zadovoljen kriterij COP-a te ako postoji preostali temperaturni i toplinski raspon onda se prelazi na dizalicu topline (engl. *booster heat pump*; BHP). Slika 26 prikazuje načelnu shemu opreme za iskorištavanja otpadne topline pomoću *pinch* metode s dvama osnovnim krugovima izmjene topline: HEX – izmjenjivač topline i BHP – dizalicu topline.



**Slika 26:** Načelna shema opreme za iskorištavanja otpadne topline pomoću *pinch* metode

## 3.2.2.2. Dizalica topline

Učinkovitost DT-a za potrebe dizanja toplinske razine povrata CTS-a definirana je pomoću Lorenzova COP-a te učinkovitosti povezane s tom vrstom kvantifikacije temperaturnih razina. Lorenzov COP na temelju temperaturnih režima koje mora zadovoljiti definira cjelokupni COP. Shema termodinamičkog kruga i T-H dijagrama za formulaciju Lorenzova COP-a koja se nalazi u nastavku prikazuje Slika 27. Slika 28 prikazuje funkcijsku ovisnost Lorenzove korisnosti i temperaturne razlike između logaritamske temperature toplije i hladnije struje.



**Slika 27:** Shema termodinamičkog kruga i T-H dijagrama za formulaciju Lorenzova COP-a [41]

$$COP_{Lor} = \frac{\bar{T}_H}{\bar{T}_H - \bar{T}_C} = \frac{\bar{T}_H}{\Delta\bar{T}_{lift}}$$

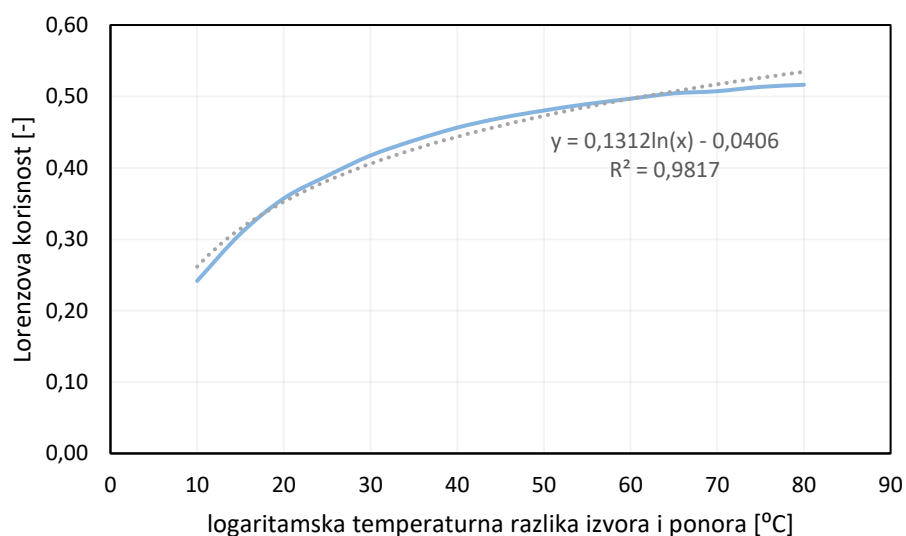
$$\bar{T}_H = \frac{\Delta T_H}{\ln\left(\frac{T_{H,o}}{T_{H,i}}\right)}$$

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

$$\eta_{Lor} = \frac{COP}{COP_{Lor}}$$

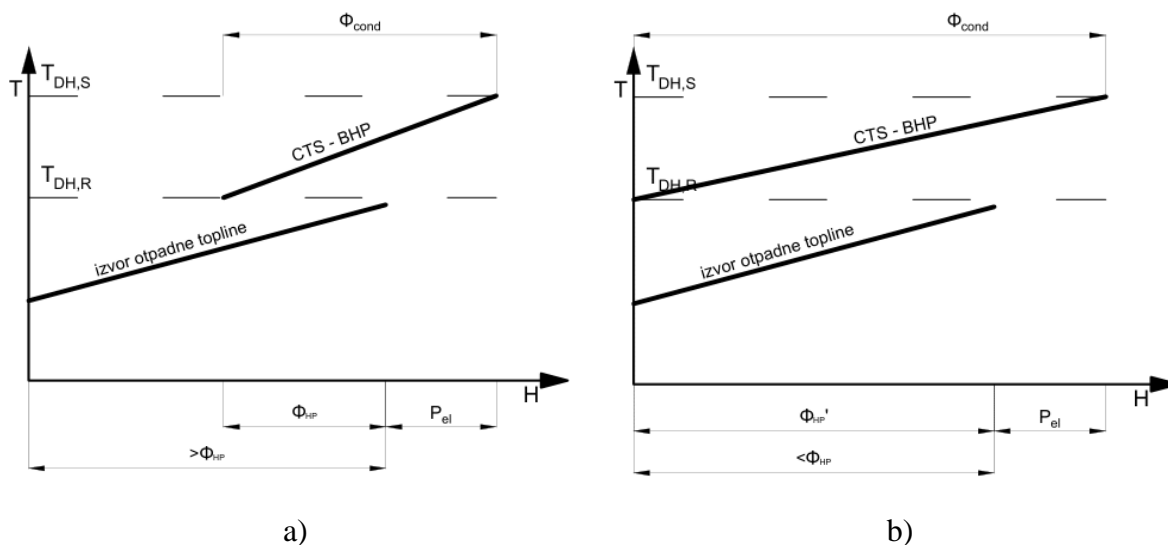
$$\eta_{Lor} = 0,1312 \ln(\Delta\bar{T}_{lift}) - 0,0406$$

$COP_{Lor}$	Lorenzov toplinski množitelj [-]
$\bar{T}_H$	logaritamska temperatura toplije struje [K]
$\bar{T}_C$	logaritamska temperatura hladnije struje [K]
$\Delta\bar{T}_{lift}$	temperaturna razlika između logaritamskih temperatura toplije i hladnije struje [K]
$\Delta T_H$	najveća temperaturna razlika toplije struje [K]
$T_{H,o}$	izlazna temperatura toplije struje [K]
$T_{H,i}$	ulazna temperatura toplije struje [K]
$\Delta T_C$	najveća temperaturna razlika hladnije struje [K]
$T_{C,o}$	izlazna temperatura hladnije struje [K]
$T_{C,i}$	ulazna temperatura hladnije struje [K]
$\eta_{Lor}$	Lorenzova korisnost [-]



**Slika 28:** Prikaz Lorenzove korisnosti u ovisnosti o temperaturnim razlikama između logaritamskih temperatura toplije i hladnije struje s pripadajućom regresijskom linijom za radnu tvar amonijak [41]





**Slika 29:** Prikaz iskorištavanja otpadne topline pomoću BHP

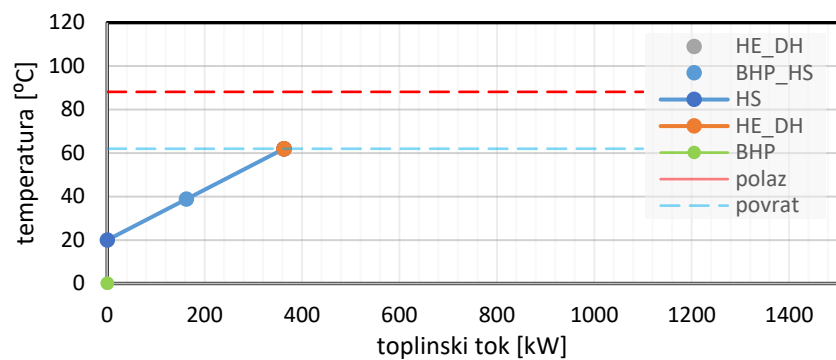
Nakon što se za zadane parametre izvora otpadne topline i CTS-a prema navedenim izrazima izračuna COP, uvažavajući preostali iznos topline, može se dobiti toplinski kapacitet na kondenzatoru. Ako je preostali iznos topline veći od nazivnog kapaciteta, iskorištava se na isparivaču taj nazivni kapacitet, no ako je taj iznos manji od nazivnog kapaciteta, iskorištava se sve što je preostalo. Prvi slučaj prikazuje Slika 29 a) dok drugi prikazuje Slika 29 b).

$$\Phi_{\text{cond}} = \Phi_{\text{HP}} \frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1}$$

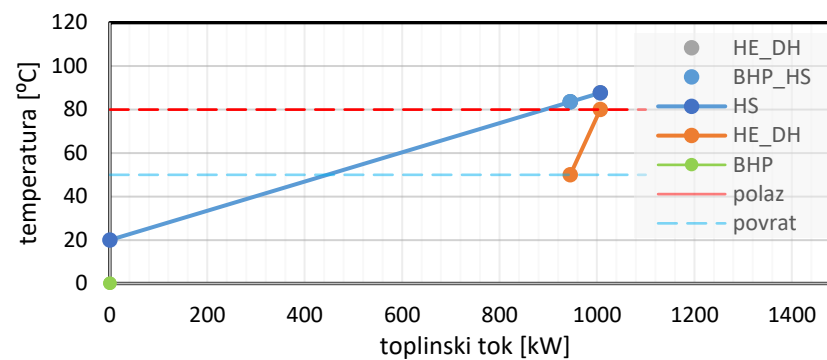
$\Phi_{\text{cond}}$  toplinski tok na kondenzatoru DT-a, iznos koji je rekuperiran iz izvora otpadne topline u CTS [kW]

$\Phi_{\text{HP}}$  toplinski tok na isparivaču DT-a, nazivna snaga definirana prema krivulji opterećenja za pojedini izvor [kW]

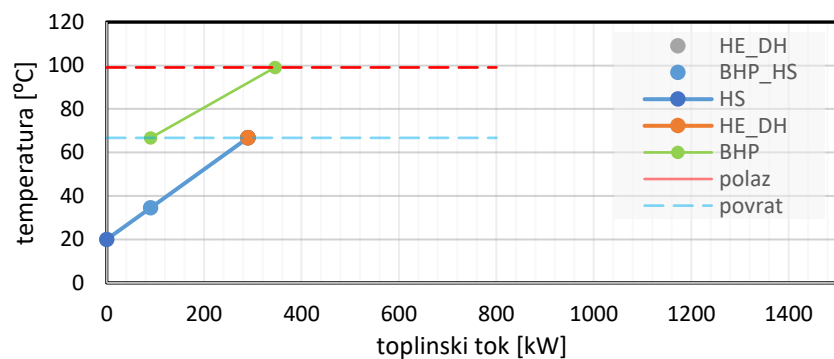
Slika 30 sumarno prikazuje sve slučajeve izmjene topline u T-H dijagramu definirane prema modelu. Kružići označavaju ključne točke izmjene topline, a pravac samu izmjenu topline definiranu u poglavlju 3.2.1. Rezultati u obliku T-H dijagrama, za različite scenarije i promatrane izvore nalaze se u Prilogu.



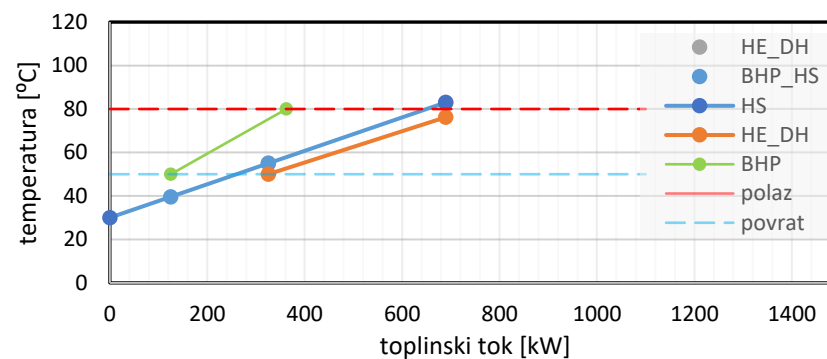
a)



b)



c)

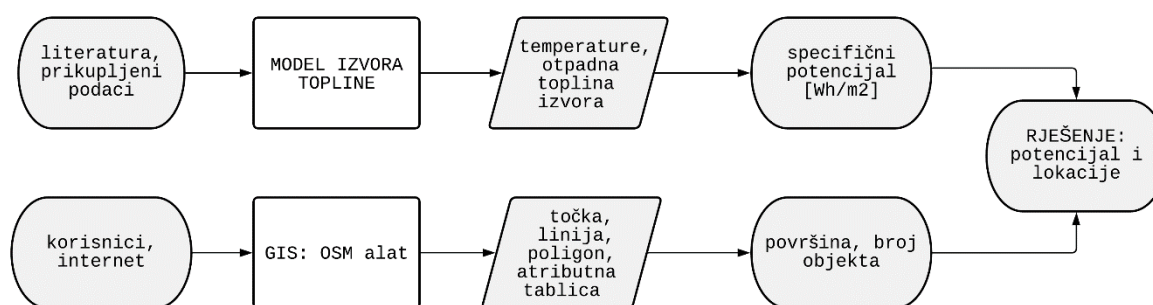


d)

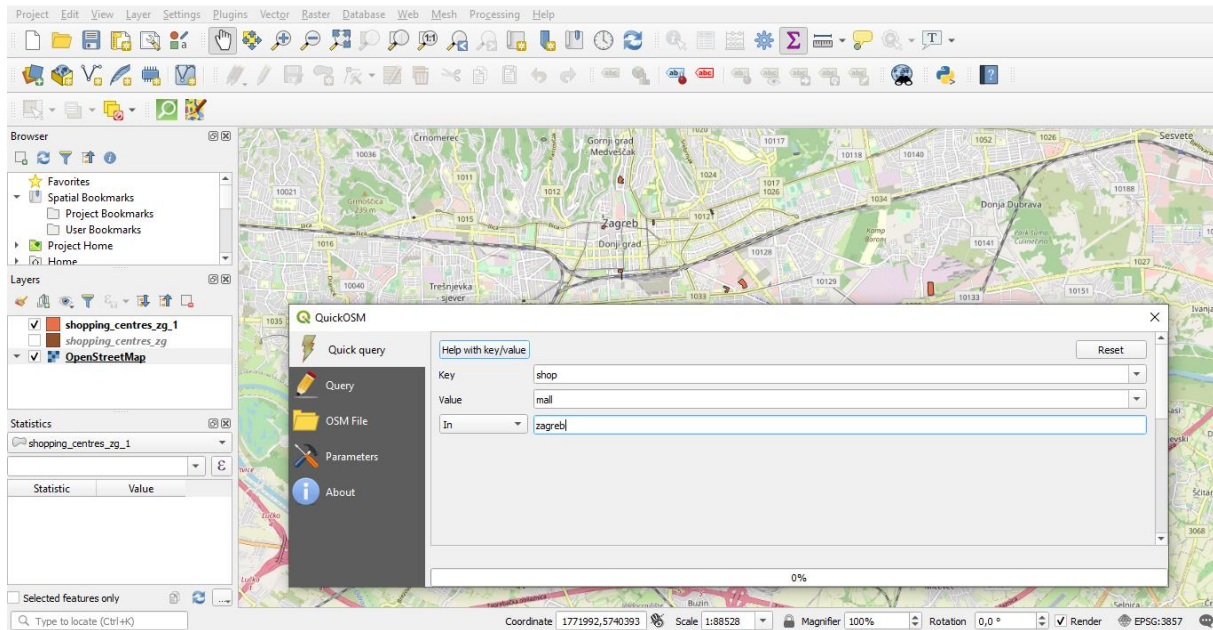
**Slika 30:** Prikaz konkretnih slučajeva *pinch* metode: **a)** kada nema izmjene, **b)** kada je izmjena topline isključivo izmjenjivačem topline (HE), **c)** kada je izmjena topline isključivo dizalicom topline (BHP) (COP=4,607) te **d)** kada je izmjena topline i izmjenjivačem topline i dizalicom topline (COP=6,358)

### 3.3. Prostorna analiza

Prostorna ili spacijalna analiza omogućava promatranje karakterističnih pojava u prostoru. Podjela kategorija prostorne analize seže od selekcije i istraživanja baza podataka, klasifikacije odnosno reklasifikacije, mjerenja i transformacije do deskriptivne statistike i optimizacije [42]. Predmet ovog rada bit će prvonavedena kategorija – istraživanje i baza podataka. Cijela analiza provodi se u QGIS-u, geoinformacijskom programskom paketu otvorena kôda koji se besplatno može upotrebljavati za uređivanje, analizu i vizualizaciju prostornih podataka. Na temelju istraženih podataka u poglavlju 2 dobiveni su početni parametri za analizu. Kako bi se termodinamički podaci o promatranim urbanim toplinskim izvorima otpadne topline mogli preslikati u digitalnu kartu, potrebno je digitalni kartografski entitet spojiti s termodinamičkim značenjem. Digitalni kartografski entitet je način prikaza stvarnog svijeta u GIS alatima. Postoje tri osnovna načina prenošenja stvarnosti u GIS sustav: točkom (*point*), linijom (*line*) i poligonom (*polygon*). Lociranje svih urbanih toplinskih izvora na nekom području moguće pomoću projekta OpenStreetMap (OSM). OSM baza je otvorenih podataka koju prvenstveno sakupljanjem podataka stvaraju korisnici diljem svijeta. Nakon tog koraka stvaraju se tablice atributa koje su definirane podacima u obliku točke, poligona ili linije. Iako ovisi o uzorku, postoji mogućnost da jedna lokacija ima sva tri oblika zapisa. Nakon što su pronađeni objekti, alatima u atributnoj tablici moguće je, kao i u Excelu, računati s njima pa tako i izračunati površnu, liniju, udaljenost ili slično dobivenih oblika. Nakon što je poznat broj, lokacija i površina objekata, podaci se mogu stopiti s termodinamičkim da bi se dobilo konačno rješenje. Slika 31 prikazuje grafički pojednostavljenu prostornu analizu.



**Slika 31:** Načelna shema prostorne analize



Slika 32: Prikaz sučelja QGIS alata i dodatka OSM

Za potrebe mapiranja potencijala otpadne topline supermarketa i trgovačkog centra, odnosno onih lokacija koje se temelje na ljevokretnim ciklusima, definiran je izraz koji slijedi iz termodinamičke analize.

$$\bar{Q}_{\text{waste}} = \frac{1}{8760} \sum_1^{8760} Q_{\text{waste}}(t)$$

$Q_{\text{waste}}(t)$  - otpadna toplina na satnoj razini dobivena iz modela [kWh m<sup>-2</sup>]

$\bar{Q}_{\text{waste}}$  - prosječni iznos otpadne topline [kWh m<sup>-2</sup>]

$$\bar{T}_{\text{HS}} = \frac{1}{8760} \sum_1^{8760} T_{\text{HS}}(t)$$

$T_{\text{HS}}(t)$  - temperatura izvora na satnoj razini dobivena iz modela [°C]

$\bar{T}_{\text{HS}}$  - prosječna temperatura izvora otpadne topline [°C]

### 3.4. Ekonomska analiza

U ekonomskoj analizi promatrani sustavi bit će podvrgnuti metodi niveliranog troška toplinske energije (engl. *Levelized Cost Of Heat*, LCOH). To je mjera troška toplinske energije tijekom njezina životnog perioda ili godine svedena na sadašnju vrijednost novca.

$$LCOH = \frac{CAPEX + OPEX}{Q_{CTS,rekup}}$$

- CAPEX* - engl. *Capital expenditures* - kapitalni troškovi, investicija nivelirana pomoću anuiteta na sadašnju vrijednost novca [EUR]
- OPEX* - engl. *Operating expenses* – operativni troškovi [EUR]
- $Q_{CTS,rekup}$  - isporučena toplinska energija dobivena rekuperacijom iz izvora otpadne topline [kWh god<sup>-1</sup>]

$$CAPEX = CRF \cdot inv$$

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

- CRF* - engl. *Capital recovery factor* – faktor povrata kapitala, omjer koji određuje ratu da se isplati sadašnji iznos uz kamatnu stopu  $d$  na vrijeme  $n$  perioda
- inv* - ukupna investicija

$$inv_{IT} = inv_{IT,fix} + inv_{IT,var} = c_{IT} \cdot \Phi_{IT,naz} + c_{CIJ} \cdot L_{CIJ}$$

$$OPEX_{IT} = \gamma \cdot inv_{IT,fix}$$

$$inv_{DT} = c_{DT} \cdot \Phi_{DT,naz}$$

$$OPEX_{DT} = OPEX_{DT,fix} + OPEX_{DT,var} = O\&M_{fix} \cdot \Phi_{DT,naz} + (O\&M_{var} + c_{elen}) \cdot E_{comp}$$

$$LCOH_{IT} = \frac{CAPEX_{IT} + OPEX_{IT}}{Q_{CTS,rekup,IT}} = \frac{CRF \cdot c_{IT} \cdot \Phi_{IT,naz} + \gamma \cdot inv_{IT,fix}}{Q_{CTS,rekup,IT}} + \frac{CRF \cdot c_{CIJ}}{Q_{CTS,rekup,IT}} \cdot L_{CIJ}$$

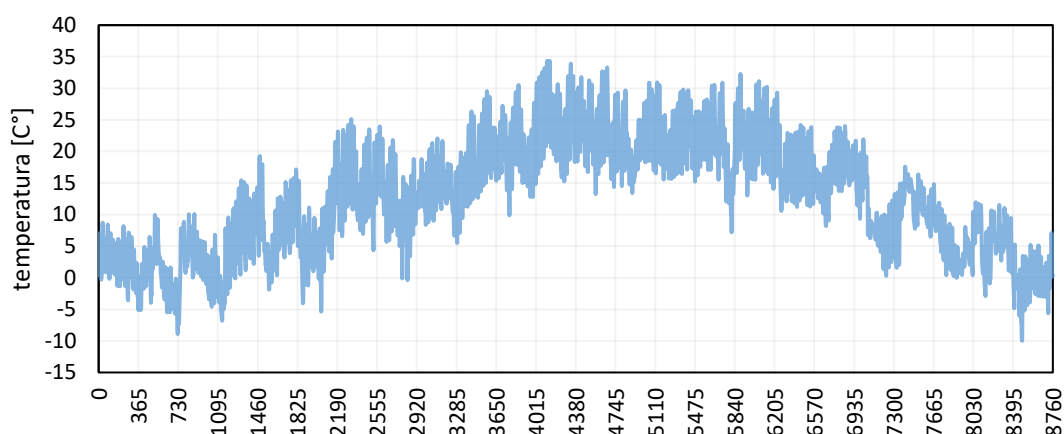
$$LCOH_{DT} = \frac{CAPEX_{DT} + OPEX_{DT}}{Q_{CTS,rekup,DT}}$$

$$LCOH_{IT+DT} = LCOH_{IT} + LCOH_{DT}$$

## 4. STUDIJA SLUČAJA: ZAGREB

### 4.1. Temperatura zraka

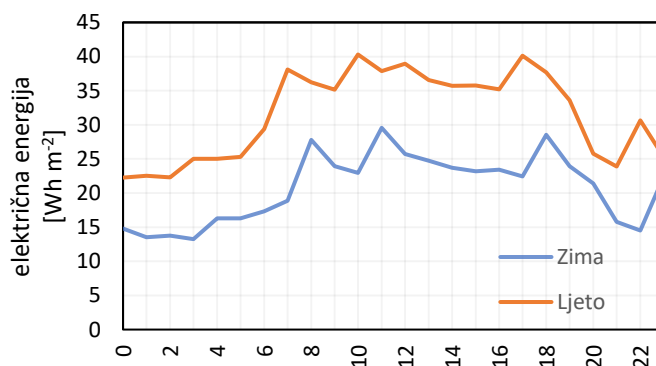
Satna temperatura za prosječnu meteorološku godinu preuzeta je s mrežnog alata Europske komisije *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [43]. Kao referentno razdoblje uzet je desetogodišnji period između 2007. i 2016. g. Točna referentna lokacija jest  $45^{\circ}48'25.2''$  sjeverne geografske širine i  $15^{\circ}58'04.8''$  istočne geografske dužine na 120 metara nadmorske visine.



**Slika 33:** Godišnji hod satne temperature zraka za prosječno desetogodišnje razdoblje za Zagreb [43]

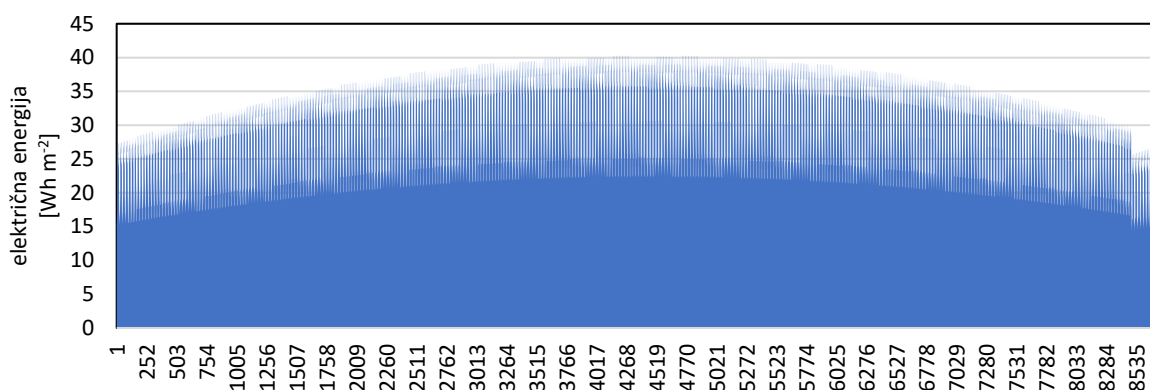
### 4.2. Godišnja potrošnja električne energije rashladnog uređaja supermarketeta

Potrošnja električne energije modelirana je pomoću podataka iz [44] gdje je dana prosječna potrošnja za rashladne uređaje za dva karakteristična dana ljeta i zime. Zbog sanitarnih uvjeta skladištenja namirnica, potrošnja električne energije za rashladne uređaje oblikom je neznatno promjenjiva tijekom dana.



**Slika 34:** Potrošnja električne energije za rashladne uređaje supermarketeta za Beč za karakteristični dan tijekom ljeta i zime [44]

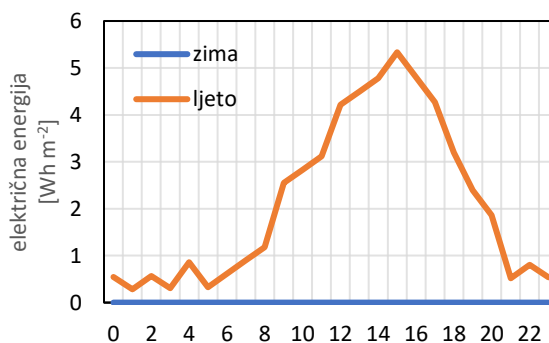
Literatura [44] navodi potrošnju za deset europskih gradova od kojih je Beč geografski i klimatološki najbliže Zagrebu pa je on uzet kao referentan grad. Prosječnom bečkom supermarketu potrošnja električne energije za rashladne uređaje tijekom ljeta veća je oko 50% nego tijekom zime kada je prosječna dnevna potrošnja  $498 \text{ Wh m}^{-2}$ . Da bi se dobila godišnja potrošnja iz podatka za dva karakteristična dana, formirana je godišnja dnevna krivulja iz temperaturnog hoda. Prema njoj su podaci skalirani tako da je ljetni dan ljetni suncostaj (21. lipnja), a zimski dan zimski solsticij (21. prosinca). Slika 35 prikazuje rezultat te metode. Ukupna potrošnja iznosi  $247,94 \text{ kWh m}^{-2}$ .



**Slika 35:** Godišnja potrošnja električne energije za rashladne sustave

### 4.3. Godišnja potrošnja električne energije za sustav hlađenja supermarketa

Potrošnja električne energije modelirana je pomoću podataka iz [44] u kojima je dana prosječna potrošnja za sustav hlađenja za dva karakteristična dana ljeta i zime. Kao i u prethodnom poglavlju, za referentni grad odabran je Beč. Zbog klimatskih uvjeta tijekom zime nema potrebe za hlađenjem prostora, dok je tijekom ljeta potrošnja na  $51,3 \text{ Wh m}^{-2}$ .

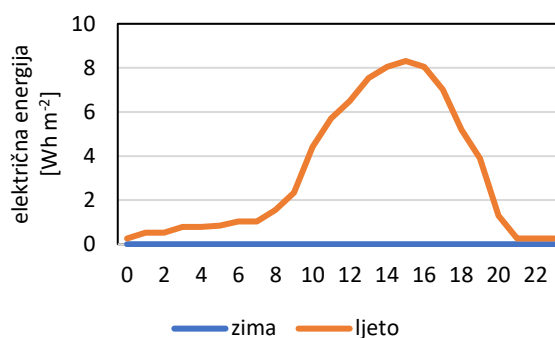


**Slika 36:** Potrošnja električne energije za sustav hlađenja supermarketa za Beč za karakterističan dan tijekom ljeta i zime [44]

S obzirom na to da tijekom zime nema potrebe za hlađenjem prostora, odabrana je granična temperatura zraka kada se uključuje sustav hlađenja. Prema već spomenutim normama projektnih temperatura u poglavlju 3.1.2.1 pretpostavljeno je da se hlađenje pali pri vanjskoj temperaturi zraka od 25 °C.

#### 4.4. Godišnja potrošnja električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra

Podatak o potrošnji električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra dobiven je na identičnom metodom kao i za sustav hlađenja supermarketa. Slika 37 prikazuje satnu potrošnju električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra za Beč tijekom ljeta i zime. Zbog klimatskih uvjeta tijekom zime nema potrebe za hlađenjem prostora, dok je tijekom ljeta potrošnja na 76,43 Wh m<sup>-2</sup>.



**Slika 37:** Potrošnja električne energije za sustav hlađenja trgovačkog centra za Beč za karakterističan dan tijekom ljeta i zime [44]

#### 4.5. Referentna trafostanica

Kako je već spomenuto u poglavlju 3.1.3, svaka zemlja bira koji standard upotrebljavati u projektiranju vlastita EES-a te je zbog toga nužno odabrati referentu trafostanicu. Uzeti su podaci Civilne zaštite iz [45] o trafostanicama koje prikazuje Tablica 6.



a)



b)

**Slika 38:** Primjeri gradskih trafostanica u gradu Zagrebu: a) TS 110/10(20) Ferenščica kao prijenosna – distribucijska mreža [46] i b) trafostanica u Dugavama kao distribucijska mreža - potrošači



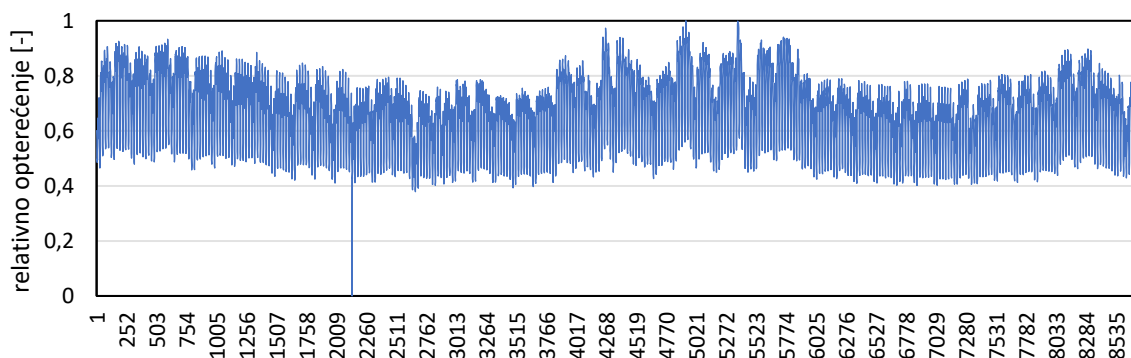
**Tablica 6:** Trafostanice 110/x kV u gradu Zagrebu [45]

Naziv	Adresa	Napon		Snage trafostanica [MVA]					
		Viši	Niži	8	16	20	40	60	Σ
4 TS 9 EL-TO	Zagorska 1	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 13 Savica	Savica bb	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 19 Jarun	Ranogajca Vlade bb	110	35	0	0	0	0	3	180
4 TS 21 Stenjevec	Stenjevečka bb	110	10	0	0	2	1	0	80
4 TS 22 Ksaver	Ksaverska bb	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 23 Botinec	Lukoranska bb	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 24 Dubec	Smajića Petra 12	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 25 Trpimirova	Trpimirova bb	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 28 TE-TO	Kuševečka bb	110	35	0	0	0	0	3	180
4 TS 29 Sopot	Erlichova bb	110	10	0	0	0	2	0	80
4 TS 30 Resnik	Slavonska avenija bb	110	35	0	0	0	0	2	120
4 TS 31 Ferenščica	Heinzelova ulica bb	110	10	0	0	0	2	0	80

Za referentnu trafostanicu odabrana trafostanica naponske razine 110/10 te dva transformatora nazivne snage 80 MVA. Trafostanice s 80 MVA nazivne snage čine 75% ukupnog broja trafostanica te 60% ukupne snage odabranih instaliranih trafostanica.

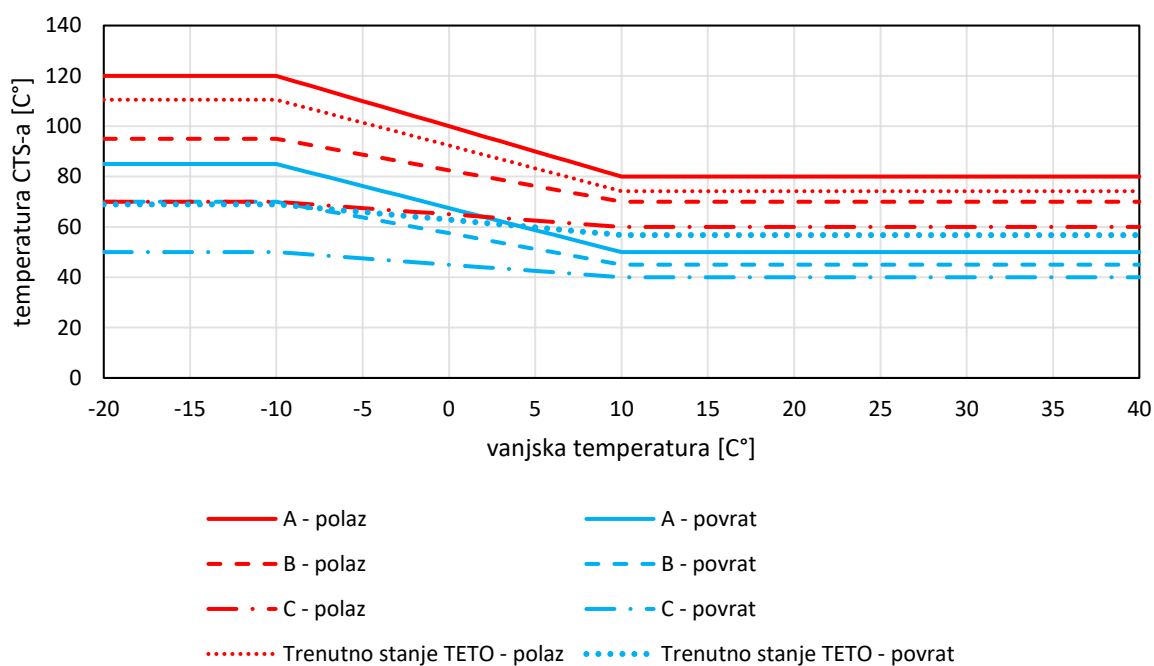
#### 4.6. Relativno opterećenje EES-a

Prema izrazu u poglavlju 3.1.3.2 gubici opterećenja transformatora ovise o relativnom opterećenju sustava. Da bi se dobilo relativno opterećenje koje prikazuje .Slika 39. potrebno je ono stvarno podijeliti s maksimalnom vrijednošću. Podaci za krivulju opterećenja distribucijskog sustava za 2019. g. preuzeti su s [47].

**Slika 39:** Relativno opterećenje EES-a prema [47]

#### 4.7. Temperaturni režimi CTS-a

Da bi se dobila što bolja slika snižavanja temperaturnih režima spomenutih u poglavlju 2.1 te njihova integracija s urbanim toplinskim izvorima, prema trenutno dostupnim podacima za CTS grada Zagreba, modelirana su tri scenarija. Pri modeliranju scenarija odnosno temperaturnih režima vođena je briga o zadovoljavanju kriterija minimalne temperature polaza te načinu vođenja CTS-a. Slika 40 prikazuje odabrane scenarije (scenarij A – prosječna temperatura polaza 93,5 °C; scenarij B – 78,4 °C i scenarij C 63,4 °C) i trenutno stanje u Zagrebu.



**Slika 40:** Prikaz temperaturnih režima polaza i povrata pretpostavljenih scenarija i trenutnog stanja CTS-a grada Zagreba

Za promjere priključka CTS-a upotrijebljeni su nazivni promjeri iz [48] dok su termodinamičke karakteristike i brzina pretpostavljeni. Držanjem konstantne brzine, a varijacijom promjera, model se malo udaljio od stvarnosti dimenzioniranja toplinskih mreža. Naime, prema [48] za odabrane promjere postoje preporučene vrijednosti maksimalnih i minimalnih brzina. Pretpostavljena brzina nalazi se unutar raspona od 0,5 do 1,5 m s<sup>-1</sup>.

**Tablica 7:** Pretpostavljeni parametri strujanja medija u priključku CTS-a

$c_p$	specifični toplinski kapacitet	4187,00	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\rho$	gustoća	1000,00	kg m <sup>-3</sup>
$v$	brzina strujanja	1,00	m s <sup>-1</sup>

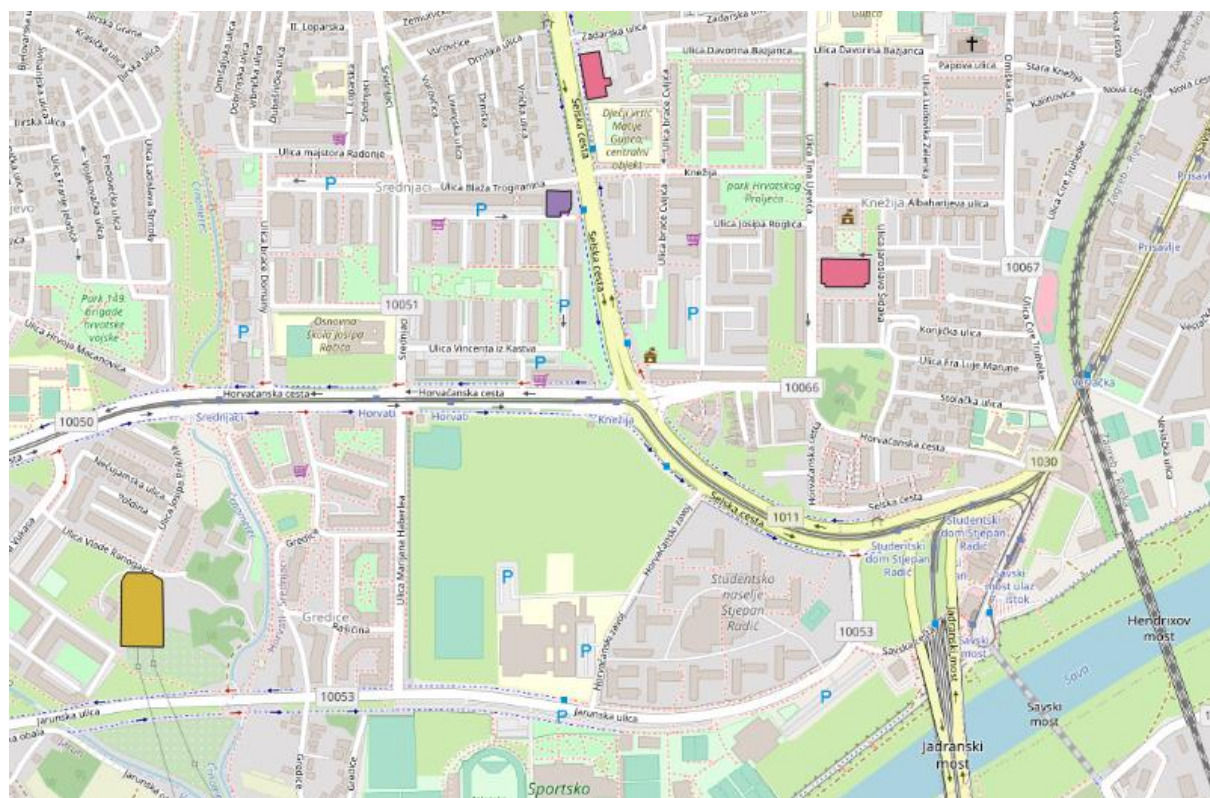
#### 4.9. Prostorni podaci

Ulazne podatke za prostornu analizu predstavljaju uprosječene vrijednosti dobivene iz modela koje prikazuje Tablica 8. Također, ulazni podatak u samu analize jesu poligoni, odnosno točne lokacije mapiranih izvora.

**Tablica 8:** Karakteristike odabranih izvora otpadne topline

Vrsta izvora	Specifični godišnji potencijal otpadne topline [kWh m <sup>-2</sup> ]	Prosječna temperatura izvora [°C]
Rashladni uređaji supermarketa	984,41	87,43
Sustavi hlađenja prostora supermarketa	20,84	53,46
Sustavi hlađenja prostora trgovačkih centara	32,78	59,86
Trafostanice	1.760.431,00	33,11

\* zbog specifikuma problema specifični godišnji potencijal ne može predstaviti preko kWh m<sup>-2</sup> pa je dan izraz modeliran prema referentnoj trafostanici objašnjen u poglavlju 4.5



**Slika 41:** Primjer poligona promatranih objekata

#### 4.10. Ekonomski podaci

Prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 3.4 dani su podaci koje prikazuje Tablica 9. Od parametara koji nisu navedeni u tablici, a nalaze se u izrazima metode, pojavljuje se kao varijabla duljina spojnog vrelovoda. Ona nije definirana te će LCOH biti ispitan za razne vrijednosti te duljine. Jedna od ključnih varijabli u ekonomskoj analizi jest diskontna stopa. Ona u principu označava vrijednost stope po kojoj se obračunavaju budući tokovi novca. Mnoge tvrtke za projekte koji imaju sličan rizik kao aktualni projekti tvrtke, upotrebljavaju prosječni ponderirani trošak kapitala (engl. *Weighted Average Cost of Capital*; WACC) kao diskontnu stopu [49]. WACC predstavlja ponderirani trošak svakog uloženog kapitala ovisno o njegovu načina financiranja. To konkretno znači da dug ponderira s troškom duga i s postotkom umanjenim za oporezivanje, a glavnica ponderira s troškom glavnice u odnosu na ukupno financiranje [50]. U EU-u kao ekonomskom gigantu postoji velika disperzija ekonomske moći te samim time i vrijednosti WACC-a. Njemačka i ostale razvijenije zemlje kao što su Austrija, Belgija, Danska, Finska, Luksemburg i Nizozemska imaju stopu WACC-a između 3,5% i 7% dok se RH nalazi u donjem domu vrijednosti ispod 10% [51]. Zbog svega je navedenog diskontna stopa pretpostavljena u iznosu od 10%.

**Tablica 9:** Ulazni podaci ekonomske analize

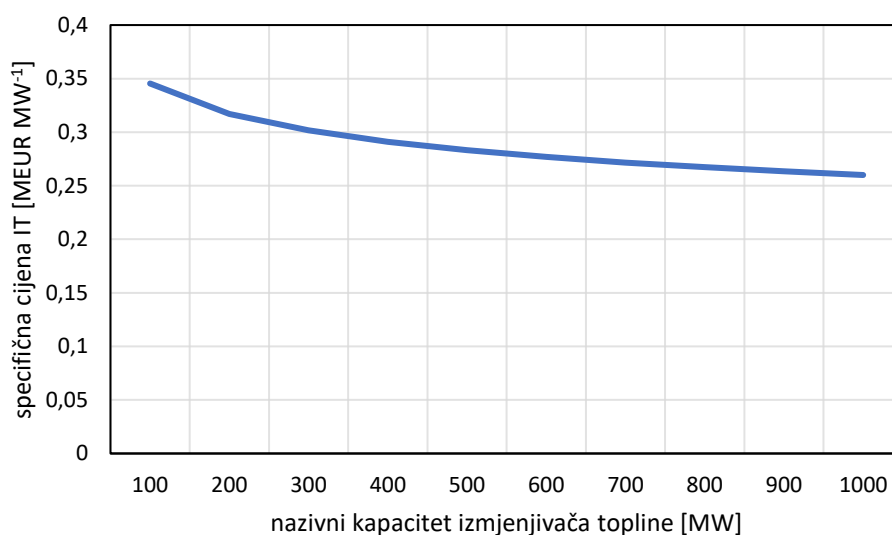
Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica	Naziv
$d$	0,10	-	diskontna stopa
$n$	20	god	životni vijek postrojenja
$\gamma$	0,04	-	udio operativnih troškova IT-a u investiciji [52]
$c_{DT}$	1,24	MEUR MW <sup>-1</sup>	specifična cijena DT-a [53]
$\Phi_{DT,naz}$		kW	nazivni kapacitet DT-a, maksimalna pojavna
$O\&M_{fix}$	2000	EUR kWh <sup>-1</sup>	fiksni operativni troškovi DT-a [53]
$O\&M_{var}$	2,7	EUR MWh <sup>-1</sup>	varijabilni operativni troškovi DT-a
$E_{comp}$		MWh	električna energija utrošena za rad kompresora DT-a
$c_{elen}$	0,1	EUR kWh <sup>-1</sup>	cijena električne energije za nekućanske potrošače [54]

Cijena izmjenjivača topline definirana je u [34] za IT-e koji su pogodni za iskorištavanje otpadne topline. Funkciju u nastavku prikazuje Slika 42.

$$c_{IT} = 0,26 \cdot \Phi_{IT,naz}^{-0,1234}$$

$c_{IT}$  - specifična cijena IT [MEUR MW<sup>-1</sup>]

$\Phi_{IT,naz}$  - nazivni kapacitet IT [kW]



**Slika 42:** Specifična cijena izmjenjivača topline za iskorištavanje otpadne topline [48]

Za trošak spojnog vrelovoda izvora otpadne topline i CTS-a uzeta je specifična cijena vrelovodne cijevi po metru duljine. Ona je definirana u ovisnosti o različitim nazivnim promjerima za standardnu tehnologiju njemačkih CTS-ova (engl. *German District Heating Association*; AGFW) [48], a prikazuje ju Tablica 10 .

**Tablica 10:** Specifična cijena vrelovodne cijevi [48]

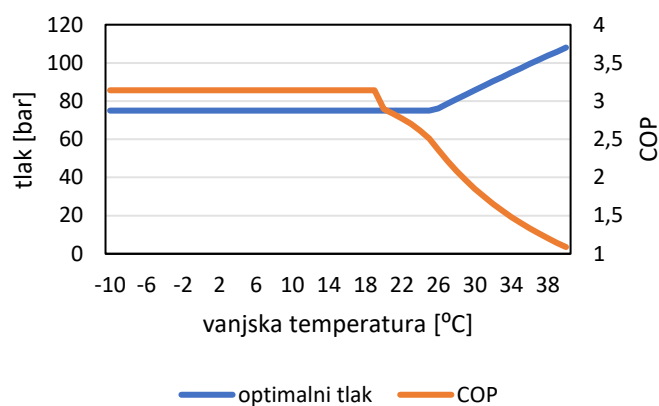
DN	25	32	40	50	65	80	100	125	150
€ m <sup>-1</sup>	312,59	322,47	338,03	355,48	403,19	445,24	504,31	572,84	656,50

## 5. REZULTATI

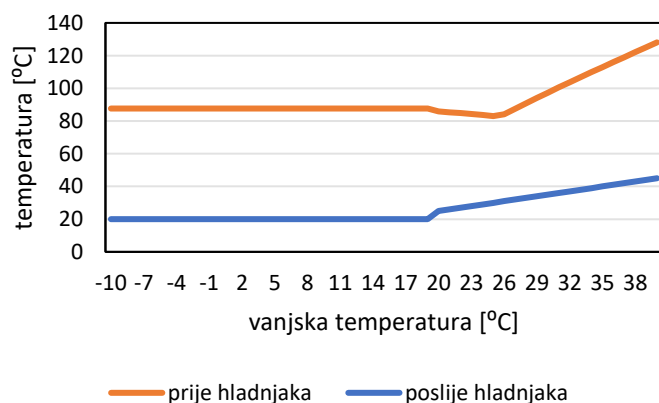
### 5.1. Rashladni uređaji supermarketa

#### 5.1.1. Model

Rezultati modela rashladnog uređaja prikazani su trima najvažnijim parametrima za kvantifikaciju urbanog izvora topline u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka: COP-om i optimalnim tlakom u hladnjaku plina (Slika 43 a) te temperaturom prije i poslije hladnjaka plina (Slika 43 b). Razlog relativno malog COP-a pri višim temperaturama uvjetovan je malo većim pregrijanjem radne tvari u isparivačima. Pad COP-a na 20 °C vanjske temperature izravna je posljedica pretpostavke o temperaturi u hladnjaku za vrijednosti vanjske temperature definirane u poglavlju 3.1.1.6.. Slika 44 i Slika 45 prikazuju rezultate na satnoj razini za otpadnu toplinu i temperaturu.

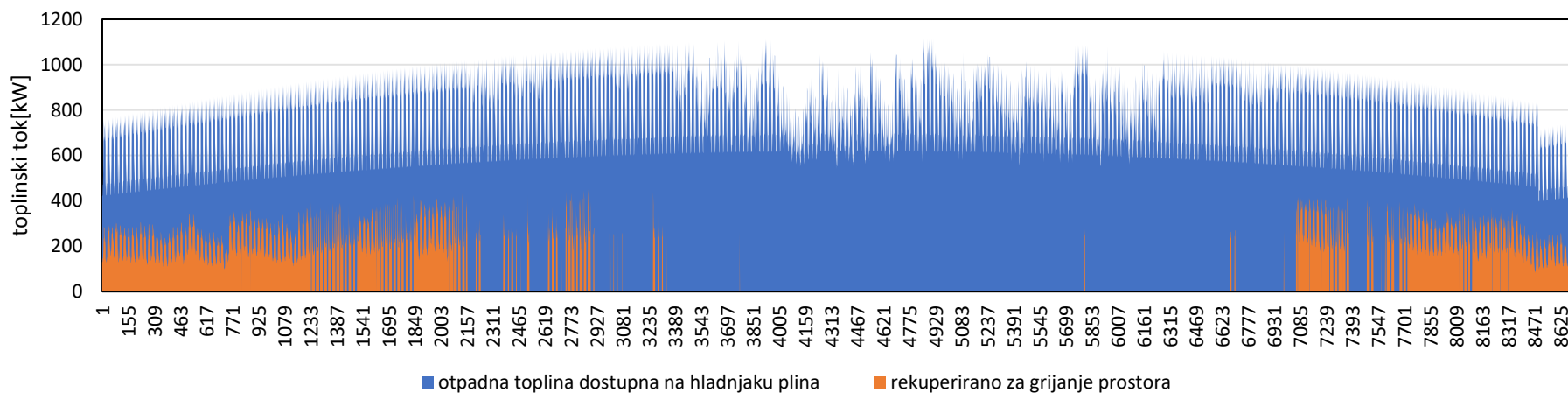


a)

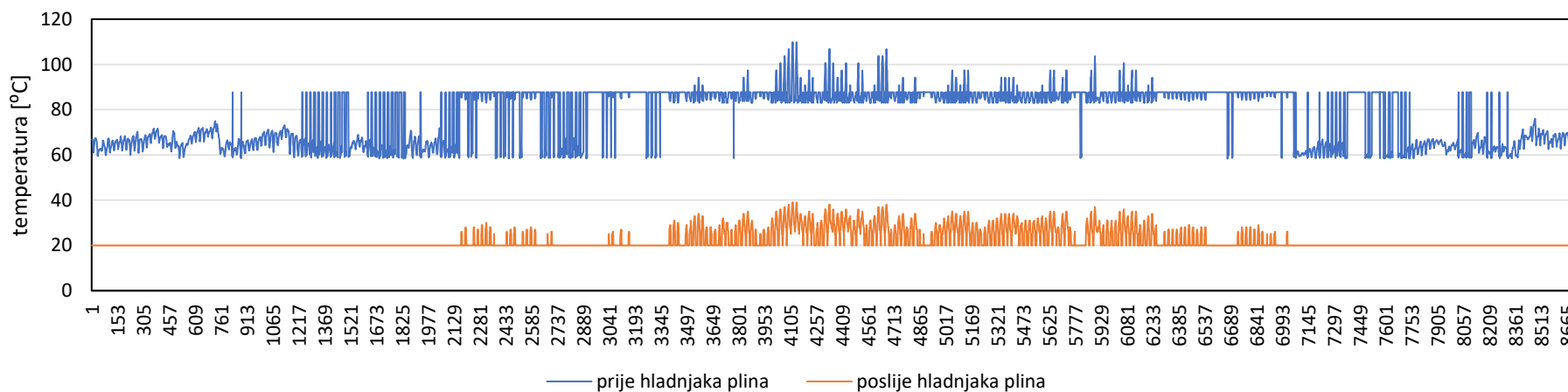


b)

**Slika 43:** a) Ovisnost tlaka i COP-a o vanjskoj temperaturi b) ovisnost temperatura prije i poslije hladnjaka plina o vanjskoj temperaturi zraka za model rashladnog uređaja supermarketa



Slika 44: Satni prikaz dostupne otopne te rekuperirane otopne topline za potrebe grijanja supermarketa

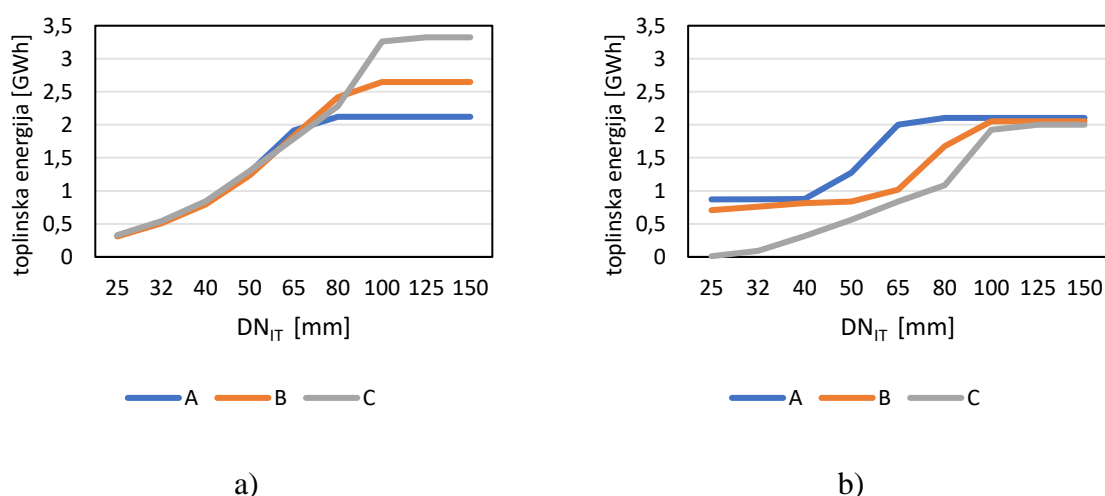


Slika 45: Satni prikaz temperature izvora otopne topline za model rashladnog uređaja supermarketa

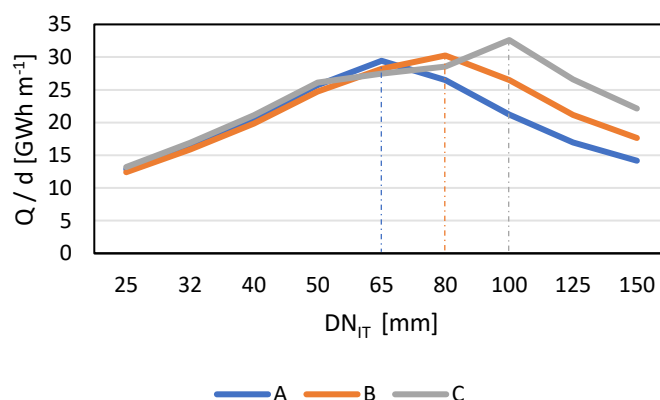


### 5.1.2. Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a

Da bi se moglo uspoređivati rezultate za različite temperaturne režime, za svaki od scenarija izračunat je optimalni promjer. Princip svojevrstne optimizacije znači da s povećanjem promjera ne raste količnik izmijenjene topline i veličine promjera. Po tom principu optimalni promjeri su sljedeći: DN 65 za scenarij A, DN 80 za scenarij B te DN 100 za scenarij C. Slika 46 a) prikazuje izmijenjenu toplinu pomoću IT na kojoj se jasno može vidjeti gdje dolazi do zasićenja iako izmjena pomoću DT-a nije u izravnoj korelaciji s promjerom CTS-a (Slika 26). Slika 46 prikazuje osnovno načelo modela da pravo prvenstva ima IT, a tek onda DT.

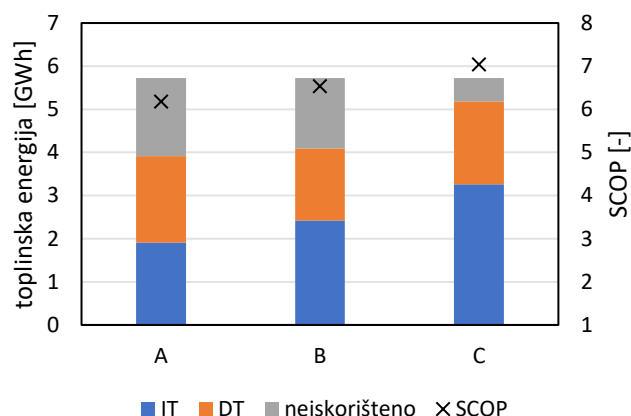


**Slika 46:** a) Ovisnost izmijenjene toplinske energije pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) izmijenjena toplinska energija pomoću DT za određeni promjer priključka CTS-a i rashladnog uređaja supermarketeta



**Slika 47:** Prikaz omjera dobivene toplinske energije pomoću IT-a i nazivnog promjera Slika 48, slično kao i Slika 46, prikazuje podatke o izmijenjenoj toplinskoj energiji te neiskorištenoj energiji, ali na godišnjoj zbirnoj razini uz dodatak sezonskog COP-a koji je izračunat kao omjer ukupne godišnje rekuperirane topline pomoću DT-a i utrošene električne energije za rad kompresora.





**Slika 48:** Ukupna godišnja izmijenjena toplinska energija pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija za rashladni uređaj supermarketa

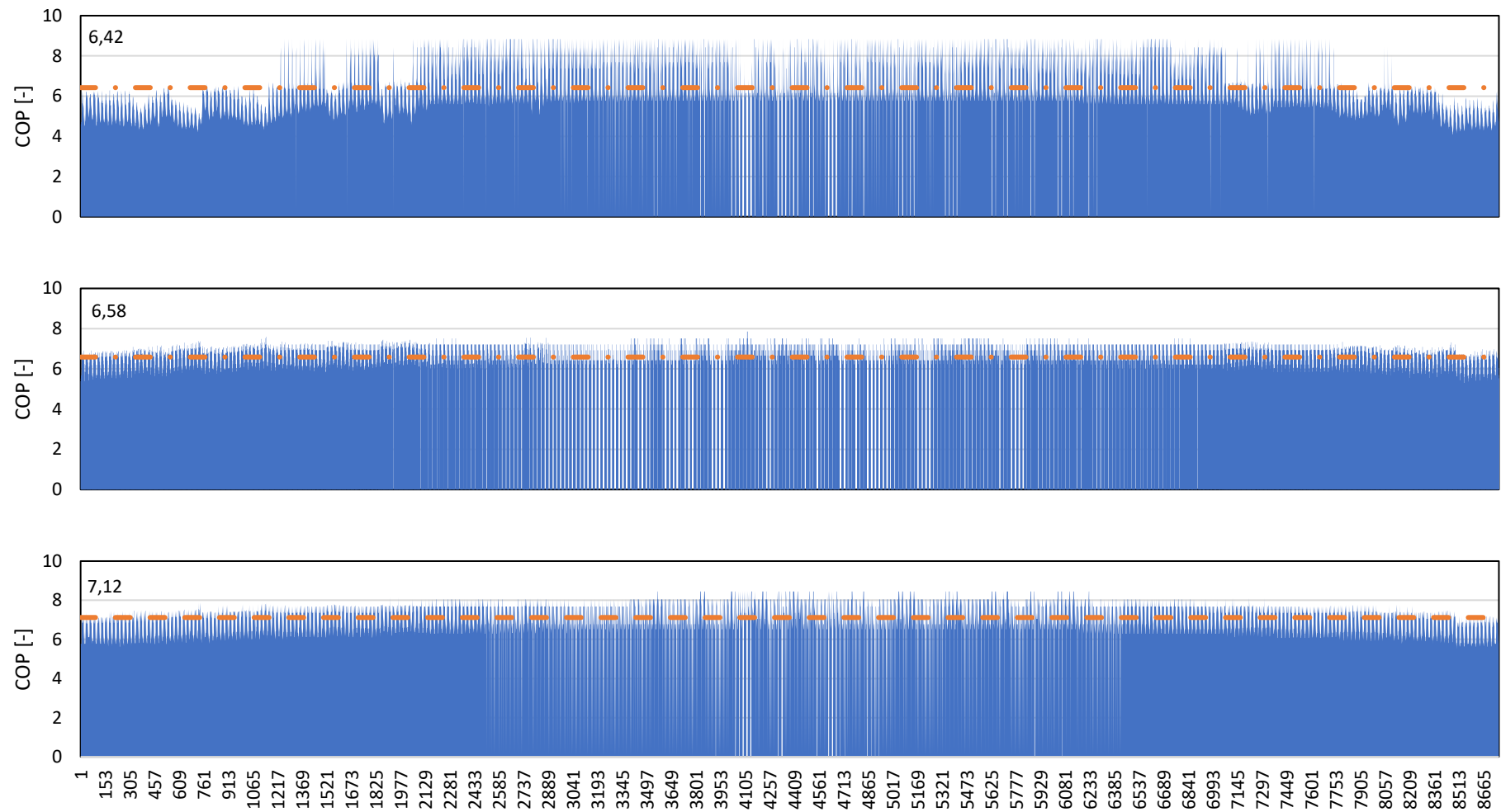
Budući da je u modelu zadano da se pri većim toplinskim kapacitetima CTS-a smanjuje temperatura do koje se zagrijava struja u IT-u, potrebno je odabrati praktičnu metodu evaluacije. Jednostavnim načinom pokazao se izračun minimalne i maksimalne te vrijednosti medijana. Minimalna i maksimalna vrijednost dat će sliku između kojih se granica nalazi ta temperaturna razlika između krajnje temperature IT-a i temperature polaza CTS-a. S druge strane, medijan će pokazati gdje se točno nalazi sredina tog raspona, odnosno ispod ili iznad koje se granice nalazi 50% vrijednosti. Tablica 11 prikazuje da se snižavanjem vrijednosti temperatura CTS-a smanjuje i maksimalno potrebno dogrijavanje do tih istih vrijednosti nakon IT-a, ali medijan ostaje isti odnosno to smanjenje događa se samo za 50% vrijednosti koje su veće od tog medijana.

**Tablica 11:** Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT-a do temperature polaza u CTS-u za rashladni uređaj supermarketa

[°C]	Minimum	Medijan	Maksimum
<b>A</b>	0	7,61	44,06
<b>B</b>	0	7,90	24,69
<b>C</b>	0	7,59	17,12

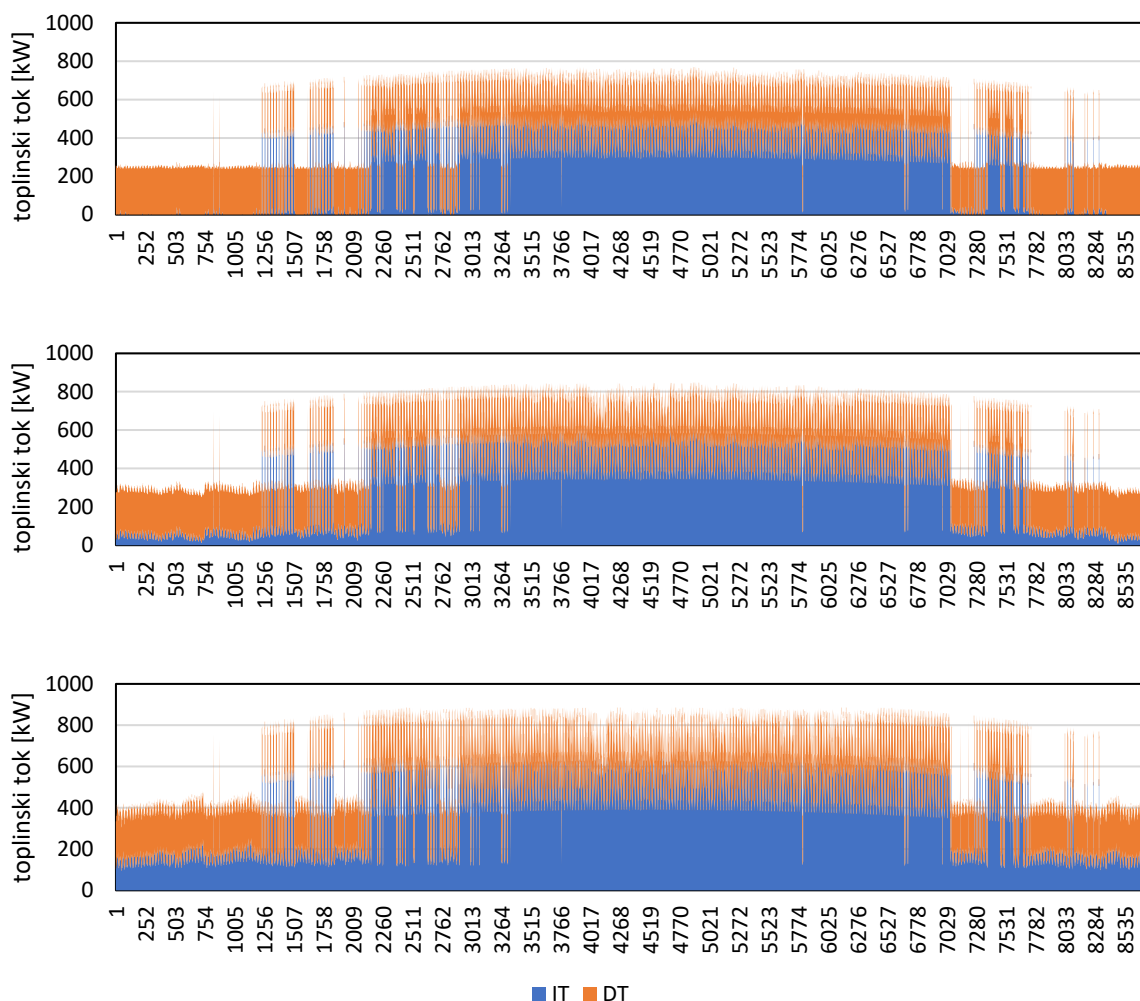
### 5.1.3. Satni COP

Kao što i prikazuje sezonski COP (Slika 48), snižavanjem temperaturnih režima CTS-a povećava se COP. Pri prvom snižavanju temperatura sa scenarija A na scenarij B to povećanje je oko 2% dok je pri sljedećem snižavanju, sa scenarija B na scenarij C, četverostruko veći.



**Slika 49:** Prikaz COP-a za sva tri scenarija tijekom godine (gore – A; sredina – B i dolje – C)

#### 5.1.4. Satno iskorištavanje otpadne topline



**Slika 50:** Satno iskorištavanje otpadne topline rashladnih uređaja supermarketa (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C)

Prethodna slika prikazuje satno iskorištavanje otpadne topline. Na njoj se vidi da snižavanjem temperature CTS-a dolazi do većeg korištenja IT-a na cjelogodišnjoj razini. Povećanje iznosi oko 40% u broju rada sati kao što i prikazuje Tablica 12.

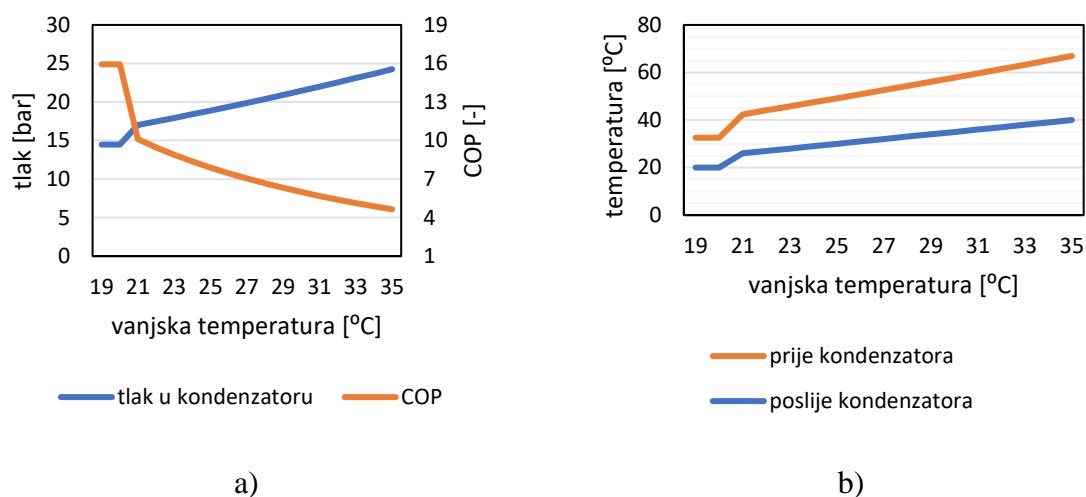
**Tablica 12:** Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline za rashladne uređaje supermarketa

[h]	IT	DT	DT + IT
<b>A</b>	6240	8394	6240
<b>B</b>	8760	7114	8760
<b>C</b>	8760	8339	8339

## 5.2. Sustav hlađenja prostora supermarketa

### 5.2.1. Model

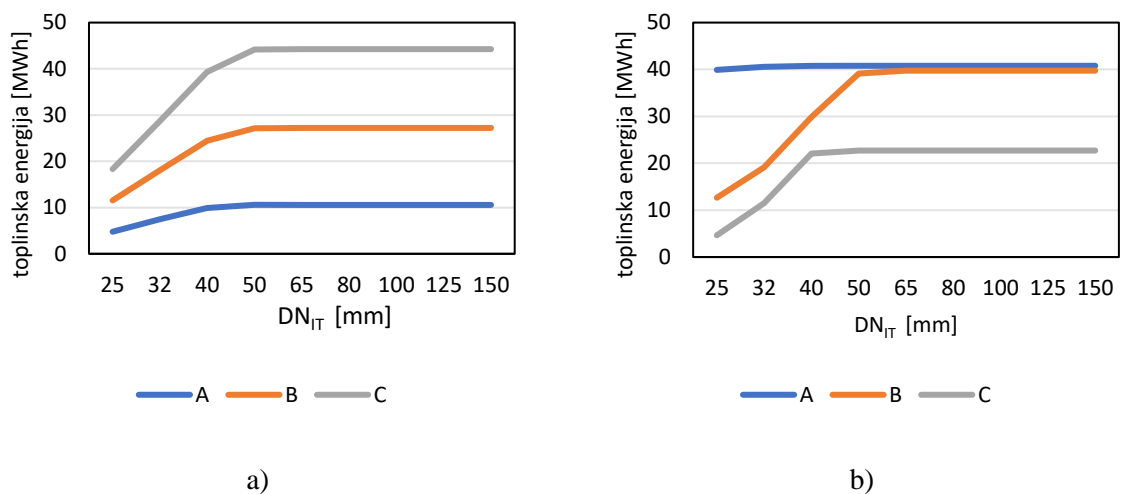
Rezultati modela sustava prikazani su kroz tri najvažnija parametra za kvantifikaciju urbanog izvora topline u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka COP (Slika 51 a), temperatura prije i poslije kondenzatora (Slika 51 b) te optimalnim tlakom u kondenzatoru. Razlog relativno malog COP-a pri višim temperaturama uvjetovan je malo većim pregrijanjem radne tvari u isparivačima te činjenicom da već pri dvadesetak celzijeva stupnja nema potrebe za hlađenjem. Pad na 20 °C vanjske temperature zraka izravna je posljedica pretpostavke o temperaturi u hladnjaku ispod te vrijednosti definirane u poglavlju 3.1.1.6.



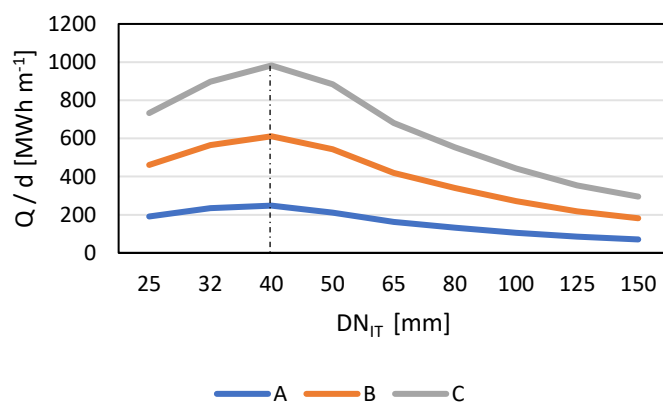
**Slika 51:** a) Ovisnost tlaka i COP-a o vanjskoj temperaturi b) ovisnost temperatura prije i poslije hladnjaka o vanjskoj temperaturi zraka za model sustava hlađenja prostora supermarketa

### 5.2.2. Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a

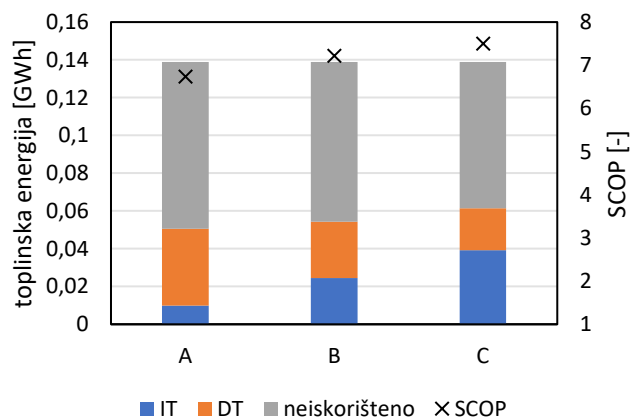
Prema istom principu kao i za rashladne uređaje supermarketa dobiven je optimalni promjer koji je za sva tri scenarija isti – DN 40 (Slika 53). Slika 52 a) prikazuje toplinu izmijenjenu pomoću IT-a te se može jasno vidjeti gdje dolazi do zasićenja. Iako izmjena pomoću DT-a nije u izravnoj korelaciji s promjerom CTS-a (Slika 26), u slučaju trenutnog stanja CTS-a, količina toplinske energije rekuperirana pomoću DT-a ne mijenja se s promjerom priključka CTS-a. Slika 54 prikazuje povećanje sezonskog COP-a te povećanje iskorištavanja toplinske energije pomoću IT-a za veće temperature CTS-a. Ukupno iskorištenje otpadne topline u scenariju C veće je za 10,717 MWh nego u scenariju A.



**Slika 52:** a) Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za promjer priključka CTS-a i sustava hlađenja



**Slika 53:** Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera



**Slika 54:** Ukupna godišnja toplinska energija izmijenjena pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija za rashladni uređaj supermarketa

Minimalna i maksimalna vrijednost pokazuju da se snižavanjem temperature CTS-a smanjuje raspon temperaturne razlike koja se postiže izmjenom topline u IT-u. Smanjuje se i medijan, vrijednost ispod koje se nalazi 50% vrijednosti, s 80 na 60 °C. Tablica 13 prikazuje elaborirane vrijednosti za sva tri scenarija.

**Tablica 13:** Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT do temperature polaza u CTS-u za rashladni uređaj supermarketeta

[°C]	Minimum	Medijan	Maksimum
<b>A</b>	19,21	80,00	120,36
<b>B</b>	11,36	70,00	95,45
<b>C</b>	2,78	60,00	70,23

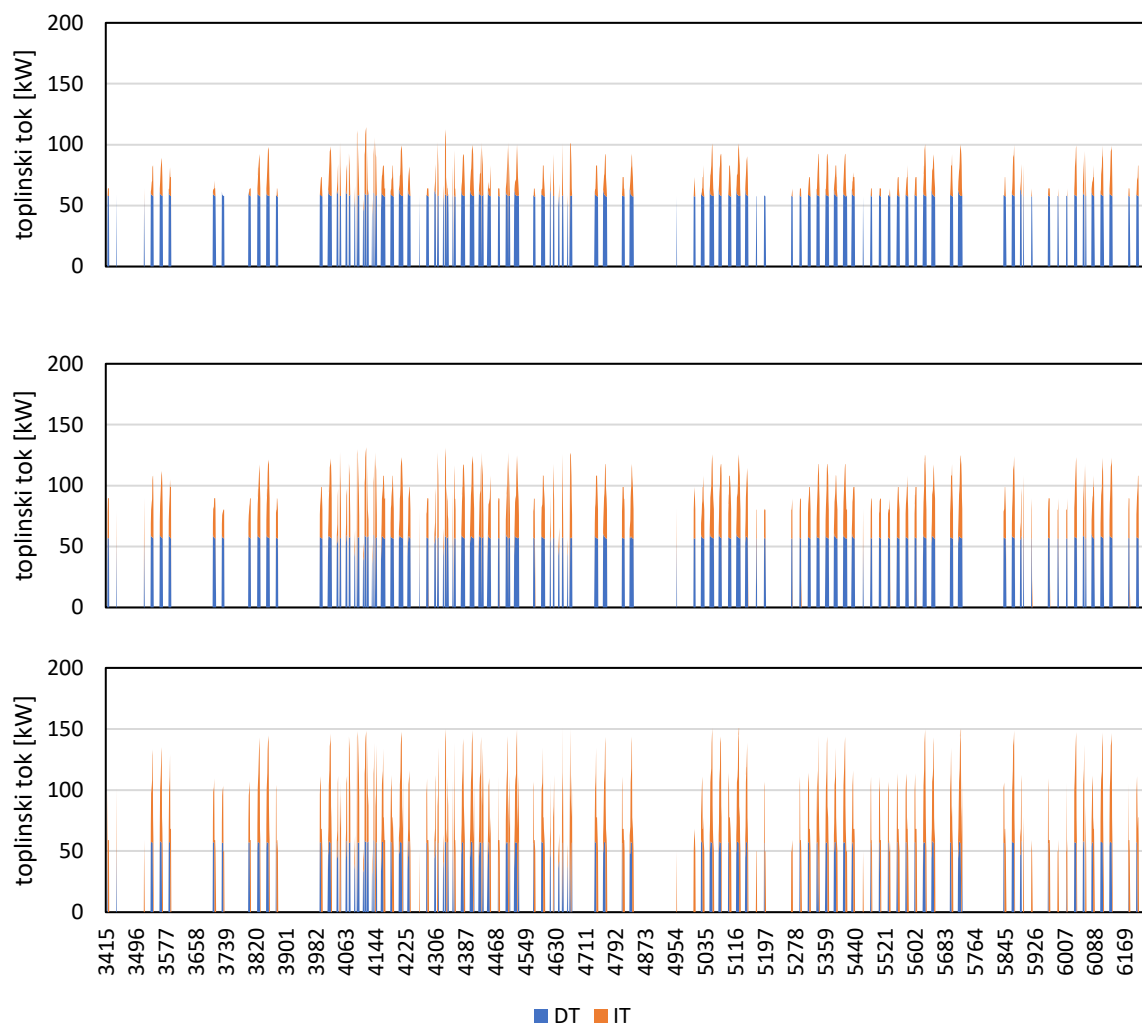
### 5.2.3. Satni COP

Kao što prikazuje sezonski COP (Slika 54), snižavanjem temperaturnih režima CTS-a povećava se COP. Pri prvom snižavanju temperatura sa scenarija A na scenarij B to povećanje iznosi oko 7% dok je pri sljedećem snižavanju dvostruko manji. Za razliku od rashladnog uređaja supermarketeta, sustav hlađenja radi 756 sati zbog uvjeta da se hladi samo na temperaturama većim od 25 °C. To je oko 8% vremena u godini odnosno sumarno nešto više od 31 dana. U scenariju C DT radi najmanje, dok u scenariju A IT radi najviše. Relativno gledajući u scenariju B najviše rade i IT i DT, 92,5% vremena odnosno 699 sati. Broj sati za sve scenarije i načine iskorištavanja topline prikazuje Tablica 14.

**Tablica 14:** Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline

[h]	IT	DT	DT + IT
<b>A</b>	554	699	554
<b>B</b>	699	699	699
<b>C</b>	699	414	414

#### 5.2.4. Satno iskorištavanje otpadne topline



**Slika 55:** Satno iskorištavanje otpadne topline sustava hlađenja supermarketa (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C)

Slika 55 prikazuje satno iskorištavanje otpadne topline sustava hlađenja supermarketa te je jasno vidljivo da se, kako se smanjuje temperatura CTS-a, povećava udio izmjene topline metodom IT-a, a smanjuje se DT-om. Na tablici je zbog dostupnosti otpadne topline prikazan samo ljetni raspon sati.

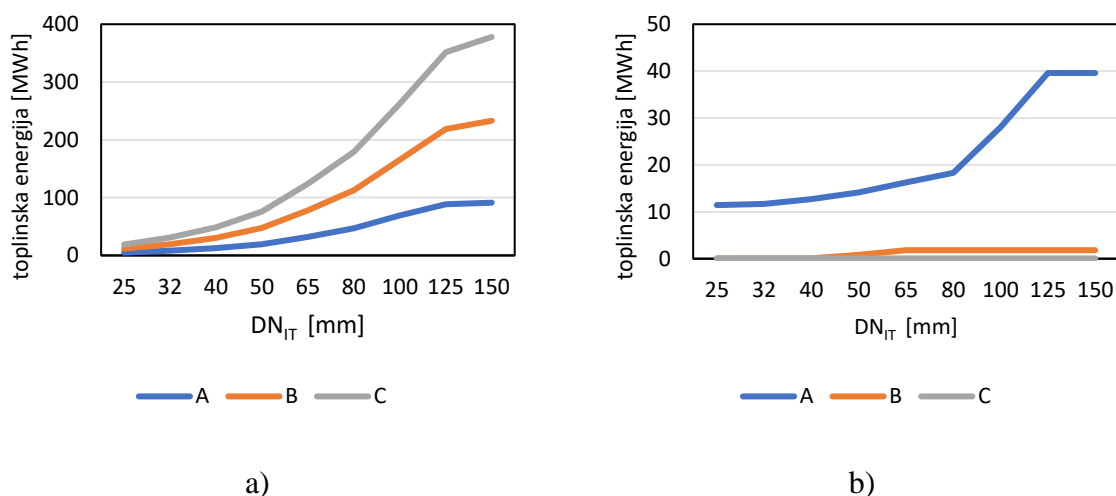
### 5.3. Sustav hlađenja trgovačkog centra

#### 5.3.1. Model

S obzirom na to da su modeli sustava hlađenja trgovačkog centra i supermarketa identični, rezultati iz poglavlja 5.2.1 mogu se u potpunosti primijeniti i na ovaj slučaj. Jedina razlika očituje se u iznosu otpadne topline koja je izravna posljedica drukčije potrošnje kao što je objašnjeno u poglavlju 3.1.2. Slika 57, Slika 58 i Slika 59 prikazuju te rezultate.

#### 5.3.2. Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a

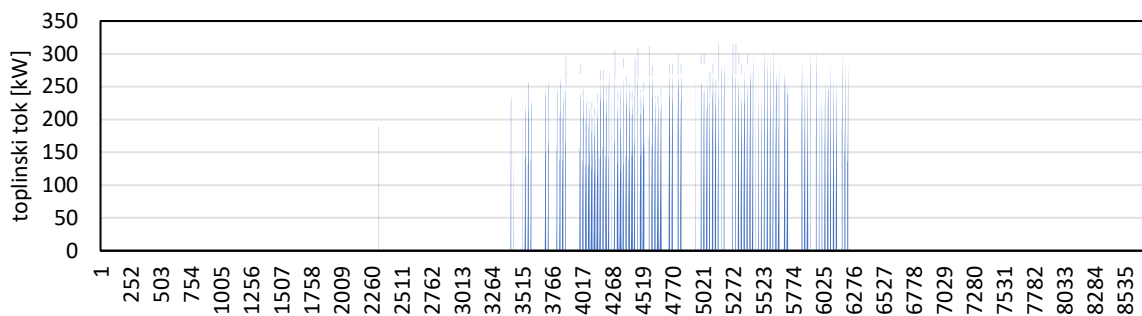
Identično kao i za sustav hlađenja supermarketa, optimalan promjer za sva je tri scenarija identičan. Razlika u odnosu na supermarket jest u tome što je dostupna otpadna toplina u većem iznosu te je u skladu s time u T-H dijagramu za istu temperaturnu razliku i isti toplinski kapacitet CTS-a moguće izmijeniti više topline. Slika 56 a), usporedno i Slika 52 a), pokazuje i do 10 puta više izmijenjene topline. Slika 56 b) pokazuje da je doprinos u izmjeni topline s DT-a u scenarijima B i C zanemariv u odnosu na scenarij A: Optimalan promjer u sva tri slučaja jest DN 125 (Slika 60).



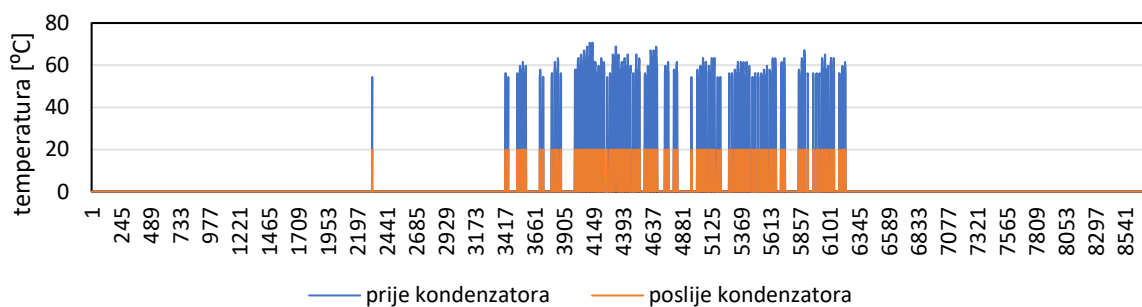
**Slika 56:** Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za određeni promjer priključka CTS-a i sustava hlađenja prostora trgovačkih centara

Slika 61 na godišnjoj razini potvrđuje prethodno navedenu tvrdnju. SCOP je neobično visok, ali treba uzeti u obzir činjenicu da upotreba DT-a drastično pada. Temperaturni raspon potreban za dogrijavanje identičan je kao u prethodnom primjeru, uz iznimku da je sužen na scenariju C. Minimalna je vrijednost sada 18 °C, za razliku od 2 °C iz prethodnog primjera.

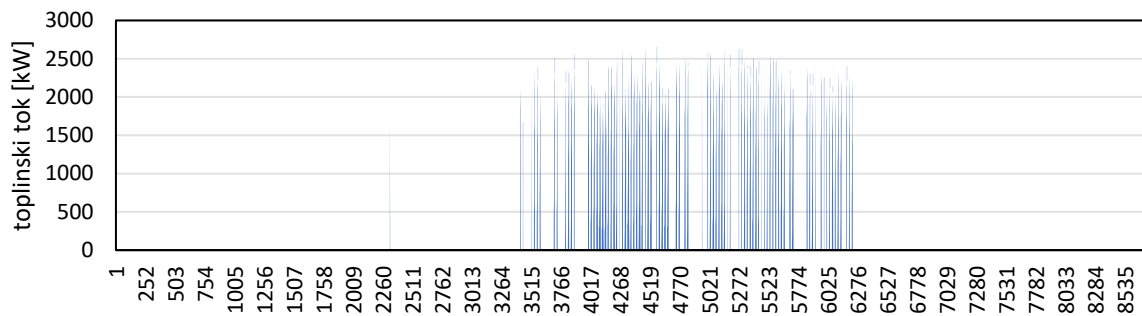




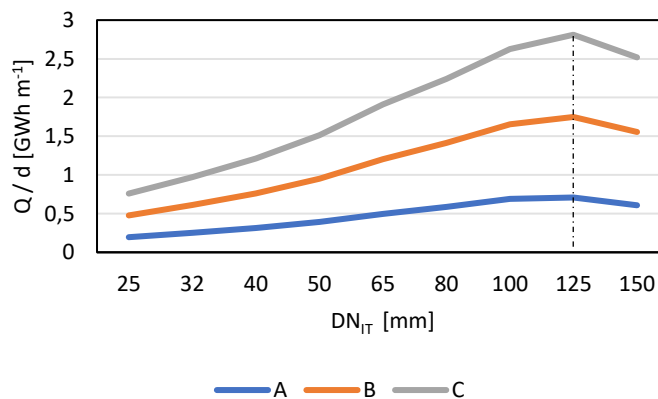
Slika 57: Prikaz otpadne topline sustava za hlađenje prostora supermarketa



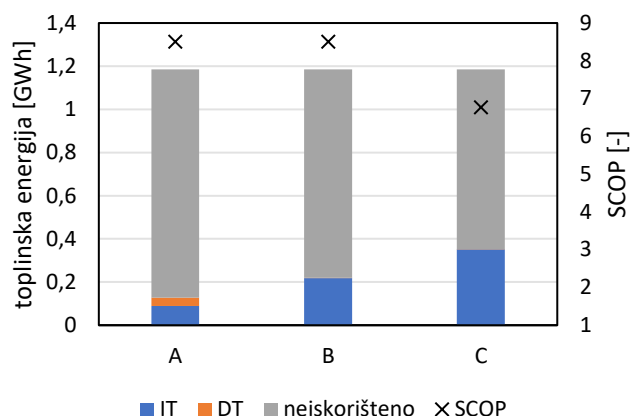
Slika 58: Prikaz izvora topline sustava za hlađenje prostora supermarketa i trgovačkog centra



Slika 59: Prikaz otpadne topline sustava za hlađenje prostorija trgovačkog centra



Slika 60: Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera



**Slika 61:** Ukupna godišnja toplina izmijenjena pomoću IT-a i DT-a, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija

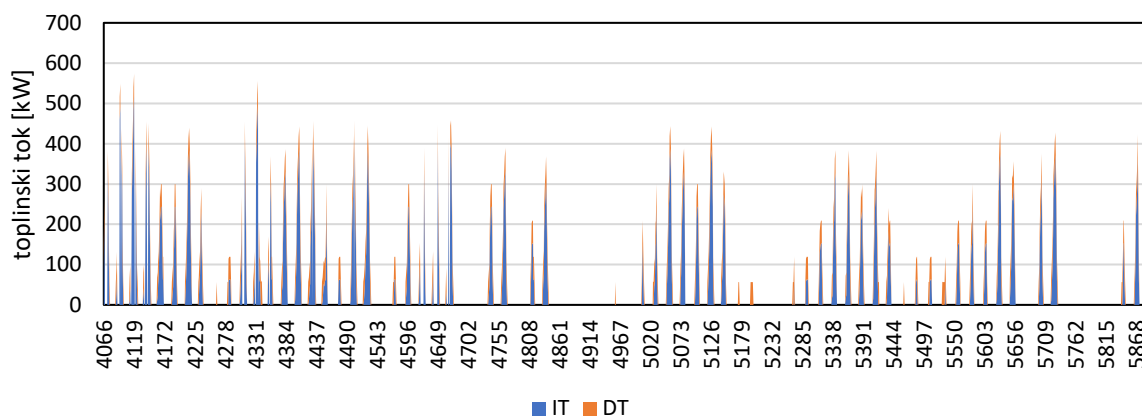
### 5.3.3. Satni COP

Kao što prikazuje sezonski COP (Slika 61), snižavanjem temperaturnih režima CTS-a snižava se i COP. Sustav hlađenja kao i u prethodnom primjeru radi 756 sati zbog uvjeta da se hladi samo na temperaturama većim od 25 °C. To je oko 8% vremena u godini odnosno sumarno nešto više od 31 dana. Zbog toga što u scenariju B i C sustav DT radi zanemarivo malo i to u B 32, a u C samo jedan sat, izostavljen je prikaz satnih COP-ova kao i prikaz iskorištenja tijekom godine. Također, kao što će kasnije pokazati ekonomska analiza, ovi su scenariji neostvarivi. Tablica 15 prikazuje broj sati rada za sve scenarije slučaja hlađenja trgovačkog centra.

**Tablica 15:** Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline

[h]	IT	DT	DT + IT
<b>A</b>	554	494	349
<b>B</b>	699	32	32
<b>C</b>	699	1	1

### 5.3.4. Satno iskorištavanje otpadne topline



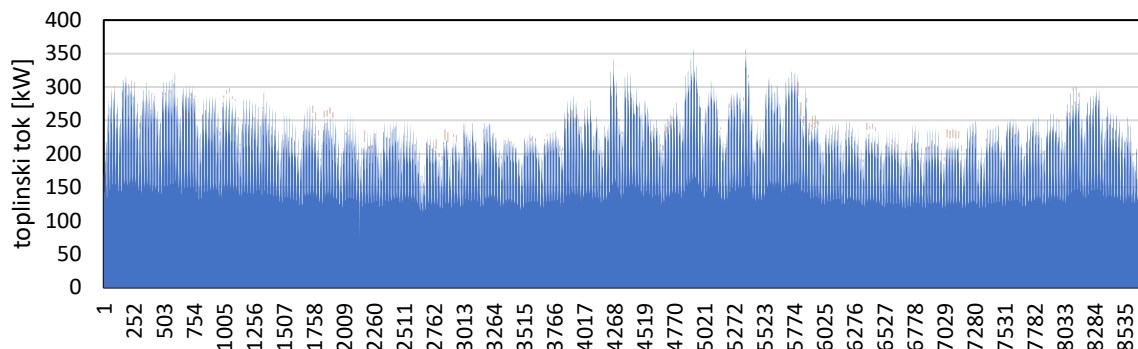
**Slika 62:** Satno iskorištavanje otpadne topline sustava hlađenja trgovačkog centra za scenarij A

Slika 62 prikazuje iskorištavanje otpadne topline za scenarij A u kojem jedino otprilike ima dovoljno radnih sati za neku relevantnu analizu. Prikazan je ljetni period.

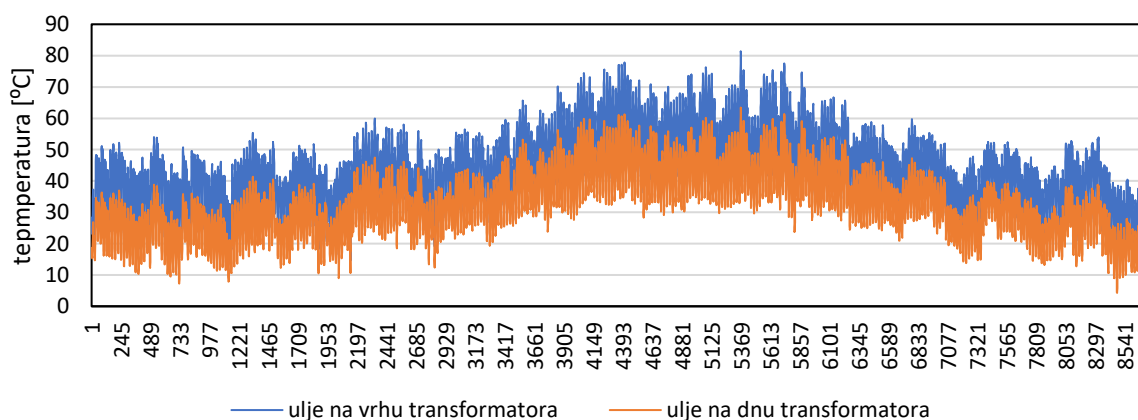
## 5.4. Trafostanice

### 5.4.1. Model

Rezultati su modela trafostanice temperature gornjeg te donjeg sloja ulja koje predstavljaju temperature izvora te temperaturu do koje se treba ohladiti kao i iznos same otpadne topline.



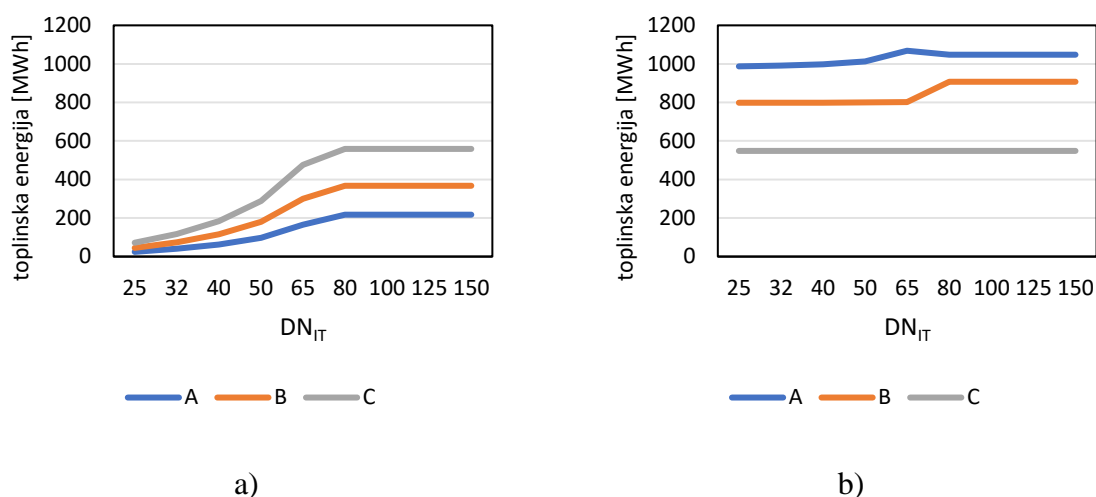
Slika 63: Satni prikaz otpadne topline trafostanica



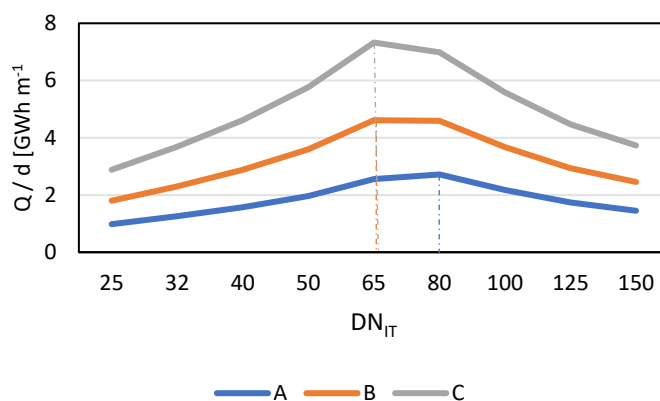
Slika 64: Satni prikaz temperaturnog izvora trafostanice

### 5.4.2. Izmijenjena toplinska energija u odnosu na promjer priključka CTS-a

Prema uhdanom principu, simulacija slučajeva nazivnih promjera pokazala je da je optimalni promjer za scenarij A DN 80, a za scenarije B i C DN 65 (Slika 66). Slika 65 a) prikazuje toplinu izmijenjenu pomoću IT-a te se jasno može vidjeti gdje dolazi do zasićenja. Iako Slika 65 b) prikazuje da izmjena pomoću DT-a nije u izravnoj korelaciji s promjerom CTS-a (Slika 26), razlog tome treba tražiti u samim postavkama modela. Snižavanjem temperaturnih režima CTS-a količina topline izmijenjene pomoću DT-a postaje neovisna o promjeru, a pomoću IT-a povećava se oko 3 puta.

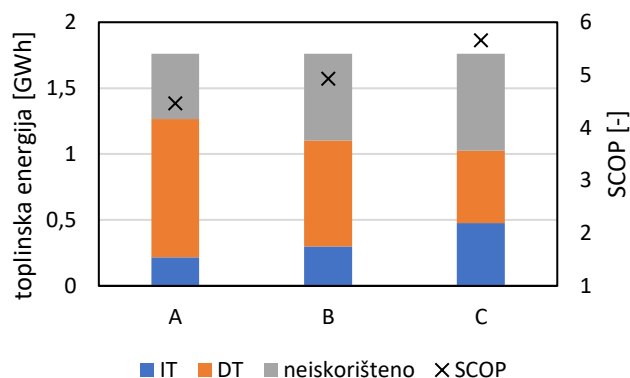


**Slika 65:** a) Ovisnost toplinske energije izmijenjene pomoću IT-a o promjeru priključka CTS-a b) toplinska energija izmijenjena pomoću DT-a za određeni promjer priključka CTS-a i rashladnog uređaja supermarketa



**Slika 66:** Prikaz omjera toplinske energije dobivene pomoću IT-a i nazivnog promjera za sva tri scenarija

Slika 67 prikazuje godišnju rekuperaciju topline u CTS-u pomoću IT-a i DT-a te sezonski COP za optimalni promjer. Snižavanjem temperaturnih režima CTS-a povećava se udio topline direktno izmijenjene pomoću IT-a, a pomoću DT-a smanji se 52%. Izmjena topline pomoću IT-a ne raste tako brzo kao i pomoću DT-a pa se ukupno iskorištena toplotina smanjuje. Zbog boljih uvjeta rada, prvenstveno niže temperaturne razlike između izvora i ponora, SCOP se povećava. Snižavanjem temperaturnih režima, odvojak se uspijeva zagrijati na temperaturu polaza te se granica od 50% vrijednosti smanjuje kako prikazuje Tablica 16.



**Slika 67:** Ukupna godišnja izmijenjena toplina pomoću IT i DT, neiskorištena otpadna toplina te SCOP za optimalni promjer pojedinog scenarija

**Tablica 16:** Minimalna i maksimalna vrijednost te vrijednost medijana potrebnog dogrijavanja nakon IT do temperature polaza u CTS-u za trafostanice

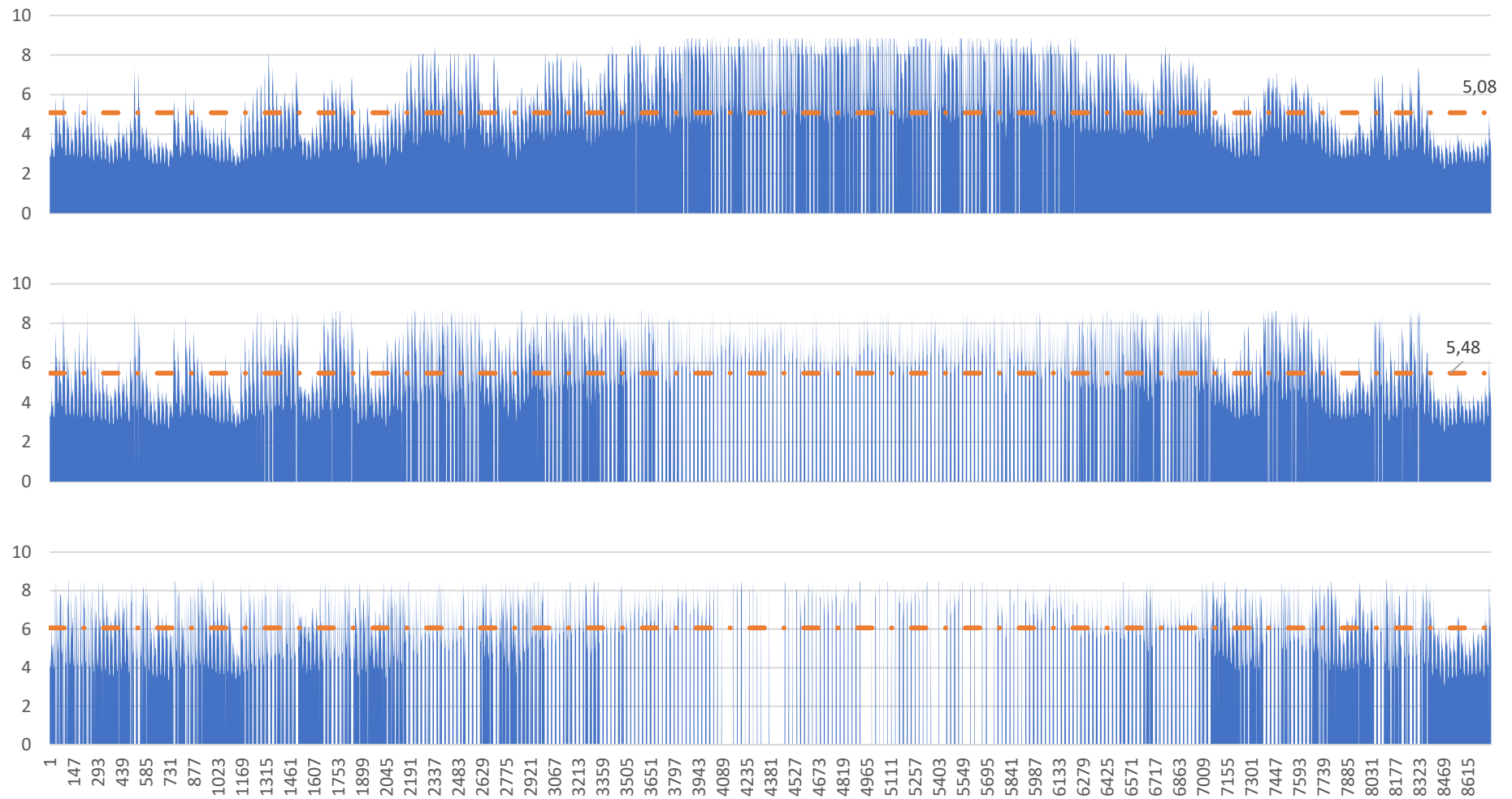
[°C]	Minimum	Medijan	Maksimum
<b>A</b>	13,33	39,45	108,87
<b>B</b>	0	28,78	83,33
<b>C</b>	0	19,34	58,01

#### 5.4.3. Satni COP

Kao što prikazuje sezonski COP (Slika 68), snižavanjem temperaturnih režima CTS-a povećava se COP. Snižavanjem temperature CTS-a broj radnih sati DT-a smanjuje se oko 45% te se ne događa da DT i IT rade paralelno ni u jednom satu. Ostale vrijednosti po scenarijima prikazuje Tablica 17.

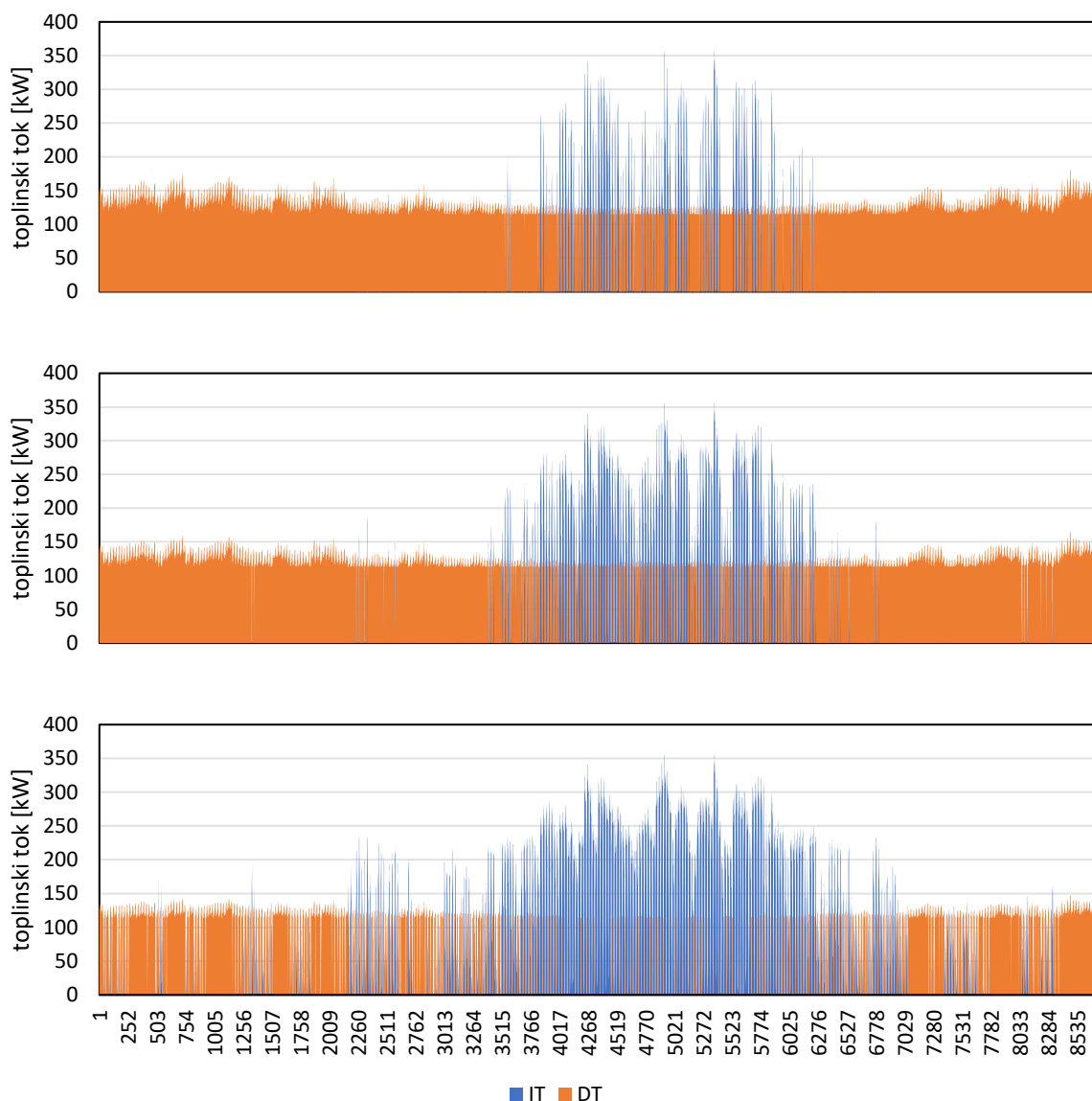
**Tablica 17:** Broj sati rada ovisno o scenariju i načinu iskorištavanja topline

[h]	IT	DT	DT + IT
<b>A</b>	1605	8129	974
<b>B</b>	2418	6395	54
<b>C</b>	3671	4515	0



**Slika 68:** Prikaz COP-a za sva tri scenarija tijekom godine (gore – A; sredina – B i dolje – C)

#### 5.4.4. Satno iskorištavanje otpadne topline



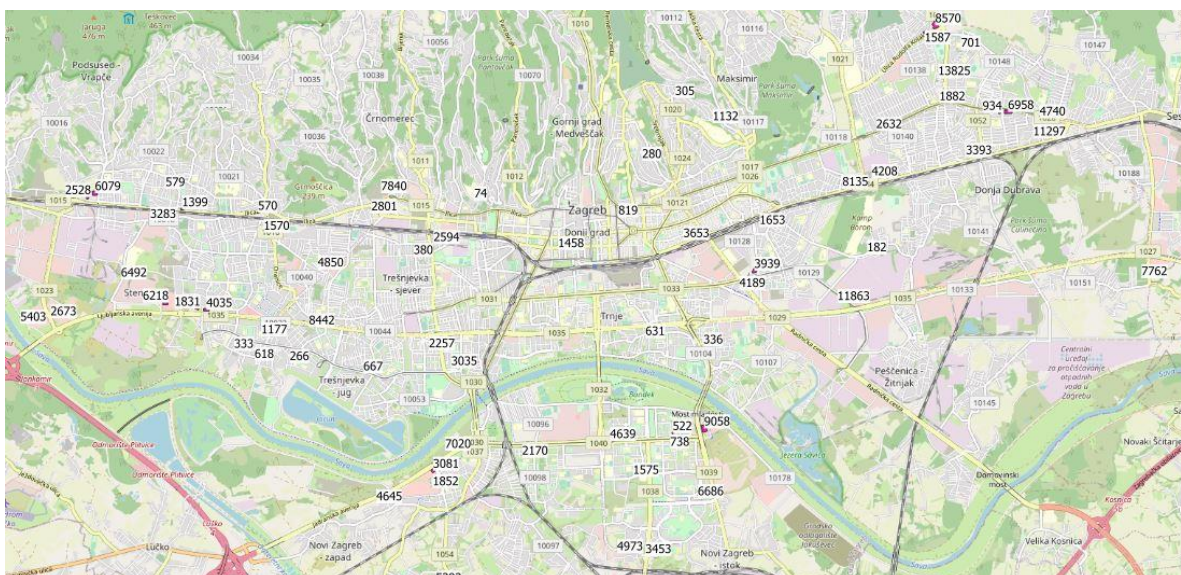
**Slika 69:** Satno iskorištavanje otpadne topline trafostanice (gore – scenarij A; sredina – scenarij B; dolje – scenarij C)

Zbog relativno niske temperature izvora trafostanica, tijekom većeg dijela godine prevladava izmjena topline pomoću DT-a. Ona je otprilike konstantna za promjene scenarija, dok se izmjena topline pomoću IT-a povećava smanjenjem temperature CTS-a. Također, IT postaje češći izvan ljetnog perioda. Kolizija korištenja DT-a i IT-a je najčešća u scenariju A.

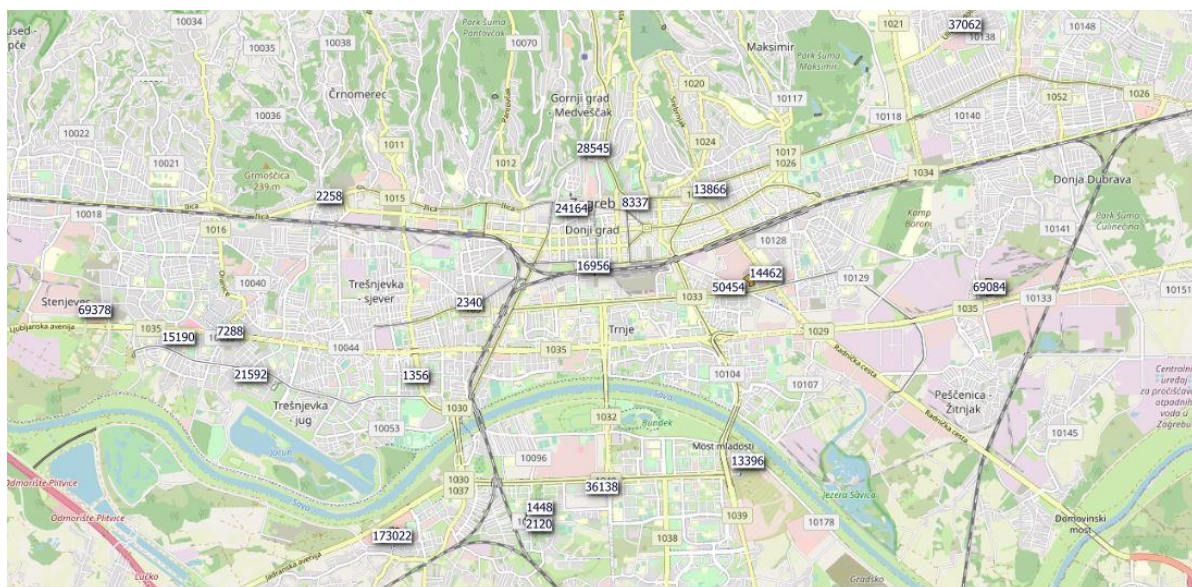


## 5.5. Prostorna analiza

Rezultati su prostorne analize grafički predstavljeni kao prikaz prostorne raspodjele odabranih izvora otpadne topline, a numerički su predstavljeni kao specifični godišnji iznos otpadne topline, prosječna temperatura izvora, specifična veličina izvora te preko nje ukupan iznos potencijala otpadne topline.

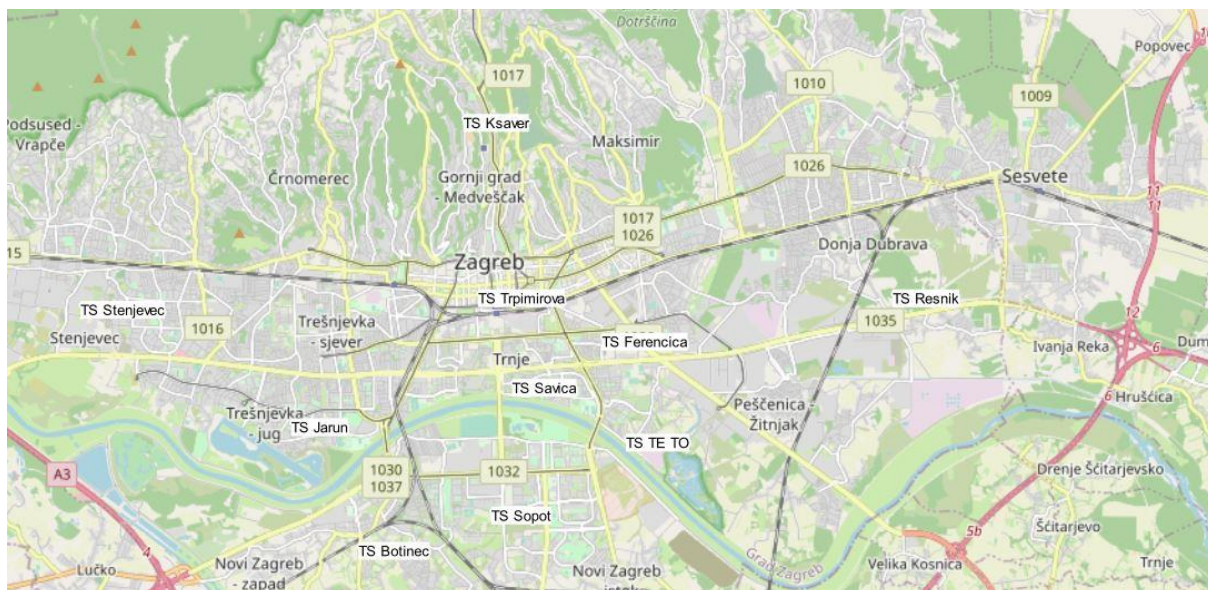


**Slika 70:** Prostora raspodjela supermarketa u Zagrebu s pripadajućim ukupnim površinama dobivenim pomoću QGIS-a



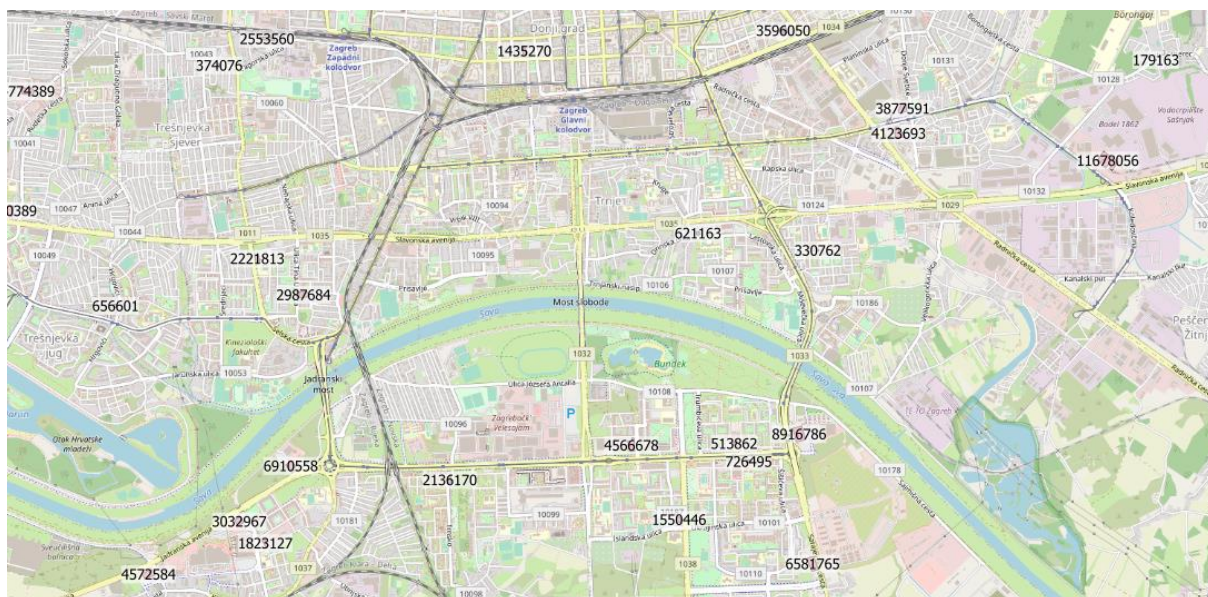
**Slika 71:** Prostorna raspodjela trgovačkih centara u Zagrebu s pripadajućim ukupnim površinama dobivenim pomoću QGIS-a



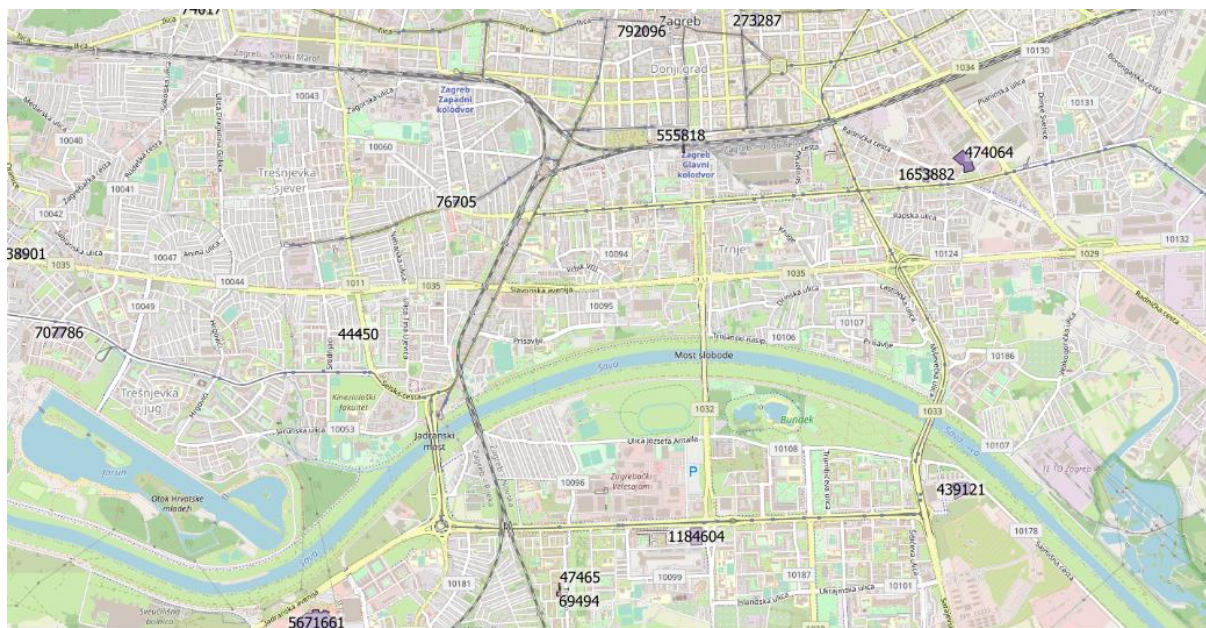


**Slika 72:** Prostorna raspodjela trafostanica 110 kV/x u Zagrebu

Slika 70, Slika 71 i Slika 72 prikazuju prostorne raspodjele promatranih toplinskih izvora. Slike su dobivene pomoću QGIS-a u koji je prethodno sinkroniziran OSM dodatak. Tim dodatkom detektirani su objekti, odnosno njihovi poligoni iz kojih se može izračunati površina. To je, naravno, tlocrtna površina, a kategorija razina dodana je iskustveno ili proučavanjem Google 3D pogleda. Ukupni potencijal koji prikazuje Tablica 18 dobiven je množenjem podatka iz atributne tablice QGIS-a i podataka koje prikazuje Tablica 8. Prostornu raspodjelu tih podataka prikazuje Slika 74 i Slika 73.



**Slika 73:** Potencijal rashladnih uređaja supermarketa u dijelu Zagreba [ $\text{kWh god}^{-1}$ ]



**Slika 74:** Potencijal rashladnih uređaja prostorija trgovačkih centara u dijelu Zagreba [ $\text{kWh god}^{-1}$ ]

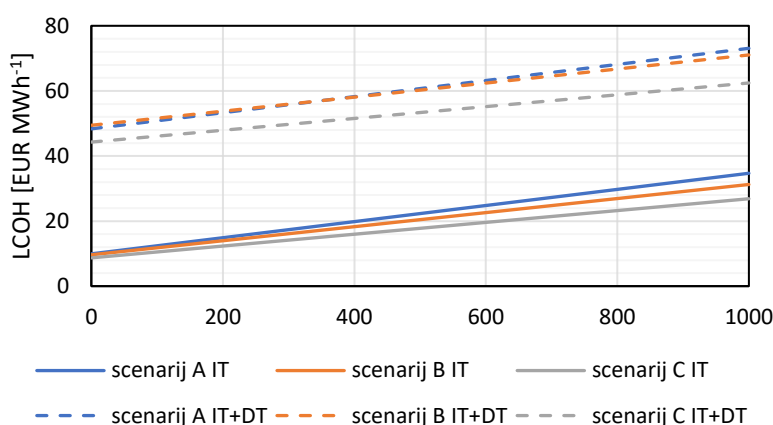
**Tablica 18:** Numerički rezultat specijalne analize

Vrsta izvora otpadne topline	Broj objekata	Ukupna površina [ $\text{m}^2$ ]	Potencijal otpadne topline [ $\text{GWh god}^{-1}$ ]
<b>Rashladni uređaji supermarketa</b>	69	241.144,00	237,38
<b>Sustavi hlađenja prostora supermarketa</b>			5,03
<b>Sustavi hlađenja prostora trgovačkih centara</b>	26	724.120,00	23,74
<b>Trafostanice</b>	10	-	17,6



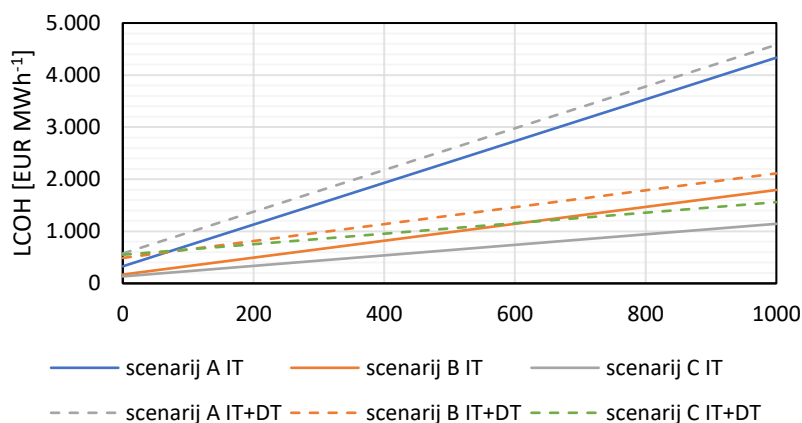
## 5.6. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza izvršena prema metodi iz Poglavlja 3.4, prikazana je pomoću LCOH za svaki pojedini scenarij, za mogućnost spajanja IT koji je imao prednost u provođenju proračuna i istovremenom mogućnosti spajanja DT i IT, a sve to u ovisnosti o duljini priključnog toplovoda i analize osjetljivosti. Za priključak na rashladne uređaje supermarketa nivelirani trošak rekuperirane toplinske energije je najmanji. Razlog tomu može se detektirati u najvećoj specifičnoj energiji i to što je izvor na najvišim temperaturama. Tome doprinosi i praktički stalna potreba za održavanjem namirnica. Za najveću prikazanu duljinu priključka toplovoda od 1000 m cijena priključka DT i IT u odnosu na izmjenjivač topline je 2,2 puta veća, a snižavanjem temperature CTS-a, LCOH se ne mijenja značajno kao što prikazuje Slika 75.

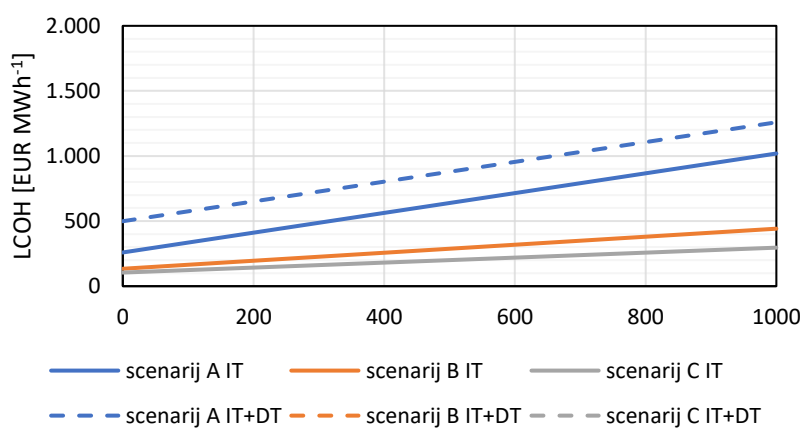


**Slika 75:** LCOH u ovisnosti o duljini priključka za rashladne uređaje supermarkete

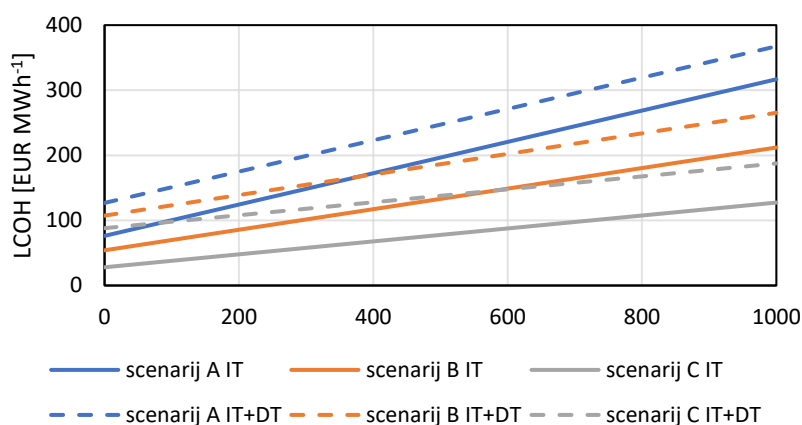
Najveći je nivelirani trošak spajanja na CTS u odnosu na promatrane urbane toplinske izvore za sustave hlađenja prostora supermarketa. Za trenutno stanje CTS-a priključak je ovog izvora otpadne topline pomoću IT-a s pretpostavkama modela oko 60 puta viši nego za prethodni primjer. Kada se uključi i DT, LCOH je i dalje najveći. Po visini troškova parirati sustavu hlađenja prostora supermarketa može jedino sustav hlađenja prostora trgovačkih centara. Snižavanjem temperaturnih režima CTS-a smanjuje se i LCOH za sustave hlađenja prostora trgovačkih centara. Veći se pad događa pri prvom snižavanju temperature sa scenarija A na scenarij B koji iznosi oko 56%, dok drugi pad sa scenarija B na scenarij C iznosi oko 32%. U scenariju C s IT-om i DT-om LCOH je najveći. Razlog tomu leži u činjenici da je pri istoj nazivnoj veličini DT rekuperirano oko 675 puta manje topline u CTS. Kao najisplativije rješenje prepoznaje se metodologija IT-a s najnižim temperaturama CTS-a. Slika 77 prikazuje ostale scenarije za hlađenje prostora trgovačkih centara.



**Slika 76:** LCOH u ovisnosti o duljini priključka za sustave hlađenja prostora supermarketeta

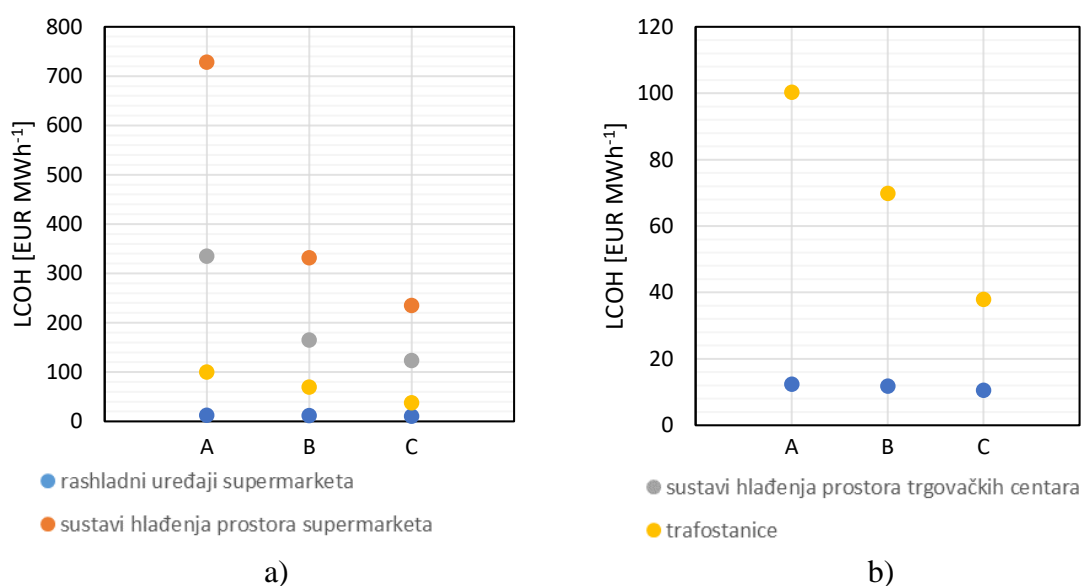


**Slika 77:** LCOH u ovisnosti o duljini priključka za sustave hlađenja prostora trgovačkih centara.  
**Napomena:** Scenariji B i C za slučaj izmjene topline metodom IT+DT izostavljeni su s prikaza zbog višestruko veće skale koja ekonomski nije ostvariva.

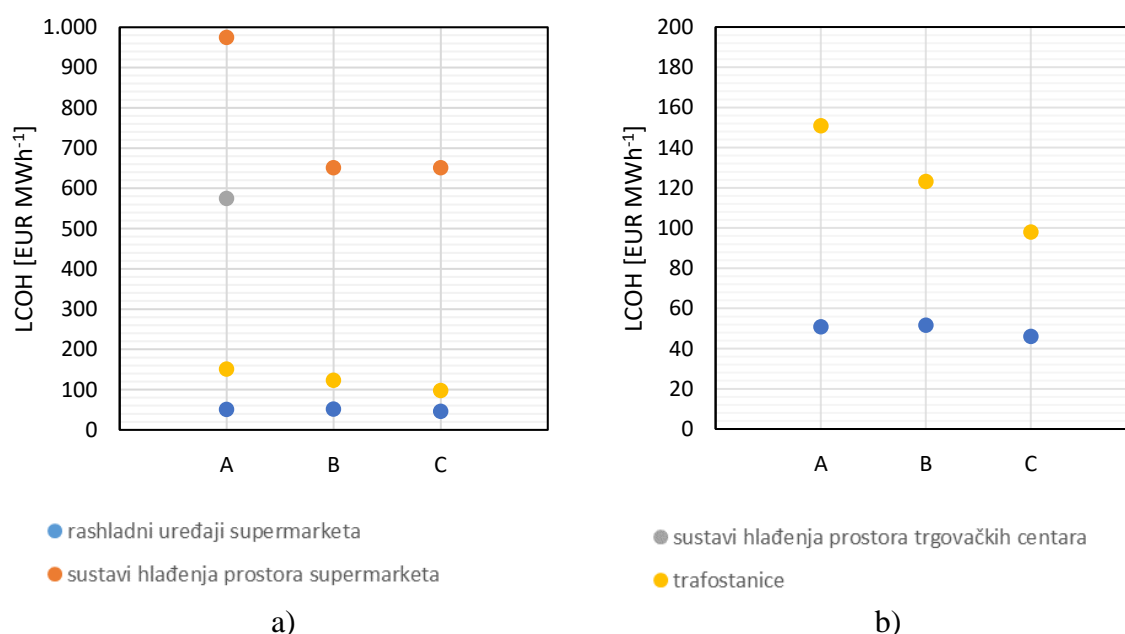


**Slika 78:** LCOH u ovisnosti o duljini priključka za trafostanice

Izvori s drugim najmanjim LCOH jesu trafostanice. Snižavanjem temperaturnih režima za istu duljinu priključka CTS-a smanjuje se LCOH oko 50% kao što prikazuje Slika 78. Pravci za istovjetne scenarije, prateći povećanje duljine priključka, ostaju paralelni. Povećanjem te duljine u istom načinu rekuperacije topline (bilo IT bilo IT+DT) više se udaljuju, odnosno smanjenje temperaturnog režima ima veći utjecaj na većim udaljenostima nego na manjim za oba slučaja. Sumarni prikaz LCOH-a za duljinu priključka od 100 metara prikazuju Slika 79 i Slika 80.

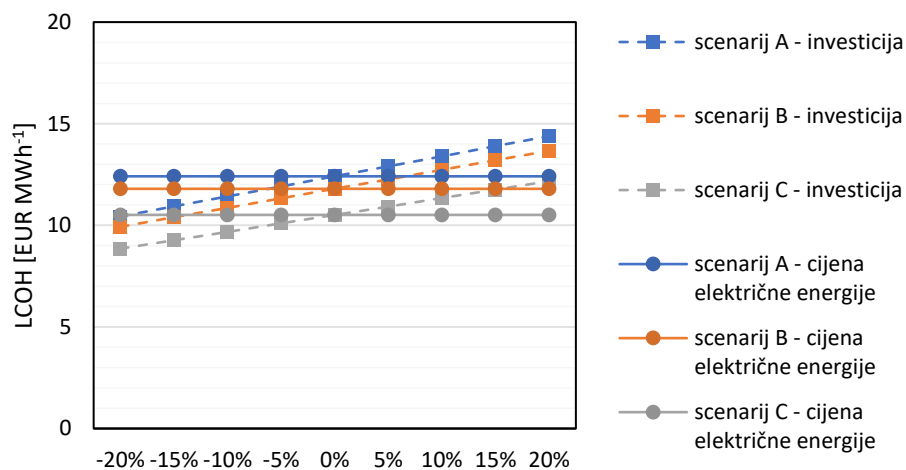


**Slika 79:** a) Usporedni prikaz LCOH za metodu izmjene topline pomoću IT (priključak 100 m) za promatrane objekte b) detalj realnijih iznosa troškova

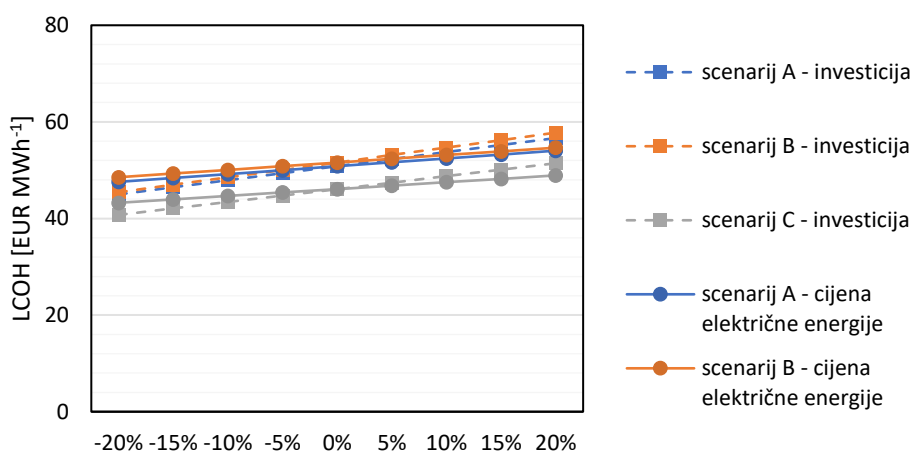


**Slika 80:** a) Usporedni prikaz LCOH za metodu izmjene topline pomoću IT+DT (priključak 100 m) za promatrane objekte b) detalj realnijih iznosa troškova

Analiza osjetljivosti pokazuje koliko promjena određenog parametra utječe na cjelokupnu sliku i promatrani ekonomski parametar. U daljnjoj analizi, nastavlja se praćenje niveliranog troška toplinske energije. Zbog ekonomije prostora te već spomenute činjenice o velikim razlikama u vrijednostima LCOH-a, neki od predloženih dijagrama u nastavku ishodište svoje osi ordinata nemaju u nuli. Slika 81 i Slika 82 prikazuju analize rashladnih uređaja supermarketeta.

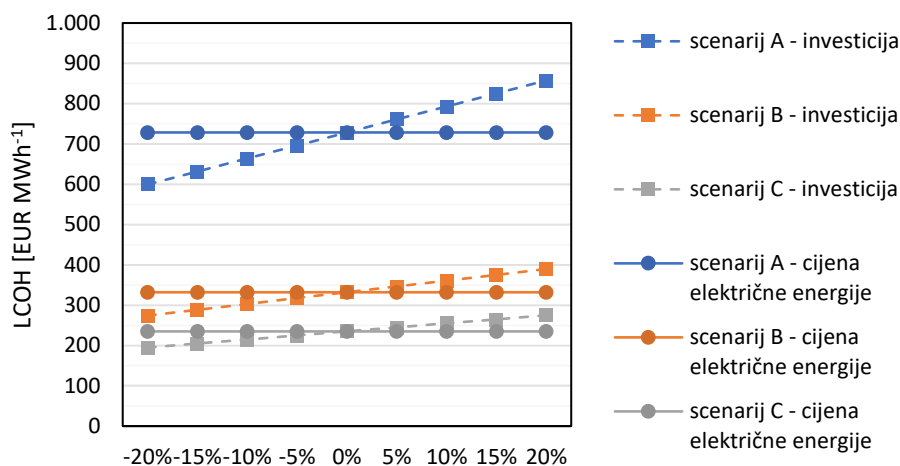


**Slika 81** Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline rashladnih uređaja supermarketeta metodom IT

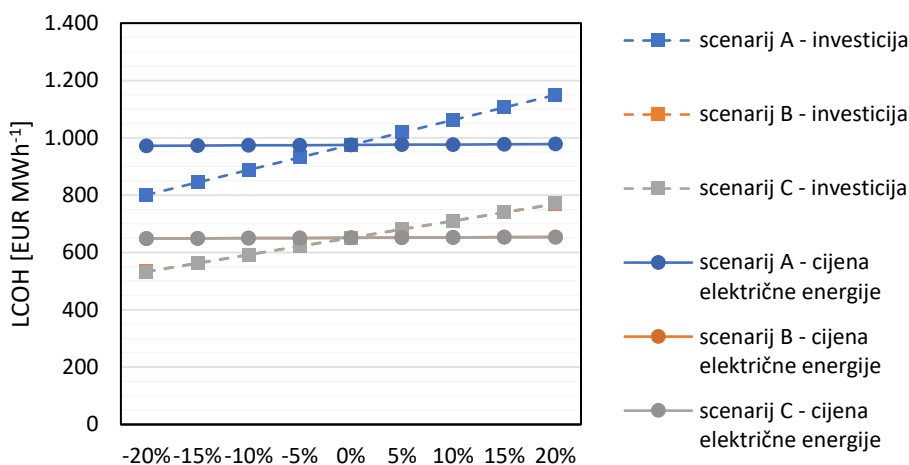


**Slika 82:** Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline rashladnih uređaja supermarketeta metodom IT+DT

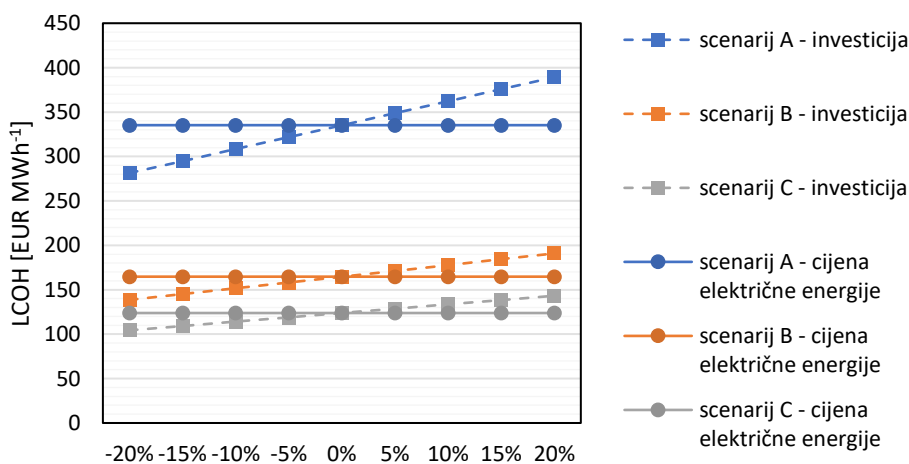
Za rekuperaciju otpadne topline pomoću IT-a relativni utjecaj investicije podjednak je za sva tri scenarija, dok utjecaj električne energije zbog njezina nekorštenja u ovom sustavu nema nikakav značaj. Od svih promatranih izvora, najveći utjecaj cijene električne energije, upravo je kod rashladnih uređaja supermarketeta. Značajan iznos i cijene električne energije i investicije na LCOH-a postoji kod objekata trafostanica i rashladnih uređaja supermarketeta, što je zapravo izravna posljedica njihove mogućnosti korištenja DT-a. Slika 83 do Slika 88 prikazuju se analize osjetljivosti za preostale promatrane objekte.



Slika 83: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora supermarketa metodom IT

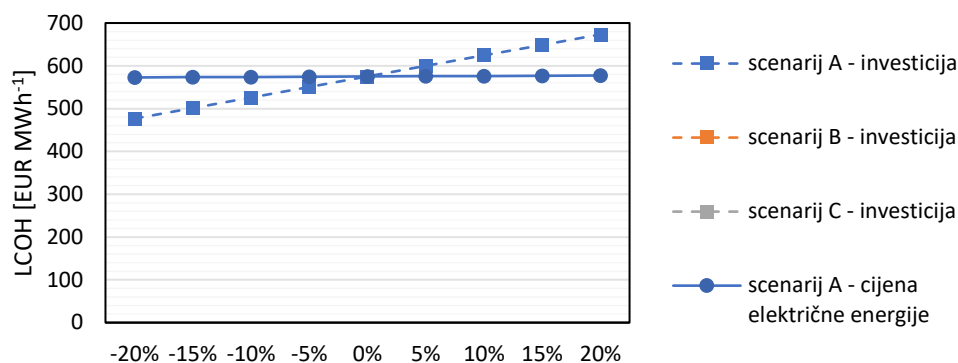


Slika 84: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora supermarketa metodom IT+DT

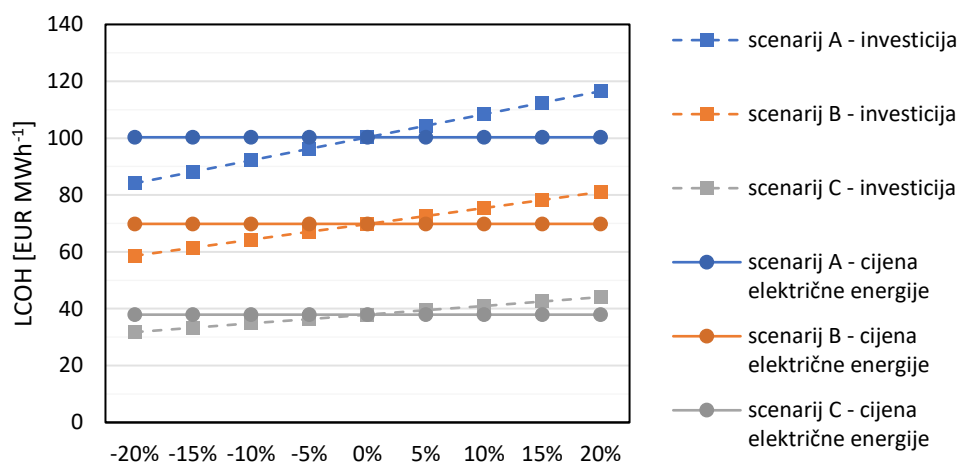


Slika 85: Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora trgovačkih centara metodom IT

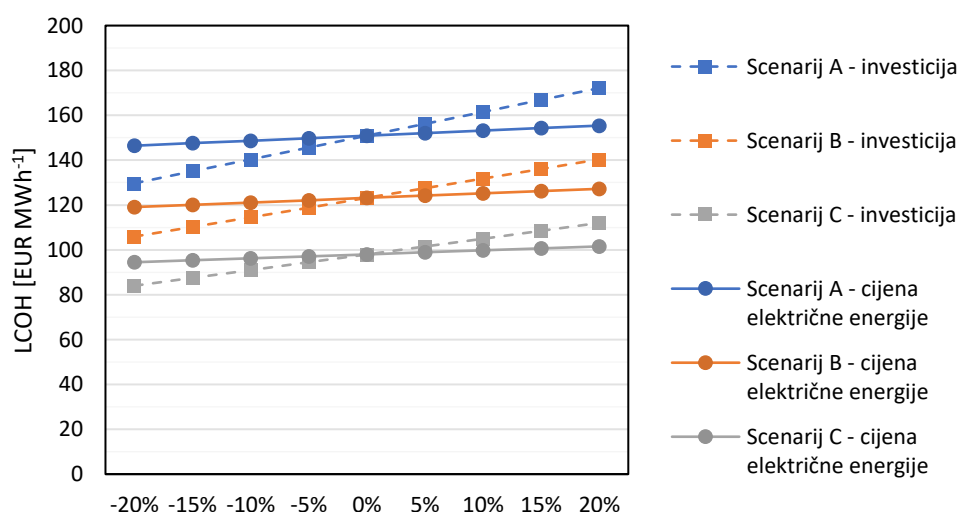




**Slika 86:** Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline sustava hlađenja prostora trgovačkih centara metodom IT+DT. **Napomena:** Scenariji B i C su za oba slučaja analize izostavljeni s prikaza zbog višestruko veće skale koja ekonomski nije ostvariva.



**Slika 87:** Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline trafostanica metodom IT



**Slika 88:** Analiza osjetljivosti za scenarije u slučaju iskorištavanja otpadne topline trafostanica metodom IT+DT

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan jedan od mogućih načina optimizacije spajanja urbanih toplinskih izvora na postojeće toplinske sustave. Centralizirani toplinski sustavi gotov se uvijek nalaze u gusto naseljenim područjima koja su najčešće i urbanizirana te imaju velike potrebe za toplinskom energijom. Temperaturni režimi smanjuju se tijekom razvoja novih generacija toplinskih mreža. Dok je u svijetu četvrta generacija CTS-a često implementirana te je postala praksa u projektiranju ovakvih sustava, u RH su još uvijek aktualne prve, druge ili treće generacije. Otpadnom toplinom može se odrediti svaki onaj toplinski nusprodukt određenog procesa čija daljnja integracija u taj isti proces nije moguća te ju je potrebno ispustiti u okoliš na određenoj temperaturnoj razini i u određenoj količini. U radu su prikazana četiri izvora otpadne topline: supermarket s rashladnim uređajima za namirnice i sustavom hlađenja prostorija, trgovački centar sa sustavom hlađenja i trafostanice. Dan je pregled literature koja pobliže opisuje procese u svakom od ova četiri izvora topline te načine njezine rekuperacije. Rekuperacija otpadne topline najbolja je kada se događa *in situ*, ali i dalje postoji određeni potencijal koji se može iskoristiti. U modeliranju metode rekuperacija topline uzeta je u obzir samo u rashladnim uređajima supermarketa. Model izmjene topline na razini urbani toplinski izvor – CTS postavljen je na temeljima *pinch* analize. U toj analizi pravo prvenstva rekuperacije topline ima izmjenjivač topline, a onda, u ovisnosti o preostaloj otpadnoj toplini, dizalica topline koja rekuperira ostatak. Dizalica topline modelirana je pomoću Lorenzova toplinskog množitelja (COP) koji ovisi o logaritamskim temperaturnim razlikama toplinskog izvora i ponora. Dodatno je prikazana metoda mapiranja toplinskih izvora u geografskom informacijskom sustavu i valorizacija troška pomoću niveliranog troška toplinske energije. Ovako modelirana metoda predstavlja temelj za konkretan slučaj grada Zagreba. Predviđeno je snižavanje temperaturnog režima trenutnog CTS-a u Zagrebu. Scenarijska analiza obogaćena je predviđenom izmjenom topline isključivo pomoću izmjenjivača topline ili u paralelnom radu izmjenjivača i dizalice topline te varijacijom promjera priključnog spoja CTS-a. Utvrđeno je da je, neovisno o scenariju i duljini priključka, ekonomski i termodinamički gledano najefikasnije iskoristavati potencijale rashladnih uređaja supermarketa i trafostanica, dok je sustavima hlađenja prostora, prema postavljenom modelu, nivelirani trošak toplinske energije višestruko veći.

## **ZAHVALA**

Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta REWARDHeat (ugovor broj 857811) financiranog Europskom komisijom programom Obzor2020.

## LITERATURA

- [1] E. Zailac, "Sjedinjene Države i zapadni saveznici za vrijeme naftne krize Sjedinjene Države i zapadni saveznici za vrijeme naftne krize," Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [2] "EU i Pariški sporazum: Put prema klimatskoj neutralnosti," 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20191115STO66603/eu-i-pariski-sporazum-put-prema-klimatskoj-neutralnosti>.
- [3] Ž. Jurić and M. Tot, "UTJECAJ PROTOKOLA IZ KYOTA NA RAZVOJ HRVATSKOG ELEKTROENERGETSKOG SEKTORA," in *Hrvatski ogranak Međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ*, 2007, vol. 8, pp. 1–10, [Online]. Available: <https://bib.irb.hr/datoteka/351313.C32012.pdf>.
- [4] "Pariški sporazum," *Službeni list Europske unije*, 2016. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=HR](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=HR).
- [5] "Put prema 20-20-20 i dalje," *Nacionalni portal energetske učinkovitosti*. <https://www.enu.hr/ee-u-hrvatskoj/20-20-20-i-dalje/>.
- [6] Phys.org, "EU set to meet two of its three 2020 climate goals." <https://phys.org/news/2020-11-eu-climate-goals.html>.
- [7] European Commission, "2030 climate & energy framework." [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en).
- [8] K. Ružela, "Europski Zeleni Plan," *REGEA*, 2020. <http://regea.org/europski-zeleni-plan-regea/?sfw=pass1618816981>.
- [9] N. Bertelsen and B. V. Mathiesen, "EU-28 residential heat supply and consumption: Historical development and status," *Energies*, vol. 13, no. 8, 2020, doi: 10.3390/en13081894.
- [10] C. Mateu-Royo, S. Sawalha, A. Mota-Babiloni, and J. Navarro-Esbrí, "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.
- [11] S. Petrović, F. Bühler, and U. Radoman, "Power transformers as excess heat sources," *ECOS 2019 - Proc. 32nd Int. Conf. Effic. Cost, Optim. Simul. Environ. Impact Energy Syst.*, pp. 3435–3447, 2019.
- [12] R. Agathokleous *et al.*, "Waste heat recovery in the EU industry and proposed new

- technologies,” *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 489–496, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.064.
- [13] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. La Commare, and G. Micale, “Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 138, no. April, pp. 207–216, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.
- [14] F. Knezović, “Visokotemperaturne dizalice topline u industriji,” Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [15] T. Bossmann, P. Attard, G. Peña Verrier, and L. Fournié, “METIS Studies: Study S9 Cost-efficient district heating development,” 2018.
- [16] H. Li and N. Nord, “Transition to the 4th generation district heating - Possibilities, bottlenecks, and challenges,” *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 483–498, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.213.
- [17] A. Rakić, D. Ljoljo, and D. Ljubas, “Tehničke mjere za sprječavanje razmnožavanja bakterija *Legionella* spp . u sustavima za opskrbu toplom vodom,” *Hrvat. vode*, vol. 24, pp. 109–118, 2016.
- [18] H. Lund *et al.*, “4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [19] B. Šeb, “Toplinska mreža grada Zagreba,” Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [20] E. Wheatcroft, H. Wynn, K. Lygnerud, G. Bonvicini, and D. Leonte, “The role of low temperature waste heat recovery in achieving 2050 goals: A policy positioning paper,” *Energies*, vol. 13, no. 8, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/en13082107.
- [21] 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/Handbook\\_-\\_25\\_cases\\_of\\_urban\\_waste\\_heat\\_recovery.pdf](http://toolbox.celsiuscity.eu/images/e/e1/Handbook_-_25_cases_of_urban_waste_heat_recovery.pdf).
- [22] M. Karampour, S. Sawalha, and J. Arias, “Eco-friendly supermarkets - an overview Report 2,” pp. 1–53, 2016, [Online]. Available: [www.supersmart-supermarket.org](http://www.supersmart-supermarket.org).
- [23] Daikin, “Nova F-gas regulativa,” 2012.
- [24] A. Abdi, “Analysis of heat recovery in supermarket refrigeration using carbon dioxide

- as refrigerant Analysis of heat recovery in supermarket refrigeration system using carbon dioxide as refrigerant,” 2014.
- [25] I. Uzbašić, “Projekt demonstracijskog rashladnog uređaja s ugljikovim dioksidom kao radnom tvari,” Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [26] B. Zühlsdorf, A. R. Christiansen, F. M. Holm, T. Funder-Kristensen, and B. Elmegaard, “Analysis of possibilities to utilize excess heat of supermarkets as heat source for district heating,” *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 276–285, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.192.
- [27] “The art of handling science,” p. 9001, 2013.
- [28] B. Šegotić, “Diplomski rad,” Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2010.
- [29] R. Goić, D. Jakus, and I. Penović, *Distribucija električne energije - interna skripta*. Split: FESB, 2008.
- [30] B. Skalicki and J. Grilec, *Električni strojevi i pogoni*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [31] K. Riley, “Transformer Cooling Basics,” Huntington Beach, 2017.
- [32] D. Žarko, “Zakoni sličnosti, zagrijavanje i hlađenje, vijek trajanja, tipska snaga, autotransformator, prenaponi, natpisna pločica - predavanja,” 2017.
- [33] M. Trbusic, R. Marusa, J. Pihler, and A. Hamler, “Utilization of dissipated heat of power transformers,” *Transform. Mag.*, pp. 84–93, 2019.
- [34] W. Meesenburg, J. Christian, R. Kruse, and Z. A. Ali, “Flexible heat supply from supermarket refrigeration systems.”
- [35] V. Sharma, B. Fricke, and P. Bansal, “Comparative analysis of various CO<sub>2</sub> configurations in supermarket refrigeration systems,” *Int. J. Refrig.*, vol. 46, pp. 86–99, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.07.001.
- [36] 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.
- [37] B. Gschrey, J. Kleinschmidt, and S. Barrault, “Briefing Paper : HFCs and HFC alternatives in split air conditioning systems,” no. 517, pp. 1–10, 2020, [Online]. Available:

- [https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/briefing\\_paper\\_hfc\\_alternatives\\_en.pdf](https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/briefing_paper_hfc_alternatives_en.pdf).
- [38] F. Bonomi, "ANALISI TECNICO-ENERGETICA PRELIMINARE RELATIVA: RELATIVA ALL'INSTALLAZIONE DI UN SISTEMA DI RECUPERO TERMICO CON POMPE DI CALORE PRESSO LA CABINE PRIMARIA 'GADIO,'" 2018.
- [39] IEC, "International Electrotechnical Commission- 60076-7 International Standard, Loading guide for oil-immersed power transformers," *Iec*, pp. 1–56, 2009.
- [40] P. Rašković, "Management u energetici Pinch metoda," 2017.
- [41] J. K. Jensen, T. Ommen, L. Reinholdt, W. B. Markussen, and B. Elmegaard, "Heat pump COP, part 2: Generalized COP estimation of heat pump processes," *Refrig. Sci. Technol.*, vol. 2018-June, pp. 1255–1264, 2018, doi: 10.18462/ir.gl.2018.1386.
- [42] A. Toskić, "Analize u GIS-u."
- [43] "Photovoltaic Geographical Information System," *European Commission*.  
[https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#TMY](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY).
- [44] European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° 608678., "CommONEnergy Deliverable 2.4 Interaction with the local energy grid," no. 608678, 2015.
- [45] "Procjena ugroženosti stanovništva, materijalnih i kulturnih dobara i okoliša od katastrofa i velikih nesreća za područje Grada Zagreba," Zagreb, 2016.
- [46] HEP, "Poziv za medije - svečano puštanje u rad TS 110/10(20) Ferensčica."
- [47] HEP, "Podaci za izračun 2019." <https://www.hep.hr/ods/opskrbljivaci/pravila-primjene-nadomjesnih-krivulja-opterećenja/podaci-za-izracun-2019/613>.
- [48] I. Best, J. Orozaliiev, and K. Vajen, "Economic comparison of low-temperature and ultra-low-temperature district heating for new building developments with low heat demand densities in Germany," *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 16, pp. 45–60, 2018, doi: 10.5278/ijsepm.2018.16.4.
- [49] *SCHWESERNOTES™ 2013 CFA LEVEL I BOOK 4: CORPORATE FINANCE, PORTFOLIO MANAGEMENT, AND EQUITY INVESTMENTS*. Kaplan Schweser.
- [50] D. Dunković, "Strateško menadžersko računovodstvo -," 2011.
- [51] 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](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/macro_eu_clean_energy_finance_final.pdf).
- [52] S. A. Aromada, N. H. Eldrup, F. Normann, and L. E. Øi, “energies Techno-Economic Assessment of Different Heat Exchangers for CO<sub>2</sub> Capture,” 2020.
- [53] “Technology Data for Generation of Electricity and District Heating.”  
<https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>.
- [54] “Electricity prices for non-household consumers, second half 2020,” *Eurostat*.  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity\\_prices\\_for\\_non-household\\_consumers,\\_second\\_half\\_2020\\_\(EUR\\_per\\_kWh\)\\_v1.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_non-household_consumers,_second_half_2020_(EUR_per_kWh)_v1.png).



## **PRILOZI**

- I. VBA kod *pinch* metode, opći dio
- II. VBA kod *pinch* metode, IT dio
- III. VBA kod *pinch* metode, DT dio
- IV. T-H dijagrami specifičnih točaka

I. VBA kod *pinch* metode, opći dio

```
Option Explicit
```

```
Global d_l, d_u, d_k, n, d, cp, ro, v, mcp_DH, eta_lor, i, T,  
T_DH_s, T_DH_r, fi_loss, T_HS_1, T_HS_2, fi_HS_1, fi_HS_2, dT_pp,  
k_DH, fi_DH, k_HS, mcp_HS, l_HS, T_x, fi_x, fi_xx, T_x_HS, fi_x_HS,  
T_HE_DH_1, T_HE_DH_2, fi_HE_DH_1, fi_HE_DH_2, T_HE_HS_1, T_HE_HS_2,  
fi_HE_HS_1, fi_HE_HS_2, T_DH_2, fi_BHP_DH_1, fi_BHP_DH_2,  
T_BHP_DH_1, T_BHP_DH_2, COP, fi_BHP_HS_2, fi_BHP_HS_1, T_BHP_HS_2,  
T_BHP_HS_1 As Double
```

```
Sub dani()
```

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
For i = 0 To 8
```

```
    d = Worksheets("inputs").Range("$0" & i + 12)
```

```
    cp = Worksheets("pinch").Range("$Q$6")
```

```
    ro = Worksheets("pinch").Range("$Q$7")
```

```
    v = Worksheets("pinch").Range("$Q$8")
```

```
    mcp_DH = (d ^ 2 * 3.14159 * v * ro * cp / 4) / 1000
```

```
    Call probica
```

```
Next i
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
MsgBox "Done"
```

```
End Sub
```

II. VBA kod *pinch* metode, IT dio

```

Sub probica()
'
' probica Macro
'
'inputs

For T = 1 To 8760
Application.StatusBar = "Progress: " & "T=" & T & "d= " & d
  T_DH_s = Worksheets("inputs").Range("$D" & T + 2)
  T_DH_r = Worksheets("inputs").Range("$E" & T + 2)

  fi_loss = Worksheets("inputs").Range("$J" & T + 2)

  T_HS_1 = Worksheets("inputs").Range("$K" & T + 2)
  T_HS_2 = Worksheets("inputs").Range("$L" & T + 2)

  fi_HS_1 = fi_loss
  fi_HS_2 = 0

  dT_pp = Worksheets("pinch").Range("$C$2")

  k_DH = 1 / mcp_DH
  fi_DH = mcp_DH * (T_DH_s - T_DH_r)

  k_HS = (T_HS_1 - T_HS_2) / (fi_HS_1 - fi_HS_2)
  mcp_HS = 1 / k_HS
  l_HS = T_HS_1 - k_HS * fi_HS_1

  If mcp_DH <= mcp_HS Then
    If T_DH_s <= T_HS_1 - dT_pp And T_DH_r <= T_HS_1 - dT_pp Then
      T_HE_DH_1 = T_DH_r
      T_HE_DH_2 = T_DH_s
      fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
      fi_HE_DH_1 = fi_HE_DH_2 + (T_HE_DH_1 - T_HE_DH_2) /
k_DH
      If fi_HE_DH_1 < 0 Then
        T_x = -k_DH * fi_HE_DH_2 + T_DH_s
        T_HE_DH_1 = T_DH_r
        T_HE_DH_2 = T_DH_s - (T_x - T_DH_r)
        fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
        fi_HE_DH_1 = 0
      End If
      fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
      fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
      T_HE_HS_2 = k_HS * fi_HE_HS_2 + l_HS
      T_HE_HS_1 = T_HS_1
    End If
  End If
End For

```

```

ElseIf T_DH_s > T_HS_1 - dT_pp And T_DH_r < T_HS_1 - dT_pp
Then
    T_HE_DH_1 = T_DH_r
    T_HE_DH_2 = T_HS_1 - dT_pp
    fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
    fi_HE_DH_1 = fi_HE_DH_2 + (T_HE_DH_1 - T_HE_DH_2) /
k_DH
        If fi_HE_DH_1 < 0 Then
            T_x = -k_DH * fi_HE_DH_2 + T_DH_s
            T_HE_DH_1 = T_DH_r
            T_HE_DH_2 = T_DH_s - (T_x - T_DH_r)
            fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
            fi_HE_DH_1 = 0
        End If
        fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
        fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
        T_HE_HS_2 = k_HS * fi_HE_HS_2 + l_HS
        T_HE_HS_1 = T_HS_1
Else
    T_HE_DH_1 = T_HS_1
    T_HE_DH_2 = T_HS_1
    fi_HE_DH_1 = fi_HS_1
    fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
    fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
    fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
    T_HE_HS_1 = T_HS_1
    T_HE_HS_2 = T_HS_1
End If
Else
    If T_DH_r < T_HS_2 - dT_pp And T_DH_r < T_HS_1 - dT_pp Then
        T_HE_DH_1 = T_DH_r
        fi_HE_DH_1 = 0
        fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
        T_DH_2 = k_DH * fi_HE_DH_2 + T_DH_r
        If T_DH_2 > T_DH_s Then
            fi_x = (T_DH_s - T_DH_r) / k_DH
            fi_xx = fi_HS_1 - fi_x
            fi_HE_DH_1 = fi_xx
            fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
            T_DH_2 = k_DH * (fi_HE_DH_2 - fi_HE_DH_1) + T_DH_r
        Else
            End If
        T_HE_DH_2 = T_DH_2
        fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
        fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
        T_HE_HS_2 = k_HS * fi_HE_HS_2 + l_HS
        T_HE_HS_1 = T_HS_1
    
```

```

ElseIf T_DH_r >= T_HS_2 - dT_pp And T_DH_r < T_HS_1 - dT_pp
Then
    T_x_HS = dT_pp + T_DH_r
    fi_x_HS = (T_x_HS - l_HS) / k_HS
    fi_HE_DH_1 = fi_x_HS
    fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
    T_DH_2 = k_DH * (fi_HE_DH_2 - fi_HE_DH_1) + T_DH_r
    If T_DH_2 > T_DH_s Then
        fi_x = (T_DH_s - T_x_HS) / k_DH
        fi_xx = fi_HS_1 - fi_x
        fi_HE_DH_1 = fi_xx
        fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
        T_DH_2 = k_DH * (fi_HE_DH_2 - fi_HE_DH_1) + T_DH_r
    Else
        End If
    T_HE_DH_1 = T_DH_r
    T_HE_DH_2 = T_DH_2
    fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
    fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
    T_HE_HS_2 = k_HS * fi_HE_HS_2 + l_HS
    T_HE_HS_1 = T_HS_1
Else
    T_HE_DH_1 = T_HS_1
    T_HE_DH_2 = T_HS_1
    fi_HE_DH_1 = fi_HS_1
    fi_HE_DH_2 = fi_HS_1
    fi_HE_HS_2 = fi_HE_DH_1
    fi_HE_HS_1 = fi_HE_DH_2
    T_HE_HS_1 = T_HS_1
    T_HE_HS_2 = T_HS_1
End If
End If

If T_HE_HS_2 - T_HS_2 > dT_pp Then
Call BHP
Else
    fi_BHP_DH_2 = 0
    fi_BHP_DH_1 = 0
    T_BHP_DH_1 = 0
    T_BHP_DH_2 = 0
    fi_BHP_HS_2 = fi_HE_HS_2
    fi_BHP_HS_1 = fi_HE_HS_2
    T_BHP_HS_1 = T_HE_HS_2
    T_BHP_HS_2 = T_HE_HS_2
End If

Worksheets("pinch").Range("$C$6") = T_HS_1

```

```

Worksheets("pinch").Range("$C$7") = T_HS_2

Worksheets("pinch").Range("$C$8") = fi_loss

Worksheets("pinch").Range("$C$17") = T_HE_DH_1
Worksheets("pinch").Range("$C$18") = T_HE_DH_2
Worksheets("pinch").Range("$C$19") = fi_HE_DH_1
Worksheets("pinch").Range("$C$20") = fi_HE_DH_2

Worksheets("pinch").Range("$C$23") = T_HE_HS_1
Worksheets("pinch").Range("$C$24") = T_HE_HS_2
Worksheets("pinch").Range("$C$25") = fi_HE_HS_1
Worksheets("pinch").Range("$C$26") = fi_HE_HS_2

Worksheets("results_Q").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_Q").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_Q").Range("$B$2") = "fi_HE_DH, kW"
Worksheets("results_Q").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_Q").Cells(T + 2, 2 + i) = fi_HE_DH_2 - fi_HE_DH_1
Worksheets("results_Q").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T").Range("$B$2") = "T_DH_s - T_HE_DH_2, C"
Worksheets("results_T").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T").Cells(T + 2, 2 + i) = T_DH_s - T_HE_DH_2
Worksheets("results_T").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T_HE_DH_1").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T_HE_DH_1").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T_HE_DH_1").Range("$B$2") = "T_HE_DH_1, C"
Worksheets("results_T_HE_DH_1").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T_HE_DH_1").Cells(T + 2, 2 + i) = T_HE_DH_1
Worksheets("results_T_HE_DH_1").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T_HE_DH_2").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T_HE_DH_2").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T_HE_DH_2").Range("$B$2") = "T_HE_DH_2, C"
Worksheets("results_T_HE_DH_2").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T_HE_DH_2").Cells(T + 2, 2 + i) = T_HE_DH_2
Worksheets("results_T_HE_DH_2").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T_HE_HS_1").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T_HE_HS_1").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T_HE_HS_1").Range("$B$2") = "T_HE_HS_1, C"
Worksheets("results_T_HE_HS_1").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T_HE_HS_1").Cells(T + 2, 2 + i) = T_HE_HS_1

```

```
Worksheets("results_T_HE_HS_1").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T_HE_HS_2").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T_HE_HS_2").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T_HE_HS_2").Range("$B$2") = "T_HE_HS_2, C"
Worksheets("results_T_HE_HS_2").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T_HE_HS_2").Cells(T + 2, 2 + i) = T_HE_HS_2
Worksheets("results_T_HE_HS_2").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Range("$B$2") = "fi_BHP_HS_2, kW"
Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Cells(T + 2, 2 + i) = fi_BHP_HS_2
Worksheets("results_fi_BHP_HS_2").Cells(1, 2 + i) = d

Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Range("$A$1") = "d, m"
Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Range("$B$2") = "T_BHP_HS_2, C"
Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Cells(T + 2, 2 + i) = T_BHP_HS_2
Worksheets("results_T_BHP_HS_2").Cells(1, 2 + i) = d

'Call plot_pinch

Next T

'
End Sub
```

III. VBA kod *pinch* metode, DT dio

```
Sub BHP()
```

```
Dim fi_HP, dT_H, dT_C, T_H, T_C, COP_lor, fi_BHP_DH_x, T_lift, P_comp,
COP As Single
```

```
fi_HP = Worksheets("pinch").Range("$C$1")
```

```
T_BHP_HS_1 = T_HE_HS_2
```

```
fi_BHP_HS_1 = fi_HE_HS_2
```

```
fi_BHP_DH_x = fi_HE_HS_2 - fi_HP
```

```
    If fi_BHP_DH_x > 0 Then
```

```
        fi_BHP_DH_1 = fi_BHP_DH_x
```

```
        fi_BHP_HS_2 = fi_BHP_DH_1
```

```
        T_BHP_HS_2 = k_HS * fi_BHP_HS_2 + l_HS
```

```
    Else
```

```
        fi_BHP_DH_1 = 0
```

```
        fi_BHP_HS_2 = fi_BHP_DH_1
```

```
        T_BHP_HS_2 = T_HS_2
```

```
    End If
```

```
dT_H = T_DH_s - T_DH_r
```

```
dT_C = T_HE_HS_2 - T_BHP_HS_2
```

```
T_H = CLng(dT_H / (Application.WorksheetFunction.Ln((T_DH_s + 273.15) / (T_DH_r + 273.15))))
```

```
T_C = CLng(dT_C / (Application.WorksheetFunction.Ln((T_HE_HS_2 + 273.15) / (T_BHP_HS_2 + 273.15))))
```

```
T_lift = T_H - T_C
```

```
If T_lift < 10 Then
```

```
    COP_lor = 0
```

```
    eta_lor = 0
```

```
Else
```

```
    COP_lor = T_H / (T_H - T_C)
```

```
    eta_lor = 0.1312 * Application.WorksheetFunction.Ln(T_lift) -
```

```
0.0406
```

```
End If
```

```
COP = COP_lor * eta_lor
```

```
    If COP > 1.1 Then
```

```
        fi_BHP_DH_2 = fi_BHP_DH_x + COP * fi_HP / (COP - 1)
```

```
        T_BHP_DH_1 = T_DH_r
```

```
        T_BHP_DH_2 = T_DH_s
```

```
        P_comp = (fi_BHP_DH_2 - fi_BHP_DH_1) / COP
```



```

Else
    fi_BHP_DH_2 = 0
    fi_BHP_DH_1 = 0
    T_BHP_DH_1 = 0
    T_BHP_DH_2 = 0
    fi_BHP_HS_2 = fi_HE_HS_2
    fi_BHP_HS_1 = fi_HE_HS_2
    T_BHP_HS_1 = T_HE_HS_2
    T_BHP_HS_2 = T_HE_HS_2

    P_comp = 0
End If

'Graphical view
'Dim cht As ChartObject
'Set cht = Worksheets("pinch").ChartObjects("Chart 1")
'cht.Chart.FullSeriesCollection(2).IsFiltered = False
'cht.Chart.FullSeriesCollection(3).IsFiltered = False

'Ensure chart has a title
'cht.Chart.HasTitle = True

'Change chart's title
'cht.Chart.ChartTitle.Text = "hour=" & T & "; d=" & d * 1000 & "
mm" & "; COP=" & WorksheetFunction.Round(COP, 3)

= T_BHP_DH_1
Worksheets("pinch").Range("$C$30") = T_BHP_DH_2

Worksheets("pinch").Range("$C$31") = fi_BHP_DH_1
Worksheets("pinch").Range("$C$32") = fi_BHP_DH_2

Worksheets("pinch").Range("$C$35") = T_BHP_HS_1
Worksheets("pinch").Range("$C$36") = T_BHP_HS_2

Worksheets("pinch").Range("$C$37") = fi_BHP_HS_1
Worksheets("pinch").Range("$C$38") = fi_BHP_HS_2

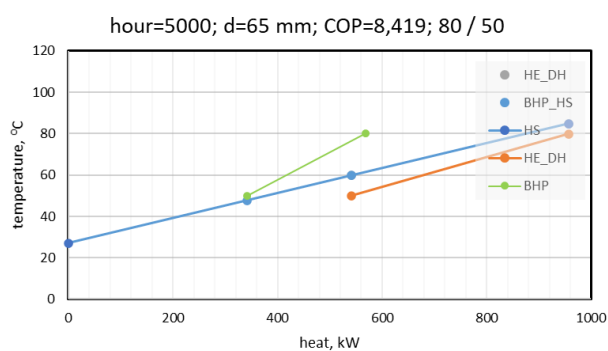
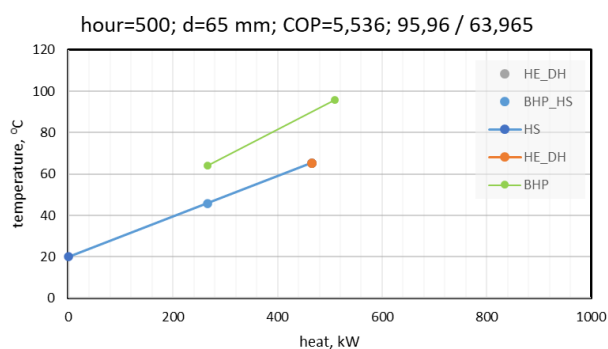
Worksheets("results_lift").Range("$A$2") = "hour"
Worksheets("results_lift").Range("$B$2") = "T_lift, C"
Worksheets("results_lift").Range("$A" & T + 2) = T
Worksheets("results_lift").Cells(T + 2, 2) = T_lift
Worksheets("results_lift").Range("$C$2") = "COP, -"
Worksheets("results_lift").Cells(T + 2, 3) = COP

```

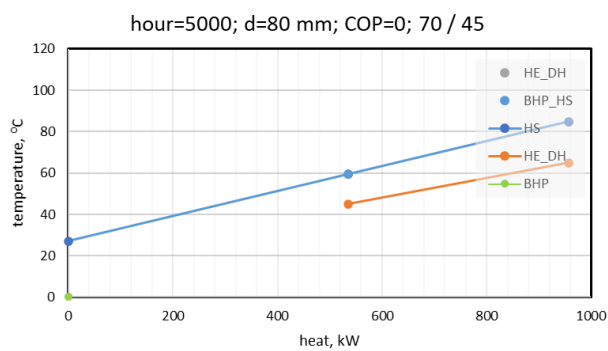
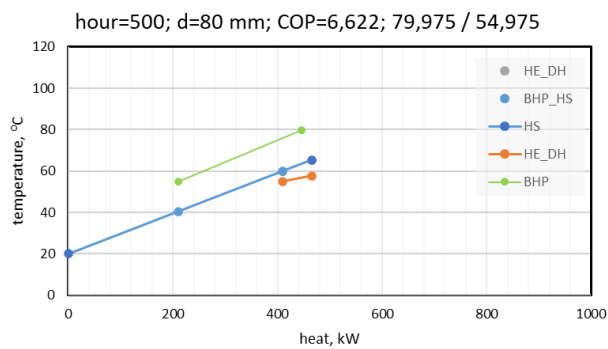
```
Worksheets("results_comp").Range("$A$2") = "hour"  
Worksheets("results_comp").Range("$A$1") = "d, m"  
Worksheets("results_comp").Range("$B$2") = "P_comp, kW"  
Worksheets("results_comp").Range("$A" & T + 2) = T  
Worksheets("results_comp").Cells(T + 2, 2 + i) = P_comp  
Worksheets("results_comp").Cells(1, 2 + i) = d  
  
Worksheets("results_cond").Range("$A$2") = "hour"  
Worksheets("results_cond").Range("$A$1") = "d, m"  
Worksheets("results_cond").Range("$B$2") = "fi_cond, kW"  
Worksheets("results_cond").Range("$A" & T + 2) = T  
Worksheets("results_cond").Cells(T + 2, 2 + i) = fi_BHP_DH_2 -  
fi_BHP_DH_1  
Worksheets("results_cond").Cells(1, 2 + i) = d  
  
End Sub
```

IV. T-H dijagrami specifičnih točaka

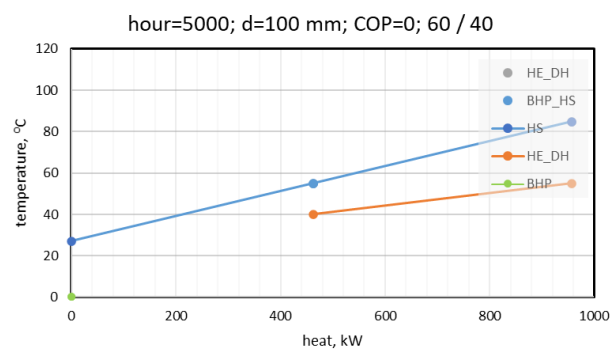
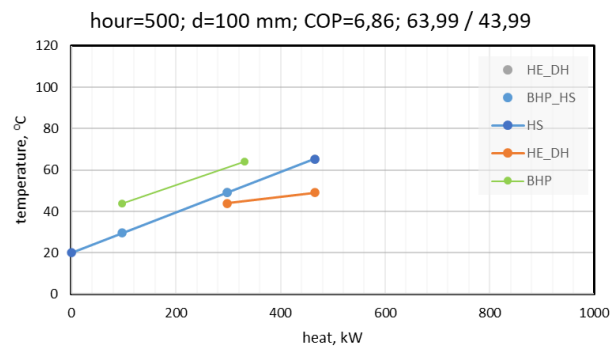
**RASHLADNI UREĐAJI SUPERMARKETA - SCENARIJ A**



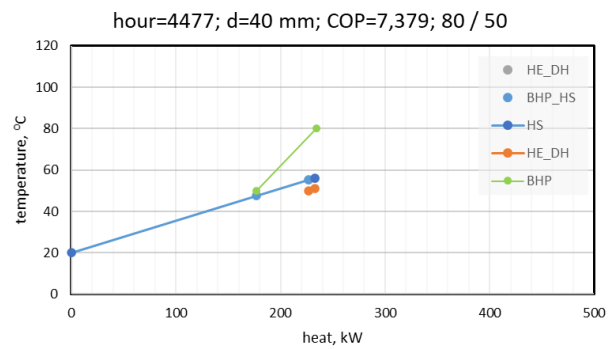
**SCENARIJ B**



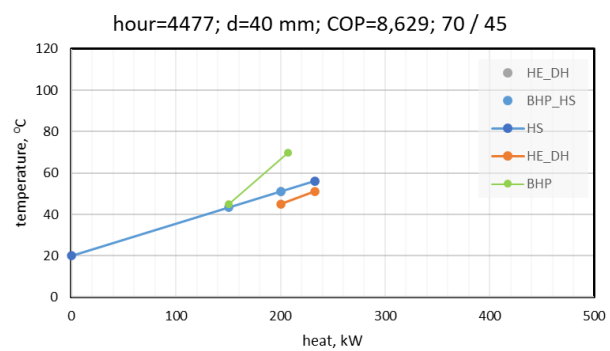
SCENARIJ C



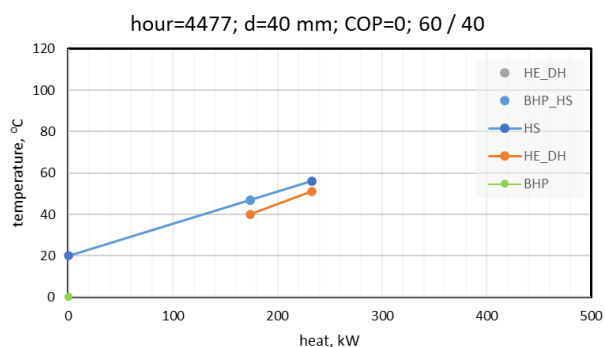
SUSTAVI HLADENJA PROSTORA SUPERMARKETA- SCENARIJ A



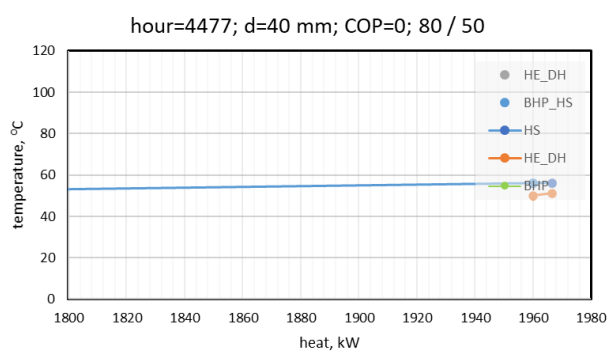
SCENARIJ B



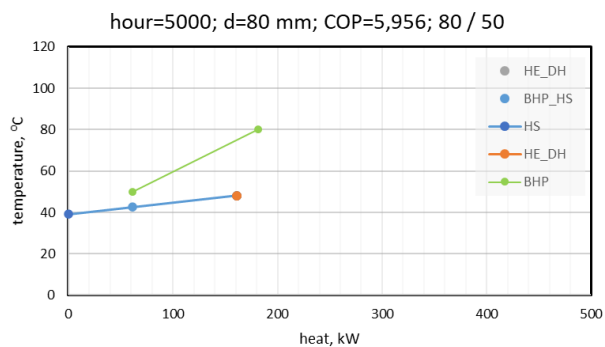
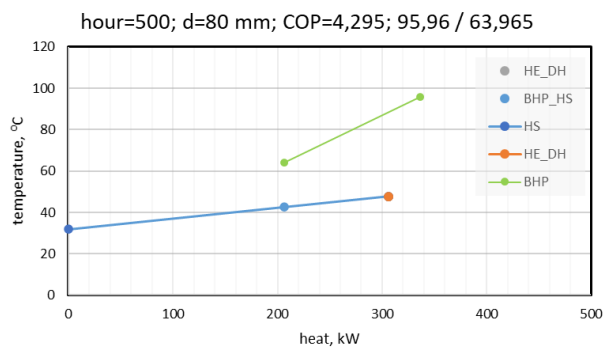
### SCENARIJ C



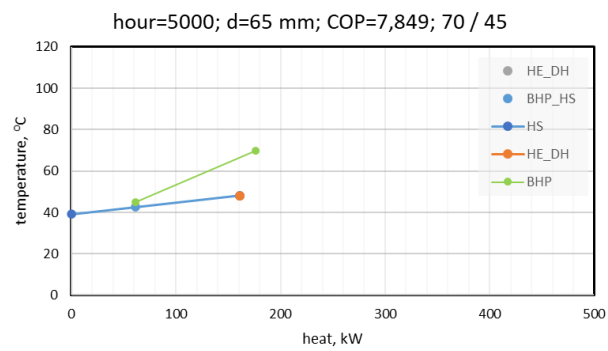
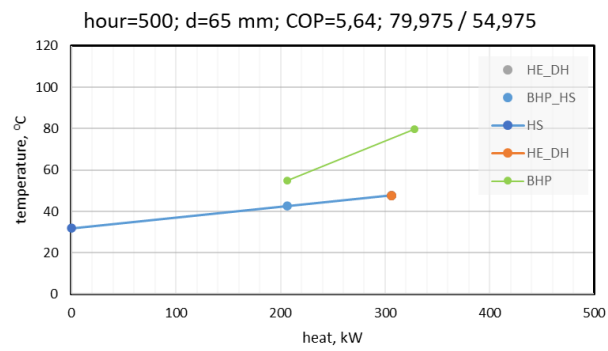
### SUSTAVI HLAĐENJA PROSTORA TRGOVAČKOG CENTRA- SCENARIJ A



### TRAFOSTANICE- SCENARIJ A



### SCENARIJ B



### SCENARIJ C

