Tehno-ekonomska analiza modernizacije toplinskih podstanica centraliziranih toplinskih sustava

Puček, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:733279

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lovro Puček

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Dr. sc. Tomislav Pukšec, dipl. ing.

Student:
Lovro Puček

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr.sc. Tomislavu Pukšecu, na prihvaćenom mentorstvu i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Također bih se zahvalio asistentu Luki Simiću, mag. ing. mech., koji me uveo u temu te svojim savjetima značajno pridonio kvaliteti ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj djevojci, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i pomoći tijekom studiranja. Vaša motivacija i ohrabrenje bili su ključni na mom dosadašnjem akademskom putu.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na neizmjernoj podršci, razumijevanju i vjeri u mene kroz sve izazove tijekom studiranja. Vaša snaga i potpora bili su mi neizostavan oslonac na ovom putu.

Lovro Puček

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 – 04 / 25 – 06 / 1**	
Ur.broj: **15 – 25 –**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Puček** JMBAG: **0035238450**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza modernizacije toplinskih podstanica centraliziranih toplinskih sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of modernization of district heating system substations**

Opis zadatka:

Dekarbonizacija centraliziranih toplinskih sustava (CTS) ključna je za postizanje ciljeva Europske unije u skladu s Direktivom o energetskoj učinkovitosti. Prelazak na obnovljive izvore energije i povećanje učinkovitosti, kako sustava tako i samih potrošača, nužni su koraci prema ostvarenju tih ciljeva. S dekarbonizacijom CTS-a podrazumijeva se i modernizacija toplinskih podstanica kako bi se pri novim radnim uvjetima osigurala učinkovita isporuka toplinske energije krajnjim potrošačima. Cilj rada je ekonomski analizirati prilagodbu toplinskih podstanica centraliziranih toplinskih sustava na promjene u režimima rada, s CTS-om grada Karlovca kao studijom slučaja.

U sklopu rada potrebno je:

1. Prikazati pregled literature na temu centraliziranih toplinskih sustava, s osvrtom na direktive i strategije dekarbonizacije CTS-a.
2. Istražiti tipove konfiguracija toplinskih podstanica CTS-a i analizirati utjecaj promjena toplinskih potreba i temperaturnih režima na tehničke zahtjeve toplinskih podstanica.
3. Izraditi scenarije i predložiti tehnička rješenja modernizacije toplinskih podstanica CTS-a grada Karlovca kao studije slučaja.
4. Izraditi tehno-ekonomsku analizu predloženih rješenja.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2024.	**1. rok:** 20. i 21. 2. 2025. **2. rok:** 10. i 11. 7. 2025. **3. rok:** 18. i 19. 9. 2025.	**1. rok:** 24. 2. – 28. 2. 2025. **2. rok:** 15. 7. – 18.7.2025 **3. rok:** 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

V Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS KRATICA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

1.1. Centralizirani toplinski sustavi 1
1.2. Temperaturni režimi centraliziranih toplinskih sustava 3

2. PREGLED DIREKTIVA EUROPSKE KOMISIJE 6

2.1. Direktiva o energetskoj učinkovitosti 6
2.1.1. Ciljevi potrošnje i uštede energije 7
2.1.2. Opskrba grijanjem i hlađenjem 7
2.2. Direktiva o obnovljivoj energiji 8
2.2.1. Preporuke i smjernice Europske komisije za grijanje i hlađenje 8
2.2.2. Vremenski okvir za obnovljivu energiju u EU 10
2.2.3. Nove mjere za daljnje korištenje obnovljivih izvora energije 10

3. TOPLINSKE PODSTANICE U CENTRALIZIRANIH TOPLINSKIH SUSTAVA 11

3.1. Utjecaj bakterija na projektiranje toplinskih podstanica 11
3.1.1. Alternativne mogućnosti izvedbe sustava proizvodnje PTV-a 13
3.2. Usporedba različitih temperaturnih režima 14
3.3. LTDH toplinske podstanice 15
3.4. ULTDH toplinske podstanice 16
3.5. NTDH toplinske podstanice 17
3.6. Integracija dizalica topline u ULTDH i NDTH toplinske podstanice 19

4. EKONOMSKA ANALIZA 22

5. STUDIJA SLUČAJA – Grad Karlovac 24

5.1. Kartografski prikaz 24
5.2. Trenutno stanje CTS-a 27
5.3. Opis zadatka 29
5.3.1. Ekonomski ulazni podaci 30
5.3.2. Tehnički ulazni podaci 32

6. REZULTATI 34

6.1. Zgrade s provedenom djelomičnom energetskom obnovom 37
6.1.1. Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a 37
6.1.2. Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a 38
6.2. Zgrade s provedenom potpunom energetskom obnovom 41
6.2.1. Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a 41
6.2.2. Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a 42

7. ZAKLJUČAK 44

LITERATURA 46

POPIS SLIKA

Slika 1 *Evolucija sustava centraliziranog grijanja [1]* 3
Slika 2 *Vremenska crta Direktive o energetskoj učinkovitosti [5]* 6
Slika 3 *Vremenska crta o obnovljivoj energiji [8]* 9
Slika 4 *Različiti temperaturni režimi grijanja prostora [11]* 11
Slika 5 *Stope rasta/suzbijanja Legionella u funkciji temperature [1]* 12
Slika 6 *Shema rada NTDH, ULTDH i LTDH temperaturnih režima [19]* 14
Slika 7 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za LTDH [1]* 15
Slika 8 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za ULTDH [1]* 17
Slika 9 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za NTDH [1]* 18
Slika 10 *Integracija dizalica topline u ULTDH i NTDH mreže [14]* 20
Slika 11 *Hidraulička shema dizalice topline u toplinskoj podstanici [15]* 21
Slika 12 *Prikaz toplinske potrebe studije slučaja* 24
Slika 13 *Krivulja relativne potrebe za grijanjem prostora* 25
Slika 14 *Prikaz objekata studije slučaja* 26
Slika 15 *Postojeći temperaturni režimi CTS-a grada Karlovca u ovisnosti o vanjskoj temperaturi* 27
Slika 16 *Postojeći temperaturni režimi CTS-a grada Karlovca u ovisnosti o vremenu* 28
Slika 17 *Proizvedena toplina CTS-a grada Karlovca* 28
Slika 18 *Kretanje vanjske temperature grada Karlovca unutar godine* 29
Slika 19 *NTDH temperature u ovisnosti o okolišu* 34
Slika 20 *ULTDH temperature u ovisnosti o okolišu* 34
Slika 21 *LTDH temperature u ovisnosti o okolišu* 35
Slika 22 *Krivulja relativne potrebe za PTV kroz jednu godinu* 35
Slika 23 *Krivulja relativne potrebe PTV + SH kroz jednu godinu* 36
Slika 24 *LCOH analiza prvog slučaja za prvi scenarij* 37
Slika 25 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za prvi slučaj u prvom scenariju* 38
Slika 26 *LCOH analiza za drugi slučaj u prvom scenariju* 39
Slika 27 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za drugi slučaj u prvom scenariju* 39
Slika 28 *LCOH analiza za prvi slučaj u drugom scenariju* 41
Slika 29 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za prvi slučaj u drugom scenariju* 42
Slika 30 *LCOH analiza za drugi slučaj u drugom scenariju* 43
Slika 31 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za drugi slučaj u drugom scenariju* 43

POPIS TABLICA

Tablica 1 Prikaz ukupne toplinske potrebe i površine 26
Tablica 2 Ekonomski ulazni podaci 31
Tablica 3 Iznosi temperatura polaza/povrata 32
Tablica 4 Podaci za toplinske potrebe u četiri analizirana slučaja 33
Tablica 5 Prikaz parametara za CAPEX i ukupan OPEX u dva slučaja 44

POPIS KRATICA

LTDH – *Low Temperature District Heating*

ULTDH – *Ultra-Low Temperature District Heating*

NTDH – *Neutral Temperature District Heating*

ATDH – *Ambient Temperature District Heating*

SH – *space heating*

SC – *space cooling*

DHW – *domestic hot water*

DH – *District heating*

4DH – *Fourth Generation of District heating*

5DH – *Fifth Generation of District heating*

EU – *European Union*

COP – *Coefficient of performance*

DHC – *District Heating and Cooling*

Mtoe – *Millions tonnes of oil equivalent*

PEX – *Cross-linked Polyethylene*

HBS – *Heat Booster Station*

TV – *Throttle Valve*

HE – *Heat Exchanger*

LCOH – *Levelized Cost of Heat*

LCOE – *Levelized Cost of Energy*

CAPEX – *Capital Expenditures*

OPEX – *Operating Expense*

CRF – *Capital Recovery Factor*

O&M – *Operations and Maintenance*

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
LCOH	€/MWh	Nivelirani trošak topline
OPEX	€	Operativni trošak
CAPEX	€	Kapitalni trošak
CRF	€	Faktor povrata kapitala
O&M	€	Troškovi na rad i održavanja
$\dot{Q}_{tot}$	MWh/a	Ukupna godišnja potreba za toplinom

SAŽETAK

U ovom radu obrađeni su centralizirani toplinski sustavi, pri čemu su objašnjeni njihova uloga u energetskom sektoru, struktura i glavna podjela prema temperaturnim režimima. Poseban naglasak stavljen je na sve generacije centraliziranih toplinskih sustava te različite konfiguracije toplinskih podstanica, kao jednog od integralnog dijela ovih sustava, s ciljem da se prikaže njihova evolucija i suvremeni trendovi u sektoru toplinarstva.

Analizirane su direktive Europske Komisije i regulative vezane uz obnovljive izvore energije u kontekstu centraliziranih toplinskih sustava, s ciljem identificiranja ključnih smjernica za dekarbonizaciju i budući razvoj CTS-a. Na temelju tih podataka, istražene su mogućnosti modernizacije toplinskih podstanica s posebnim fokusom na konfiguracije koje uključuju različite temperaturne režime kao što su LTDH (*eng. Low-Temperature District Heating*), ULTDH (*eng. Ultra-Low-Temperature District Heating*) i NTDH (*eng. Neutral-Temperature District Heating*). Pored toga, provedena je usporedba navedenih konfiguracija s tehničkog i ekonomskog aspekta.

U okviru ekonomske analize korištena je metoda LCOH (*eng. Levelized Cost of Heat*), pri čemu su navedene relevantne formule i parametri za izračun troška isporučene toplinske energije. Analizirana su dva različita scenarija modernizacije s obzirom na promjene u zahtjevima za toplinskom energijom. Također, svaki scenarij sadrži dva slučaja s obzirom na pripremu potrošne tople vode u sklopu CTS-a. Na kraju rada, prikazani su dobiveni rezultati za analizirane scenarije modernizacije toplinskih podstanica, uzimajući u obzir tehničke, ekonomske i regulatorne aspekte.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustavi**,** temperaturni režimi, toplinske podstanice, nivelirani trošak topline, tehno-ekonomska analiza

SUMMARY

This paper examines centralized heating systems, explaining their role in the energy sector, their structure, and their main classification based on temperature regimes. Special emphasis is placed on all generations of district heating systems and different configurations of heating substations, as one of integral parts of these systems, with the aim of showing their evolution and modern trends in the heating sector.

The study analyses European Commission directives and regulations related to renewable energy sources in the context of district heating systems, aiming to identify key guidelines for decarbonization and the future development of district heating systems. Based on this data, the possibilities for the modernization of heating substations are explored, with a particular focus on configurations that include various temperature regimes, such as LTDH (Low-Temperature District Heating), ULTDH (Ultra-Low-Temperature District Heating), and NTDH (Neutral-Temperature District Heating). Additionally, a comparison of these configurations is conducted from both technical and economic perspectives.

In the economic analysis, the Levelized Cost of Heat (LCOH) method is used, presenting relevant formulas and parameters for calculating the cost of delivered thermal energy. Two different modernization scenarios are analysed concerning changes in heat energy demand. Furthermore, each scenario includes two cases regarding the preparation of domestic hot water within the district heating system. Finally, the results for the analysed modernization scenarios of heating substations are presented, considering technical, economic, and regulatory aspects.

Key words: district heating systems, temperature regimes, decentral substations, Levelized Cost of Heat, technoeconomic analysis

1. UVOD

1.1. Centralizirani toplinski sustavi

Centralizirani toplinski sustav (*eng. district heating, DH*) predstavlja mrežu za distribuciju toplinske energije iz centraliziranog izvora do krajnjih korisnika, pri čemu se koristi za zadovoljavanje toplinskih potreba stambenih objekata, obiteljskih kuća, komercijalnih prostora te industrijskih procesa. Izvori topline u takvim sustavima uključuju toplinske kotlovnice, kogeneracijska postrojenja na biomasu, dizalice topline, solarne kolektore i druge obnovljive izvore energije. Iako se toplinska energija u CTS-u tradicionalno dobiva izgaranjem fosilnih goriva, primjena obnovljivih izvora energije, poput drvne biomase ili komunalnog otpada, omogućuje učinkovitiju uporabu raspoložive energije. U usporedbi s decentraliziranim sustavima grijanja, CTS omogućuje veću energetsku učinkovitost i bolju kontrolu štetnih emisija. Tijekom posljednjih godina, centralizirani toplinski sustavi pokazali su se kao jedno od ekonomski najisplativijih rješenja za opskrbu toplinskom energijom.

Tradicionalne mreže centraliziranog toplinskog sustava distribuiraju toplinsku energiju ravnomjerno iz centralizirane stanice gdje se izmjenjuje toplinska energija do nekoliko udaljenih toplinskih podstanica. Prva generacija centraliziranih toplinskih sustava, uvedena krajem 19. stoljeća, koristila je vodenu paru kao prijenosnik topline te betonske cijevi kao distribucijski sustav. Zatim druga generacija centraliziranih toplinskih sustava, koji koriste visokotlačnu vruću vodu temperature iznad 100 °C, čelične cijevi s izolacijom te cijevne izmjenjivače topline na strani potrošača. Cilj ove nadogradnje bio je povećanje komfora krajnjih korisnika te ušteda goriva kroz primjenu kogeneracijskih postrojenja.

Tada se pojavila treća generacija centraliziranih toplinskih sustava, koja se odlikuje nižim radnim temperaturama. Ovi sustavi koriste vruću vodu pod tlakom kao medij prijenosa topline, dok se prethodno izolirane cijevi polažu pod zemlju radi smanjenja toplinskih gubitaka. Opskrbna temperatura vode u ovim sustavima iznosi približno 90 °C, što omogućuje povećanje energetske učinkovitosti sustava grijanja. Međutim, zbog relativno visoke temperature povratne vode (oko 50 °C), i dalje dolazi do značajnih toplinskih gubitaka te se značajan dio otpadne topline ne iskorištava u potpunosti.

Za daljnje smanjenje temperature grijanja i toplinskih gubitaka sustava, dolazi se do četvrte generacije centraliziranih toplinskih sustava, poznatih i kao sustavi daljinskog grijanja niske temperature. U usporedbi s prethodne tri generacije, temperatura polazne vode u sustavima

četvrte generacije može se smanjiti na 70 °C ili čak na 50 °C, što značajno smanjuje toplinske gubitke te dovodi do povećanja energetske učinkovitosti sustava grijanja.

Osim povećane energetske učinkovitosti, četvrta generacija donosi i veću raznolikost izvora topline. Ova generacija omogućuje iskorištavanje otpadne topline iz industrijskih procesa, elektrana na biomasu te kogeneracije spaljivanjem otpada. Također se u ove sustave integriraju i obnovljivi izvori topline poput geotermalne energije te solarne toplinske energije. Ipak, unatoč brojnim prednostima, sustavi četvrte generacije također imaju određena ograničenja. Naime, ne mogu se koristiti izvori topline nižeg stupnja kao što su izvori topline iz okoline, otpadna toplina podatkovnog centra, itd.

Kako bi se dodatno smanjila temperatura polazne vode, smanjili toplinski gubici sustava, omogućilo učinkovito iskorištavanje izvora nisko-temperaturne topline te zadovoljila potreba korisnika za grijanjem, posljednjih je godina uveden pojam pete generacije centraliziranih toplinskih sustava, poznatog i kao sustav ultra-nisko-temperaturnog daljinskog grijanja. U ovim sustavima temperatura polazne vode je niža od 50 °C, dok se temperatura povratne vode može spustiti čak na 25 °C.

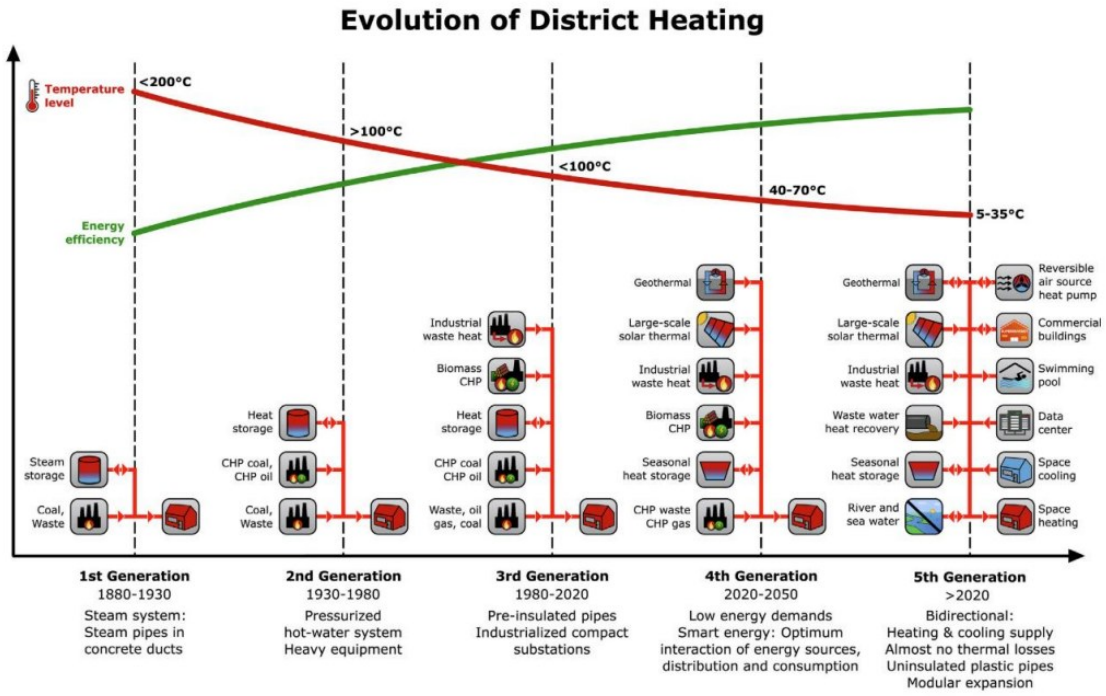
Osnovna razlika između sustava pete generacije i sustava četvrte generacije nije samo u nižim temperaturama polaza i povrata, već i u načinu zagrijavanja vode za grijanje. U petoj generaciji, prije nego što dođe do krajnjeg korisnika, voda se dodatno zagrijava pomoću dizalice topline (*eng. heat pump, HP*), dok se u sustavima četvrte generacije polazna voda koristi izravno za grijanje prostora bez dodatnog zagrijavanja. Ovakav pristup minimizira toplinske gubitke do te mjere da nije nužna toplinska izolacija cjevovoda, budući da temperatura vode u mreži ostaje blizu temperature okoline.

Dodatna prednost ovog sustava je njegova multi-funkcionalnost – koristi samo jednu toplu i jednu hladnu cijev te omogućuje istovremenu distribuciju toplinske i rashladne energije zahvaljujući svojoj jedinstvenoj strukturi sa dobrom regulacijom. Osim za grijanje tijekom zimskih mjeseci, isti sustav može služiti i za hlađenje tijekom ljeta, pri čemu se višak topline odvodi pomoću rashladnih tornjeva i drugih rashladnih uređaja.

Važno je napomenuti da je peta generacija sustava daljinskog grijanja usko povezana s tehnologijom dizalica topline. Dizalica topline koje se koriste u toplinskim stanicama, izvora zrak/voda/tlo mogu se koristiti za opskrbu sustava grijanjem i hlađenjem u situacijama kada nisu dostupni drugi izvori nisko-temperaturne otpadne topline.

Toplinske stanice mogu se fleksibilno postaviti unutar pojedinačnih kućanstava, skupina kućanstava ili zgrada, ovisno o potrebama korisnika. Osim toga, sustavi ultra-nisko-temperaturnog daljinskog grijanja omogućuju korištenje šireg spektra izvora topline, uključujući niskokvalitetne izvore poput otpadne topline podatkovnih centara ili postrojenja sa kotlovima, koji nakon podizanja temperature pomoću dizalice topline mogu biti potpuno iskorišteni.

Na slici 1 prikazana je evolucija CTS-a po generacijama, gdje se jasno može uočiti tranzicije prema održivijim i tehnološki naprednijim rješenjima koja su usmjerena na smanjenje toplinskih gubitaka i bolje iskorištavanje lokalnih izvora energije.



Slika 1 *Evolucija sustava centraliziranog grijanja [1]*

1.2. Temperaturni režimi centraliziranih toplinskih sustava

Polazne temperature u mreži nisko-temperaturnih sustava grijanja (*eng. Low Temperature District Heating, LTDH*) obično se kreću u rasponu od 55 do 70°C. Ove temperature su zadovoljavajuće za potrebe grijanja prostora, a u većini slučaja i za pripremu potrošne tople vode. Kako bi se učinkovito omogućila priprema potrošne tople vode pri ovim temperaturama, u podstanicama krajnjih korisnika najčešće se koriste izmjenjivači topline i spremnici topline

na primarnoj strani. Takvo rješenje omogućuje visoku učinkovitost prijenosa topline, uz minimalne toplinske gubitke.

Ultra-nisko-temperaturni sustavi grijanja (*eng. Ultra-Low Temperature District Heating, ULTDH*) dodatno smanjuju opskrbne temperature mreže na vrijednosti do 50°C. Iako su ove temperature dovoljno visoke za zadovoljenje potreba za grijanjem prostora, izazov se javlja kod pripreme potrošne tople vode. Pri tako niskim temperaturama postoji rizik od razvoja bakterije Legionella, što zahtijeva dodatne mjere za povećanje temperature vode na siguran nivo.

Za povećanje temperature vode u ULDTH sustavima koriste se različite tehnologije, uključujući dizalice topline, električne grijače, solarne kolektore i kotlove. Svaka od ovih tehnologija ima svoje prednosti i optimalna je za specifične primjene, ovisno o dostupnosti lokalnih izvora energije i energetskim zahtjevima korisnika. Kombinacija tih rješenja omogućuje ne samo sigurnu pripremu potrošne tople vode, već i povećanje ukupne energetske učinkovitosti sustava.

Neutralno-temperaturni sustavi grijanja (*eng. Neutral Temperature District Heating, NTDH*) karakteriziraju izrazito niske radne temperature, do 35 °C. Ovakve temperature nisu u većini slučaja dovoljne za izravno grijanje prostora niti za pripremu potrošne tople vode. Kako bi se potrebe zadovoljile, svaka podstanica opremljena je dizalicama topline koje podižu temperaturu na željenu razinu, ovisno o zahtjevima korisnika. Uz mogućnost podizanja temperature, režim NTDH sustava nudi i dodatnu funkcionalnost hlađenja prostora, čime se osigurava višenamjenska uporaba sustava tijekom cijele godine.

Sustavi CTS-a evoluirali su tijekom vremena kako bi zadovoljili potrebe za većom energetskom učinkovitošću i smanjenjem toplinskih gubitaka. LTDH sustavi često se svrstavaju i četvrtu generaciju sustava CTS-a (*eng. fourth generation of district heating*, 4DH), dok se ULTDH i NTDH sustavi obično smatraju predstavnicima pete generacije (*eng. fifth generation of district heating*, 5DH) [2]. Svaka nova generacija donosi značajne pomake u tehnologiji, s jasnim trendom smanjenja opskrbnih temperatura i povećanja energetske učinkovitosti.

U budućim energetskim sustavima s visokim udjelom povremenih obnovljivih izvora energije (OIE), poput solarnih i vjetroelektrana, centralizirano grijanje će igrati ključnu ulogu u stabilizaciji energetskog sustava. To će biti ostvarivo kroz integraciju tehnologija za pretvorbu električne energije u toplinu, što omogućuje fleksibilno upravljanje potražnjom i optimalno iskorištavanje dostupne energije. Takve tehnologije doprinijet će uravnoteženju proizvodnje i potrošnje energije u mreži, posebno tijekom razdoblja viška električne energije.

Dizalice topline predstavljaju ključnu komponentu u temperaturnim režimima pete generacije iz nekoliko razloga. Prvo, smanjenjem opskrbne temperature u toplinskoj mreži povećava se njihov koeficijent učinkovitosti (*eng. coefficient of performance, COP*). Drugo, one omogućuju povezivanje sektora električne energije i grijanja. Treće, integracijom s toplinskim spremnicima, dizalice topline povećavaju fleksibilnost sustava i osiguravaju nesmetano funkcioniranje sustava centraliziranog grijanja.

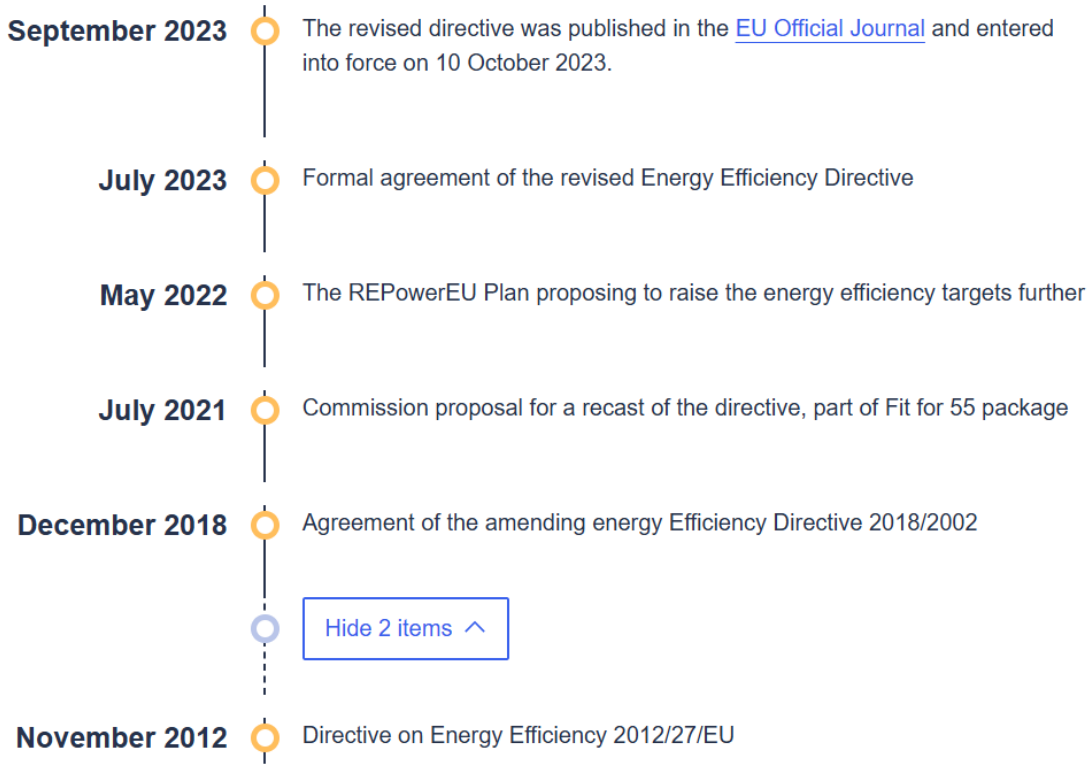
Međutim, nisko-temperaturni sustavi centraliziranog grijanja imaju manju temperaturnu razliku između polaznih i povratnih vodova, što povećava potrebu za većim ulaganjima i povećanim operativnim troškovima pumpi zbog veće količine protoka potrebnog za prijenos iste količine topline. Također, prilikom razvoja ULTDH i NTDH mreža treba razmotriti dodatne faktore, poput ulaganja u podstanice i decentralizirane tehnologije za povećanje temperature. [1]

2. PREGLED DIREKTIVA EUROPSKE KOMISIJE

2.1. Direktiva o energetskoj učinkovitosti

Europska unija usmjerava energetsku tranziciju kroz Direktivu o energetskoj učinkovitosti, ključni dokument za smanjenje potrošnje energije i postizanje klimatskih ciljeva. Revidirana Direktiva (EU/2023/1791) naglašava načelo o važnosti energetske učinkovitosti, obvezujući države članice na prioritetno uključivanje mjera energetske učinkovitosti u političke odluke i investicijske projekte.

Na slici 2 se nalazi vremenska crta događaja gdje su donošene odluke vezane za izmjene i dopune Direktive.



Slika 2 *Vremenska crta Direktive o energetskoj učinkovitosti [3]*

Komisija je izdala niz preporuka, organiziranih u devet dokumenata sa smjernicama, kako bi olakšala državama članicama EU-a prilagodbu svojih nacionalnih zakonodavstava prema zahtjevima revidirane Direktive [4]. Operateri DHC sustava mogu biti privatne ili javne tvrtke koje upravljaju infrastrukturom i osiguravaju distribuciju toplinske energije, dok se zgrade i lokacije definiraju prema zakonodavnim okvirima EU-a.

2.1.1. Ciljevi potrošnje i uštede energije

Revidirana Direktiva iz 2023. postavlja ambicioznije ciljeve energetske učinkovitosti, obvezujući EU na smanjenje potrošnje energije za 11,7 % do 2030. u odnosu na projekcije iz 2020. Kako bi se to postiglo, primarna potrošnja energije ne smije premašiti 992,5 Mtoe (*Millions tonnes of oil equivalent)*, a finalna 763 Mtoe. Ključna izmjena je povećanje godišnjih obveza uštede energije, s naglaskom na zgrade, industriju i prijevoz. Države članice moraju osigurati postupno povećanje godišnjih ušteda krajnje potrošnje energije, dosežući 1,9 % u razdoblju 2028.–2030., čime se jača energetska učinkovitost i smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima. [5]

2.1.2. Opskrba grijanjem i hlađenjem

Revidirana Direktiva o energetskoj učinkovitosti iz 2023. postavlja strože zahtjeve za sustave daljinskog grijanja i hlađenja kako bi omogućila potpunu dekarbonizaciju do 2050. godine. Fokus je na većoj integraciji obnovljivih izvora energije, iskorištavanju otpadne topline te povećanju primarne energetske učinkovitosti. Novi standardi postupno se uvode do 2050., kada postaju obvezujući.

Podrška za kogeneracijske jedinice na prirodni plin bit će omogućena samo do 2030., nakon čega su zabranjena nova ulaganja u fosilna goriva. Također, države članice EU-a imat će obvezu poticati izradu lokalnih planova grijanja i hlađenja u većim općinama, posebice onima s populacijom većom od 45.000 stanovnika kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima i promicala održiva energetska rješenja.

Zahtjevi za održivost i učinkovitost sustava centraliziranog grijanja i hlađenja trebaju biti u potpunosti usklađeni s dugoročnim ciljevima klimatske politike, okolišnim standardima i strateškim prioritetima Europske unije.

Ključni cilj visoko učinkovitih sustava je unapređenje međusobne povezanosti s ostalim segmentima energetskog sustava, čime bi se optimizirala energetska učinkovitost i smanjili gubici energije. Poseban naglasak stavlja se na korištenje zgrada za akumulaciju topline ili hladnoće te iskorištavanje viškova topline iz komercijalnih objekata i podatkovnih centara u neposrednoj blizini.

Prvi vremenski rok koji slijedi vezano za izvore topline EDHC (*Efficient District Heating and Cooling*) sustava jest 31. prosinca 2027 te opisan je na način kako će EDHC sustavi trebat koristiti najmanje 50 % obnovljive energije, 50 % otpadne topline, 75 % kogenerirane topline ili 50 % kombinacije takve energije i topline. Nadalje, vremenski rok koji je će krenuti od 1.

siječnja 2035 traži da energetski učinkoviti sustavi daljinskog grijanja i hlađenja moraju koristiti najmanje 50 % obnovljivih izvora energije, 50 % otpadne topline ili kombinaciju od najmanje 50 % obnovljive energije i otpadne topline. Alternativno, sustav može osigurati da ukupni udio obnovljivih izvora energije, otpadne topline ili topline proizvedene visokoučinkovitom kogeneracijom iznosi najmanje 80 %, pri čemu udio obnovljivih izvora energije ili otpadne topline ne smije biti manji od 35 %. Zatim od 1. siječnja 2040. se postavlja da energetski učinkoviti sustavi daljinskog grijanja i hlađenja moraju koristiti najmanje 75 % obnovljivih izvora energije, 75 % otpadne topline ili kombinaciju od najmanje 75 % obnovljive energije i otpadne topline. Alternativno, sustav može osigurati da ukupni udio obnovljivih izvora energije, otpadne topline i topline proizvedene visokoučinkovitom kogeneracijom iznosi najmanje 95 %, pri čemu udio obnovljivih izvora energije ili otpadne topline ne smije biti manji od 35 %. Zadnji rok koji će krenut od 1. siječnja 2050. kaže da će se prihvatiti sustav koji koristi isključivo obnovljive izvore energije, isključivo otpadnu toplinu ili isključivo kombinaciju obnovljivih izvora energije i otpadne topline. [4]

2.2. Direktiva o obnovljivoj energiji

Direktiva o obnovljivim izvorima energije potiče razvoj čiste energije u EU kroz suradnju država članica. Od 2009. godine udio obnovljive energije značajno je porastao, dosegnuvši 24,5% u 2023., pri čemu prednjače Švedska, Finska i Danska [6].

Obnovljivi izvori ključni su za energetsku tranziciju unutar „Europskog zelenog plana“, smanjujući ovisnost o vanjskim dobavljačima. EU kontinuirano podiže ciljeve i razvija mjere za njihovu bolju integraciju u energetske sustave.

2.2.1. Preporuke i smjernice Europske komisije za grijanje i hlađenje

Revidirana Direktiva (EU) 2023/2413 postavlja ambicioznije ciljeve za obnovljive izvore energije, s naglaskom na sektor grijanja i hlađenja koji čini polovicu ukupne energetske potrošnje EU-a. Cilj je povećati udio obnovljivih izvora na najmanje 42,5 % do 2030., uz dodatni cilj od 45 %. [7]

Potrošnja energije za grijanje i hlađenje trenutno čini oko polovicu ukupne energetske potrošnje u Europskoj uniji, no napredak u korištenju obnovljivih izvora u ovom sektoru znatno je sporiji u usporedbi s energetskim sektorom koji proizvodi električnu energiju. Biomasa i dalje ima dominantnu ulogu u korištenju obnovljivih izvora za potrebe grijanja i hlađenja.

Uvedene su nove odredbe koje podupiru korištenje obnovljivih izvora energije u zgradarstvu i industriji, čime se nastoji dodatno unaprijediti energetska učinkovitost i dekarbonizacija ovih sektora [8]. Na slici 3 se nalaze bitni datumi u sklopu direktive o obnovljivoj energiji.

Slika 3 *Vremenska crta o obnovljivoj energiji [6]*

2.2.2. Vremenski okvir za obnovljivu energiju u EU

Revidirana Direktiva o obnovljivim izvorima energije odražava rastuće ambicije EU-a u energetskoj tranziciji. U srpnju 2021. Europska komisija predložila je povećanje cilja za udio obnovljive energije do 2030. s 32 % na 40 %. Nakon ruske invazije na Ukrajinu, taj cilj je dodatno povećan na 45 %, uz mjere za ubrzanje izdavanja dozvola za projekte obnovljivih izvora energije.

2.2.3. Nove mjere za daljnje korištenje obnovljivih izvora energije

Donesene su strože mjere za poticanje razvoja i šire primjene obnovljivih izvora, s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine i jačanja energetske sigurnosti EU-a.

Osim postavljanja ambicioznijih sektorskih ciljeva za obnovljive izvore u grijanju, hlađenju, prometu, industriji i zgradama, direktiva potiče elektrifikaciju i korištenje obnovljivih goriva, uključujući vodik, u sektorima gdje elektrifikacija još nije tehnički i ekonomski izvediva. Za ove teško elektrificirane sektore također su postavljeni novi obvezujući ciljevi za obnovljiva goriva ne biološkog podrijetla.

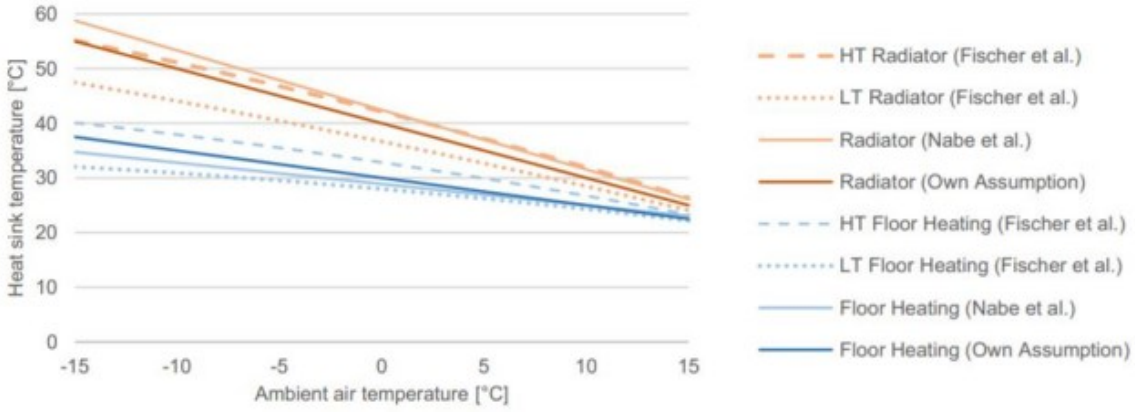
Kako bi se ubrzala provedba projekata, uvode se mjere za pojednostavljenje postupaka izdavanja dozvola, uključujući kraće rokove i uspostavu "Zona ubrzanja za obnovljive izvore". Također, pojačavaju se kriteriji održivosti za bioenergiju što predstavlja ključnu ulogu u postizanju cilja. [9]

3. TOPLINSKE PODSTANICE U CENTRALIZIRANIH TOPLINSKIH SUSTAVA

Toplinske podstanice predstavljaju jedan od integralnih elemenata u centraliziranim toplinskim sustavima te omogućuju potrebnu izmjenu topline i dodatno zagrijavanje vode kako bi se postigle tražene temperature potrebne za grijanje prostora te proizvodnju PTV-a. Za razliku od konvencionalnih sustava daljinskog grijanja, gdje toplinske podstanice sadrže isključivo izmjenjivače topline, u podstanicama ULTDH i NTDH sustavima potrebno je primijeniti dodatne uređaje za zagrijavanje zbog nižih radnih temperatura unutar mreže.

Tipično su ovi sustavi integrirani s zgradama viših energetskih svojstava, što rezultira smanjenim zahtjevima za radnu temperaturu, često ispod 40 °C, što je pogodno za nisko-temperaturne ogrjevne sustave, poput podnog grijanja. Nasuprot tome, proizvodnja PTV-a zahtijeva održavanje temperatura u rasponu od 60 do 65 °C. Ova razlika u temperaturnim zahtjevima predstavlja ključan izazov u dizajnu i primjeni toplinskih podstanica ULTDH i NTDH sustava, budući da se visoki temperaturni režimi ne mogu smanjiti, bez ugrožavanja zdravstvenih i sigurnosnih standarda.

Slika 4 prikazuje različite ogrjevne sustave i njihove temperaturne režime u ovisnosti o vanjskoj temperaturi. Prema odabiru ogrjevnog tijela za grijani prostor te njegovom temperaturnom režimu nužno je prilagoditi i sam temperaturni režim CTS-a.



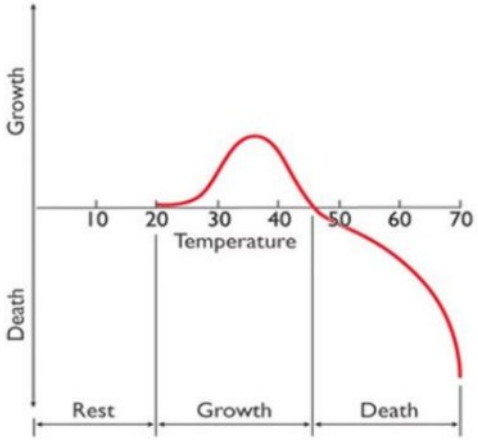
Slika 4 *Različiti temperaturni režimi grijanja prostora [10]*

3.1. Utjecaj bakterija na projektiranje toplinskih podstanica

Legionella je skupina gram-negativnih bakterija koje se razvijaju u vodi i vlažnim uvjetima, pri čemu predstavlja najvažniji čimbenik utjecaja na temperaturu vode prilikom pripreme potrošne tople vode. Optimalni raspon za rast ove bakterije je između 30 i 45 °C. Iako takvi uvjeti

pogoduju razvoju Legionella, istraživanja pokazuju da u 73% slučajeva do rasta ne dolazi zbog kratkog zadržavanja vode u sustavu. Zbog toga se instalacije ograničavaju na volumen od 3 litre bez cirkulacije.

Najkritičnije točke unutar sustava su dijelovi u kojima se miješaju hladna i topla voda, dok se prisutnost bakterije smanjuje s porastom temperature u ostalim segmentima [11]. Rast Legionella izravno je povezan s temperaturnim režimom sustava, pri čemu mlaka voda predstavlja najpovoljnije uvjete za njezin razvoj i treba je izbjegavati u svakom slučaju. Na slici 5 je prikazan utjecaj temperaturne raspodjele sustava na postojanost bakterija Legionella.



Slika 5 *Stope rasta/suzbijanja Legionella u funkciji temperature [1]*

Kao što je navedeno posebnu pažnju potrebno je posvetiti održavanju visokih temperatura u sustavima PTV, što je imperativ zbog sprječavanja rasta bakterije Legionella. Ovakav izazov prikazuje složenost suvremenih sustava daljinskog grijanja, gdje se tehnološke inovacije moraju uskladiti s rigoroznim zdravstvenim standardima.

S ciljem smanjenja operativnih troškova sustava za zagrijavanje PTV-a, moguće se je smanjiti temperaturu PTV-a, uz primjenu neke od metoda protiv Legionelle kako bi se izbjegao rizik od razvoja bakterije. U osnovi se primjenjuju dva pristupa: alternativne mogućnosti izvedbe sustava za proizvodnju PTV-a te primjena različitih metoda sterilizacije. Važno je napomenuti da su većina metoda sterilizacije vremenski ograničene zbog rizika od potencijalne kontaminacije. [12]

3.1.1. Alternativne mogućnosti izvedbe sustava proizvodnje PTV-a

Prema iznesenim smjernicama, postoje određene opće preporuke koje se mogu primijeniti:

- Istraživanja pokazuju da bakrene cijevi imaju superiorna svojstva u odnosu na PEX cijevi.
- Sustavi s grijačima pokazuju manju razinu kontaminacije u usporedbi sa sustavima koji koriste spremnike za vodu.
- Vertikalno postavljeni spremnici su podložniji razvoju Legionella u odnosu na horizontalno postavljene spremnike [1].

Decentralizirane podstanice

Decentralizirane podstanice značajno smanjuju potrebnu količinu opreme u sustavu za pripremu potrošne tople vode, što predstavlja izuzetnu prednost u višekatnim objektima gdje bi konvencionalna rješenja zahtijevala veće instalacije. Ovakav dizajn omogućuje krajnjim korisnicima samostalno podešavanje temperature i toplinske potražnje, čime se postiže veća fleksibilnost i prilagodljivost sustava specifičnim potrebama zgrade. Dodatno, primjena decentraliziranih podstanica eliminira potrebu za implementacijom cirkulacijskog kruga, čime se dodatno pojednostavljuje konstrukcija sustava i može doprinijeti smanjenju operativnih troškova. Takav pristup ne samo da optimizira prostor, već i poboljšava učinkovitost i prilagodljivost sustava u kontekstu modernih zahtjeva za energetskom učinkovitošću i sigurnošću.

Primjena dizalica topline

Primjena dizalica topline u toplinskim podstanicama omogućuje lokalno povećanje temperature, čime se postiže željeni temperaturni režim u određenim dijelovima sustava. Izvor topline za rad dizalice može biti kako dovod, tako i povrat toplinske vode, što otvara mogućnost fleksibilnije integracije u postojeće sustave daljinskog grijanja.

Posebnu pažnju treba posvetiti odabiru idealne lokacije unutar zgrade za smještaj dizalica topline, jer položaj značajno utječe na performanse sustava, energetsku učinkovitost i operativne troškove.

Električni grijači

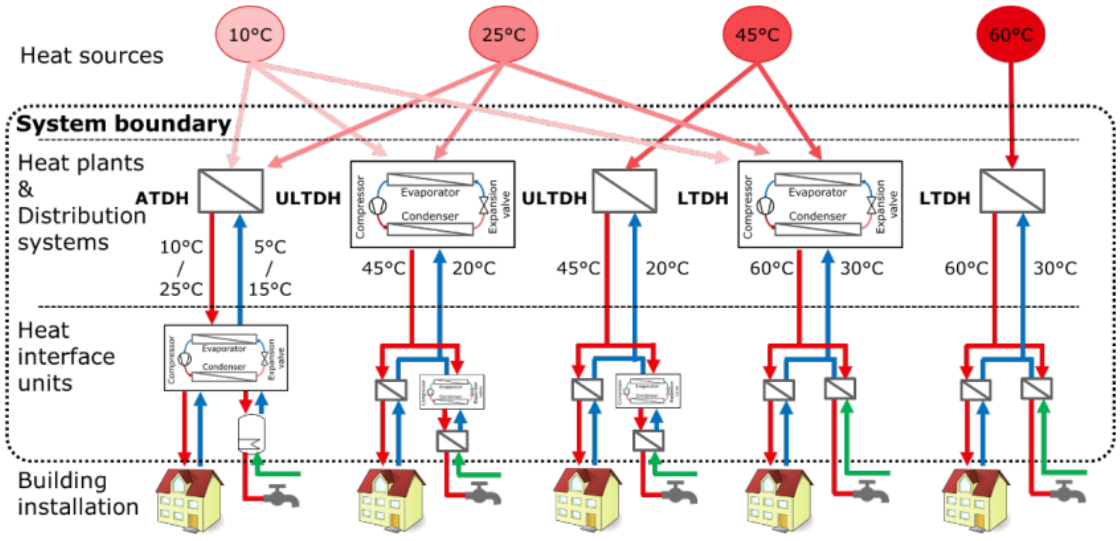
Predstavlja jednostavnije rješenje u usporedbi s dizalicom topline, no zbog niže energetske učinkovitosti rezultira većim operativnim troškovima. Može biti integriran unutar spremnika toplinske vode ili instaliran kao zasebna jedinica, ovisno o specifičnim zahtjevima sustava.

Električno grijanje cijevi sastoji se od grijaćeg elementa omotanog oko cijevi za potrošnu toplu vodu, omogućujući selektivno zagrijavanje vode kada je to potrebno. Ova metoda pruža visoku fleksibilnost jer se može primijeniti na cijeli volumen vode u sustavu ili samo na određene segmente, ovisno o zahtjevima instalacije.

Ovi zaključci potiču razvoj alternativnih dizajna sustava za pripremu PTV-a, čime se nastoji minimizirati rizik od bakterijske kontaminacije, uz istovremeno osiguravanje potrebnih temperaturnih režima za sigurnu uporabu. Takav pristup omogućuje integraciju inovativnih rješenja u kontekstu postojećih sustava, čime se doprinosi unaprjeđenju sigurnosti i učinkovitosti daljinskih sustava grijanja te same pripreme potrošne tople vode. [1]

3.2. Usporedba različitih temperaturnih režima

Referencirajući se na opisane temperaturne režime u prijašnjim odlomcima, slika 6 prikazuje različite kombinacije rada režima. Također se može vidjeti iz slike gdje je potrebna primjena dizalice topline iz prijašnje definiranih razloga. U prikazanoj shemi ATDH (*eng. ambient temperature district heating*) odgovara istim radnim temperaturama kao što već opisano u radu za NTDH.



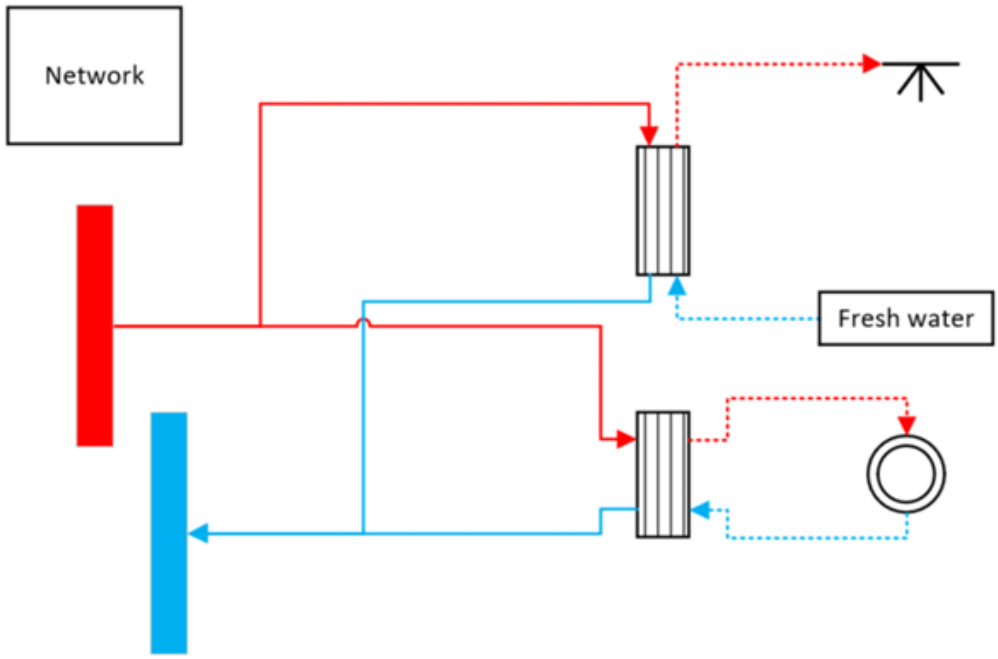
Slika 6 *Shema rada NTDH, ULTDH i LTDH temperaturnih režima [13]*

3.3. LTDH toplinske podstanice

Daljinsko grijanje LTDH temperaturnih režima osigurava pouzdanu opskrbu, jer korisnici ne moraju brinuti o održavanju, opskrbi gorivom i optimalnom radu sustava grijanja. Kod niskotemperaturne priprema potrošne tople vode, sustavi bez skladištenja i cijevi male zapremnine mogu omogućiti sigurnu upotrebu potrošne tople vode pri temperaturama oko 60°C, smanjujući rizik od rasta Legionella bez potrebe za višim temperaturama. Nadalje, poduzeća ostvaruju koristi kroz niže gubitke topline u mrežama LTDH daljinskog grijanja, a mogu koristiti plastične cijevi koje su isplativije od tradicionalnih metalnih cijevi.

S ekonomskog stajališta, korištenje obnovljivih ili viška toplinske energije može pružiti veću stabilnost cijena i smanjenu ovisnost o uvoznim gorivima. Visoka učinkovitost sustava s niskotemperaturnim daljinskim grijanjem dovodi do smanjenja potrošnje resursa i nižih troškova goriva, što također doprinosi stabilnosti cijena i mogućnosti pružanja konkurentnih cijena grijanja.

Na slici 7 je prikazana izvedba toplinske podstanice u slučaju LTDH temperaturnog režima koji će biti korišten u svrhu provedbe ekonomske analize ovog rada.



Slika 7 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za LTDH [1]*

3.4. ULTDH toplinske podstanice

ULTDH sustavi prilagođeni su nisko-temperaturnom grijanju prostora, poput podnog grijanja, no njihove temperature nisu dovoljne za učinkovitu pripremu potrošne tople vode. Zbog toga je nužno da svaka ULTDH podstanica sadrži dodatnu tehnologiju za povećanje temperature vode, čime se osiguravaju uvjeti koji sprječavaju razvoj bakterije Legionella. Ovaj aspekt dizajna ULTDH podstanica čini ih složenijima te time povećava početna ulaganja zbog dodatnih komponenti sustava. [14]

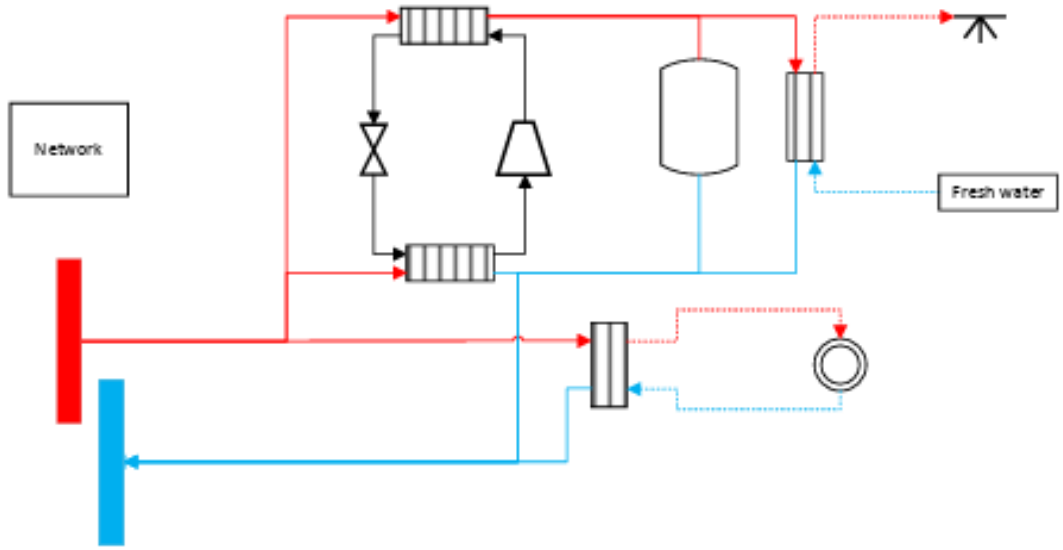
Četiri najčešće implementirane varijante toplinskih podstanica su:

1. Sustav s dizalicom topline i spremnikom topline.
2. Sustav s mikro dizalicom topline.
3. Sustav s dizalicom topline zrak-voda.
4. Sustav s dodatnim kotlom (električni, plinski ili na biomasu). [1]

Bez obzira na odabrano rješenje, zajedničke karakteristike ovih sustava uključuju mogućnost izravnog grijanja prostora putem izmjenjivača topline, dok se za pripremu PTV-a koristi dodatni uređaj za povećanje temperature. Najjednostavnija opcija je električni grijač, dok je dizalica topline naprednije, ali i učinkovitije rješenje. Osim toga, ULTDH podstanice omogućuju dvosmjernu razmjenu energije s toplinskom mrežom, no ta mogućnost je ograničena i ovisi o specifičnom dizajnu sustava.

Razvoj ULTDH podstanica kontinuirano je predmet istraživanja, s ciljem optimizacije dizajna i smanjenja troškova implementacije. Iako ova tehnologija nudi fleksibilnost i prilagodbu potrošačima, njena uspješna primjena zahtijeva pažljivu analizu tehničkih i ekonomskih čimbenika.

Na slici 8 je prikazan način izvedbe toplinske podstanice sa integriranim dodatnim zagrijavanjem (*eng. heat booster station, HBS*). Primjena je u prostorima gdje je potreban dovod toplinske energije za potrebe grijanja i potrošne tople vode. Dizalica topline je namijenjena za pokrivanje toplinskih potreba recirkulacija PTV-a. Također može se vidjeti kako se prijenos toplinske energije za potrebe grijanje prostora odvija pomoću izmjenjivača topline, što je pogodno u slučaju integriranog podnog grijanja u objektima, koje zahtjeva nisko-temperaturni način grijanja prostora.



Slika 8 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za ULTDH [1]*

3.5. NTDH toplinske podstanice

Podstanice nisko-temperaturnih distribucijskih toplinskih mreža moraju osigurati učinkovito podizanje temperature kako bi zadovoljile potrebe za grijanjem prostora i pripremom potrošne tople vode. Budući da temperaturni režimi unutar NTDH mreža nisu dovoljno visoki za izravnu opskrbu toplinskom energijom, u podstanicama se primjenjuju različite tehnologije za povišenje temperature, pri čemu su dizalice topline voda-voda (*eng. Booster Heat Pump*) najčešće rješenje.

Osim grijanja i pripreme tople vode, NTDH sustavi mogu omogućiti i hlađenje prostora, što je važno pri projektiranju podstanica radi fleksibilnosti sustava. Ovisno o izvedbi, hlađenje se može ostvariti izravno putem izmjenjivača topline priključenog na hladnu cijev ili korištenjem dizalice topline koja koristi toplinsku mrežu kao toplinski izvor.

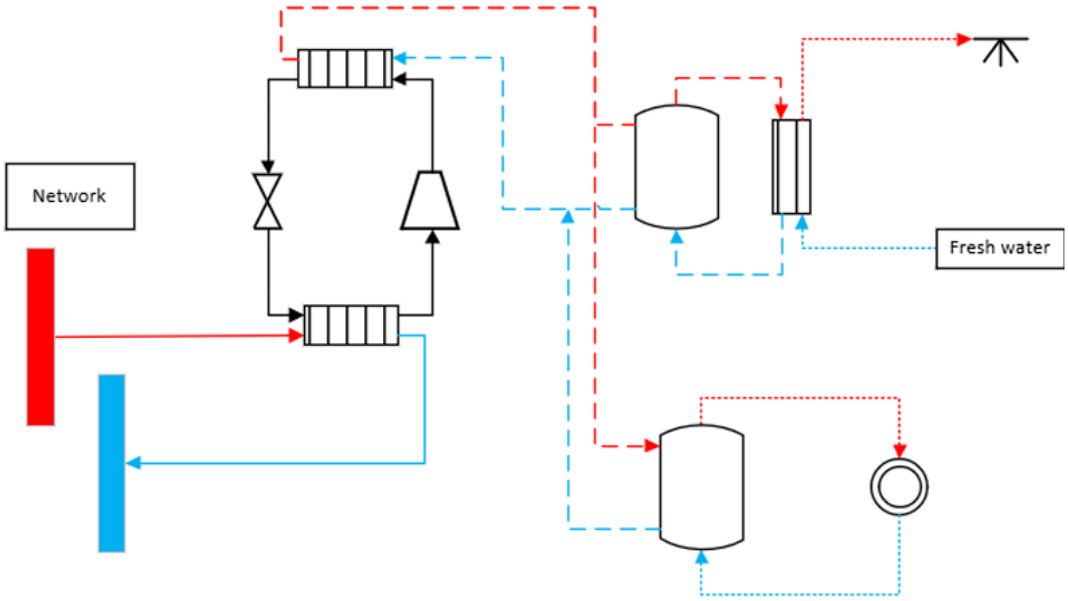
Postoje tri najčešće konfiguracije podstanica u NTDH sustavima:

1. Dizalica topline voda-voda izravno spojena na toplinsku mrežu osigurava grijanje i hlađenje kroz istu jedinicu.
2. Podstanica s dodatnim izmjenjivačem topline između toplinske mreže i dizalice topline omogućuje bolju kontrolu prijenosa topline i povećava sigurnost sustava.
3. Složena izvedba s dvama trosmjernim preklopnim ventilima u primarnom krugu omogućuje odvojeno ispuštanje toplije vode u toplu cijev i ohlađene vode u hladnu cijev, čime se sprječava toplinsko miješanje unutar mreže i povećava energetska učinkovitost.

Iako se ova rješenja razlikuju u tehničkoj izvedbi, dijele nekoliko zajedničkih obilježja:

- NTDH mreže u slučaju konvencionalne izvedbe grijanih prostora ne mogu izravno osigurati toplinske potrebe korisnika, stoga se koristi tehnologija povišenja temperature, najčešće putem dizalica topline.
- Podstanice su većinom temeljene na voda-voda dizalice topline koje, zahvaljujući malim temperaturnim razlikama između izvora topline i korisnika, postižu visoke koeficijente učinkovitosti.
- Složenost sustava podiže početne investicijske troškove.
- Upravljanje i održavanje sustava zahtijeva visoku razinu stručnosti, stoga odgovornost za rad podstanica u pravilu preuzima operater toplinske mreže.
- Unatoč visokim investicijskim troškovima, dugoročno su operativni troškovi niski zbog visoke učinkovitosti dizalice topline.
- Omogućuje hlađenje prostora ljeti što omogućuje fleksibilnost sustava

Na slici 9 je prikazan primjer izvedbe toplinske podstanice u NTDH načinu daljinskog grijanja. Takva izvedba omogućuje pokrivanje potrebe potrošne tople vode te grijanja i hlađenja prostora pomoću korištenja dizalice topline voda-voda kao izvora NTDH režima daljinskog grijanja. [1]



Slika 9 *Primjer izvedbe toplinske podstanice za NTDH [1]*

Također u izvedbu je integriran spremnik za PTV te akumulacijski spremnik za opskrbu potreba grijanja i hlađenja. Ugradnja recirkulacijske mreže na strani dovoda iz centralne mreže pomoću

ventila TV omogućuje prilagodbu različite temperature mreže operativnim granicama dizalice topline. Osim toga, ključno je korištenje reverzibilne dizalice topline kako bi se omogućio rad podstanice u načinu hlađenja što uključuje određena tehnička ograničenja u dvocijevnim mrežama, ali s druge strane predstavlja ključan aspekt za fleksibilnost i prilagodljivost dizajna sustava. [15]

3.6. Integracija dizalica topline u ULTDH i NTDH toplinske podstanice

Kao što je rečeno, sustavi daljinskog grijanja ultra-niskih temperatura i neutralnih temperatura rade s niskim temperaturama, što je nedovoljno za izravno grijanje krajnjih korisnika. Kako bi se omogućilo grijanje prostora i priprema potrošne tople vode, dizalice topline koriste mrežu daljinskog grijanja kao izvor topline.

Dizalice topline su dobro istražena i široko primijenjena tehnologija, posebice u sustavima koji koriste zrak, podzemne vode i plitke geotermalne izvore topline. Međutim, njihova primjena u mrežama daljinskog grijanja ultra-niskih temperatura i neutralnih temperatura predstavlja nov izazov.

U takvim mrežama one rade u uvjetima koji se razlikuju od standardnih izvora topline, pri čemu se mijenjaju i ulazne temperature te temperaturni raspon. Korištenje standardnih dizalica topline u ULTDH i NTDH sustavima s izvorima temperature iznad 10 °C te analiza njihove učinkovitosti i ograničenja još su uvijek relativno nova istraživačka područja.

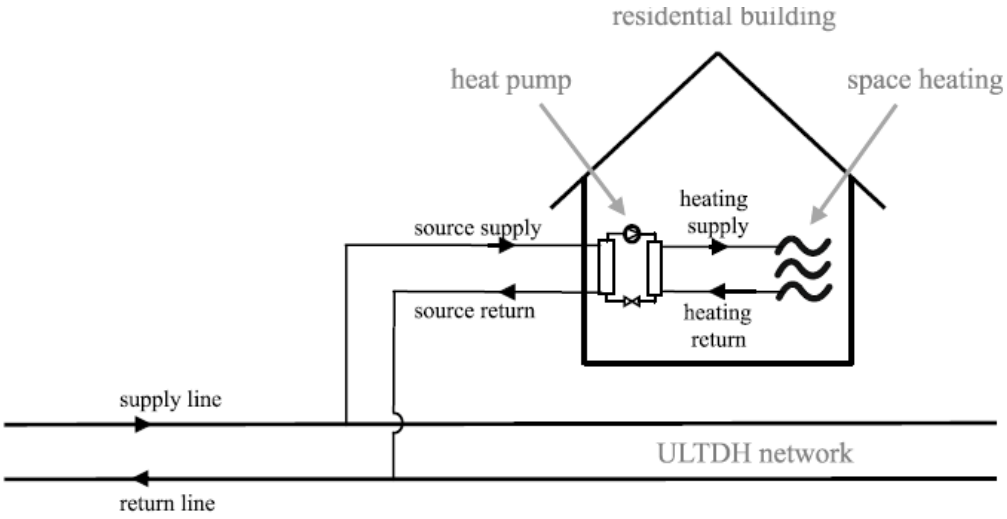
Prikupljeni podaci mogu pridonijeti boljoj procjeni performansi dizalica topline kada se uvjeti rada u ULTDH i NTDH mrežama razlikuju od standardnih testnih parametara, čime se omogućuje njihova optimalna prilagodba i poboljšanje energetske učinkovitosti sustava.

Standardne dizalice topline obično su projektirane za rad pri ulaznim temperaturama izvora između 0 °C i 10 °C. No, ULTDH i NTDH mreže mogu raditi s višim temperaturama koristeći otpadnu toplinu i solarnu energiju kao izvore topline.

Povezivanje dizalice topline s mrežom daljinskog grijanja prikazano je na slici 10. Voda kao medij za prijenos topline dolazi iz dovodne cijevi mreže daljinskog grijanja do ulaza izvora vanjskog izmjenjivača topline. Tu se hladi predajući toplinsku energiju radnom mediju unutar cirkulacijskog kruga dizalice topline i potom izlazi iz izmjenjivača te se vraća u povratni vod mreže daljinskog grijanja.

S unutarnje strane, drugi izmjenjivač topline (kondenzator) dizalice topline osigurava potrebnu temperaturu polaznog voda sustava grijanja. U grijanoj zgradi voda predaje toplinu putem radijatora ili drugih sustava distribucije topline, nakon čega se ohlađena vraća kroz povratni

vod sustava grijanja natrag u unutarnji izmjenjivač dizalice topline, gdje se ponovno zagrijava za nastavak ciklusa. [16]

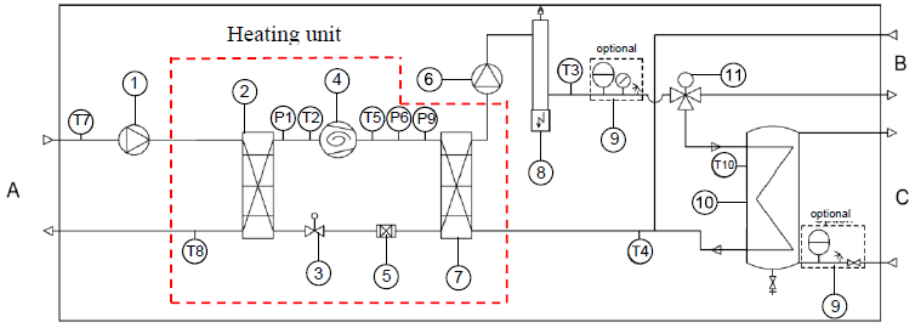


Slika 10 *Integracija dizalica topline u ULTDH i NTDH mreže [16]*

Slika 11 prikazuje hidrauličku shemu dizalice topline s ključnim komponentama i mjernim točkama. Sustav je opremljen spremnikom potrošne tople vode (10), koji omogućuje akumulaciju toplinske energije za potrebe PTV-a. Cirkulacijske pumpe izvora (1) i grijanja (6) s prilagodljivom brzinom rada osiguravaju potrebnu statičku razliku tlaka.

Regulacija rashladnog ciklusa ostvaruje se putem elektronički upravljanog ekspanzijskog ventila (3), koji precizno kontrolira tlak isparavanja i protok rashladnog sredstva kroz isparivač (2). Ključne komponente rashladnog kruga, uključujući isparivač (2), kompresor (4), ekspanzijski ventil (3) i kondenzator (7), čine integrirani rashladni modul (označen crvenom bojom na slici 11).

Radni režimi sustava omogućeni su pomoću trosmjernog preklopnog ventila (11), koji preusmjerava rad dizalice topline između načina rada grijanja i pripreme potrošne tople vode. U režimu grijanja, dizalica topline osigurava toplinsku energiju za grijanje prostora (B), dok se u režimu pripreme potrošne tople vode energija usmjerava prema spremniku tople vode (C). Cirkulacijska pumpa izvora upravlja protokom vode kroz primarni krug sustava (A), no njezina primjena nije nužna ako je sustav priključen na mrežu daljinskog grijanja s centraliziranim održavanjem tlaka.



1	Source circulating pump	7	Condenser
2	Evaporator	8	Electric heating element
3	Expansion valve	9	Safety group
4	Compressor	10	hot water storage tank
5	Filter	11	3-way switching valve
6	Heating circulation pump		
T7	Source inlet temperature	P6	Condensation pressure
T8	Source outlet temperature	P9	High pressure safety switch
P1	Evaporation pressure	T3	Heating flow temperature
T2	Compressor inlet temp.	T4	Heating return temperature
T5	Discharge gas temperature	T10	Domestic hot water temperature

Slika 11 *Hidraulička shema dizalice topline u toplinskoj podstanici [17]*

4. EKONOMSKA ANALIZA

Metoda niveliranog troška energije (*eng. Levelized cost of energy, LCOE*) široko se primjenjuje u tehno-ekonomskoj analizi kao alat za usporedbu troškova različitih tehnologija proizvodnje električne energije tijekom njihovog životnog vijeka. Prilagodbom LCOE metodologije za proizvodnju topline možemo izraziti nivelirani trošak topline (*eng. Levelized cost of heat, LCOH*).

Nivelirani trošak topline koristan je pokazatelj za procjenu isplativosti različitih sustava grijanja tijekom njihovog životnog vijeka. Određuje ekonomske isplativosti sustava grijanja, izražavajući prosječni trošak proizvedene topline u EUR/MWh. U izračun ulaze svi relevantni troškovi nastali tijekom životnog vijeka sustava, uključujući početna ulaganja (*eng. capital expenditures, CAPEX*), troškove rada i održavanja (*eng. operating expense, OPEX*), cijenu goriva te ostale operativne izdatke. Osim financijskog aspekta, analiza uzima u obzir i ukupnu količinu proizvedene topline, omogućujući realnu procjenu učinkovitosti. Primjenom ove metode mogu se precizno usporediti različite tehnologije grijanja, čime se olakšava donošenje odluka o najpovoljnijim rješenjima za dugoročnu održivost i optimizaciju troškova. U ovom slučaju razmatrat ćemo različite temperaturne režime (NTDH, ULTDH i LTDH) toplinske energije daljinskog grijanja.

Izračunava se kao omjer zbroja kapitalnih i operativnih troškova te ukupne godišnje potražnje za toplinom te je formula sljedeća:

$$LCOH = \frac{CAPEX + OPEX}{\dot{Q}_{tot}}, \qquad [€/MWh]$$

Kapitalni troškovi određuju se množenjem faktora povrata kapitala (*eng. capital recovery factor, CRF*) s investicijskim troškom određenog elementa mreže, poput dizalice topline. Faktor povrata kapitala koristi se za izračun sadašnje vrijednosti jednakih godišnjih uplata, koje u ovom kontekstu predstavljaju CAPEX. Vrijednost *n* označava očekivani vijek trajanja određenog dijela sustava (izražen u godinama), dok *i* predstavlja diskontnu stopu.

$$CAPEX = CRF * I = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} * I, \qquad [€]$$

Operativni troškovi sustava (poput mreže daljinskog grijanja) uključuju zbroj troškova rada i upravljanja (*eng. Operations and Maintenance, O&M*) te potrošnje električne energije i/ili plina. Ovi troškovi su kontinuirani tijekom godine i mogu se obračunavati na dnevnoj, tjednoj

ili godišnjoj razini. Troškovi O&M obuhvaćaju različite izdatke poput troškova inventara, popravaka, održavanja, potrošnje energije i plina u svim dijelovima mreže, plaće zaposlenika i druge operativne troškove.

$$OPEX = \sum_{i=1}^{N} O\&M_i + E_i + G_i \ , \qquad [€]$$

Ukupna godišnja potreba za toplinom za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode jednaka je zbroju topline potrebne za grijanje prostora i pripremu tople vode. Ovaj iznos također se može izračunati množenjem ukupne specifične godišnje potrošnje topline s ukupnom površinom zgrada u određenom području.

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{tot,DHW} + \dot{Q}_{tot,SH} \ , \qquad [MWh/a]$$

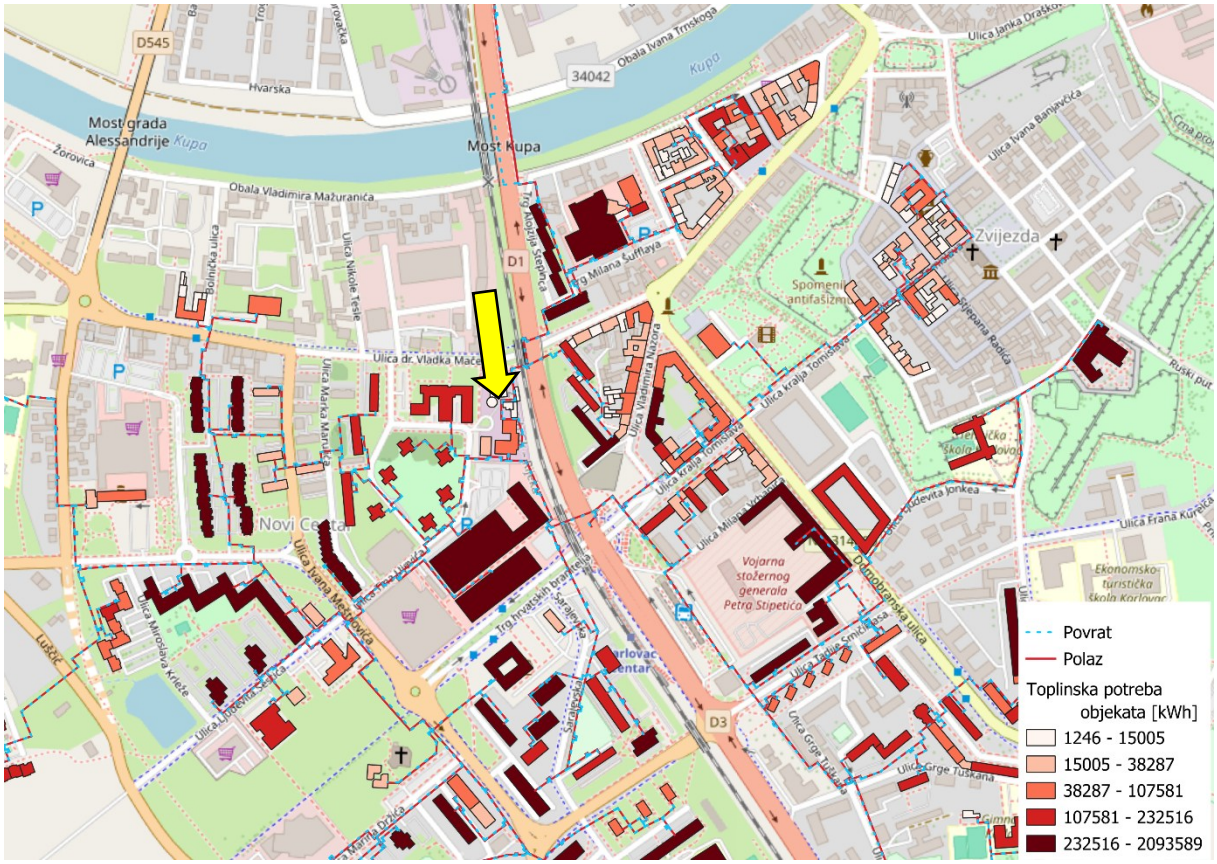
$$\dot{Q}_{tot} = q_{tot} * A_{buildings} \ , \qquad [MWh/a]$$

5. STUDIJA SLUČAJA – Grad Karlovac

Za proizvodnju, distribuciju i opskrbu toplinskom energijom u gradu Karlovcu odgovorna je tvrtka Gradska toplana Karlovac [18]. Ova tvrtka pruža usluge grijanja putem različitih sustava, uključujući centralizirane toplinske sustave (CTS), zatvorene toplinske sustave (ZTS) i samostalne toplinske sustave (STS). Cilj Gradske toplane Karlovac je pružiti kvalitetne usluge grijanja, osiguravajući istovremeno korištenje energije iz obnovljivih izvora, čime aktivno doprinosi ostvarenju ciljeva Europske unije u pogledu smanjenja emisija CO_2.

5.1. Kartografski prikaz

Kao studija slučaja za modernizaciju toplinskih podstanica unutar postojećeg centraliziranog toplinskog sustava odabran je grad Karlovac. Na slici 12 je prikazano područje pomoću geoinformacijskog alata QGIS, pri čemu su označene zgrade i kuće obuhvaćene analizom. Također, na karti su prikazane linije polaznog i povratnog voda, koje služe za prijenos toplinske energije prema različitim toplinskim stanicama, a potom i krajnjim korisnicima.

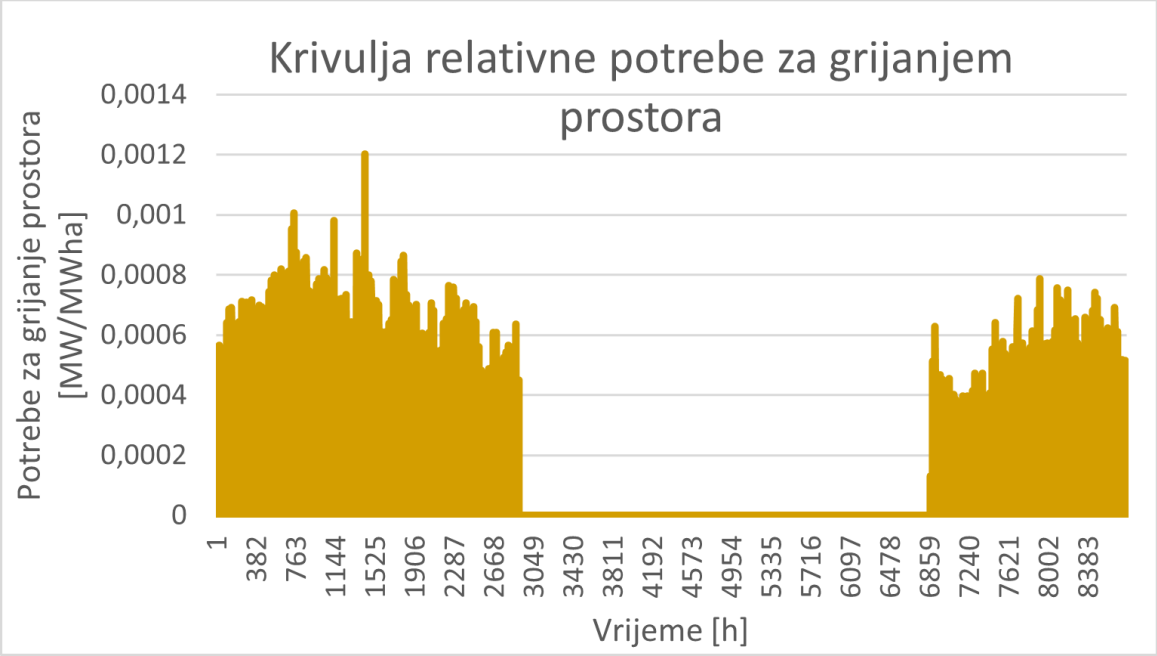


Slika 12 *Prikaz toplinske potrebe studije slučaja*

Slika također uključuje prikaz toplinskih potreba pojedinih objekata, čime se omogućuje precizna procjena ukupne potražnje za toplinskom energijom unutar analiziranog područja.

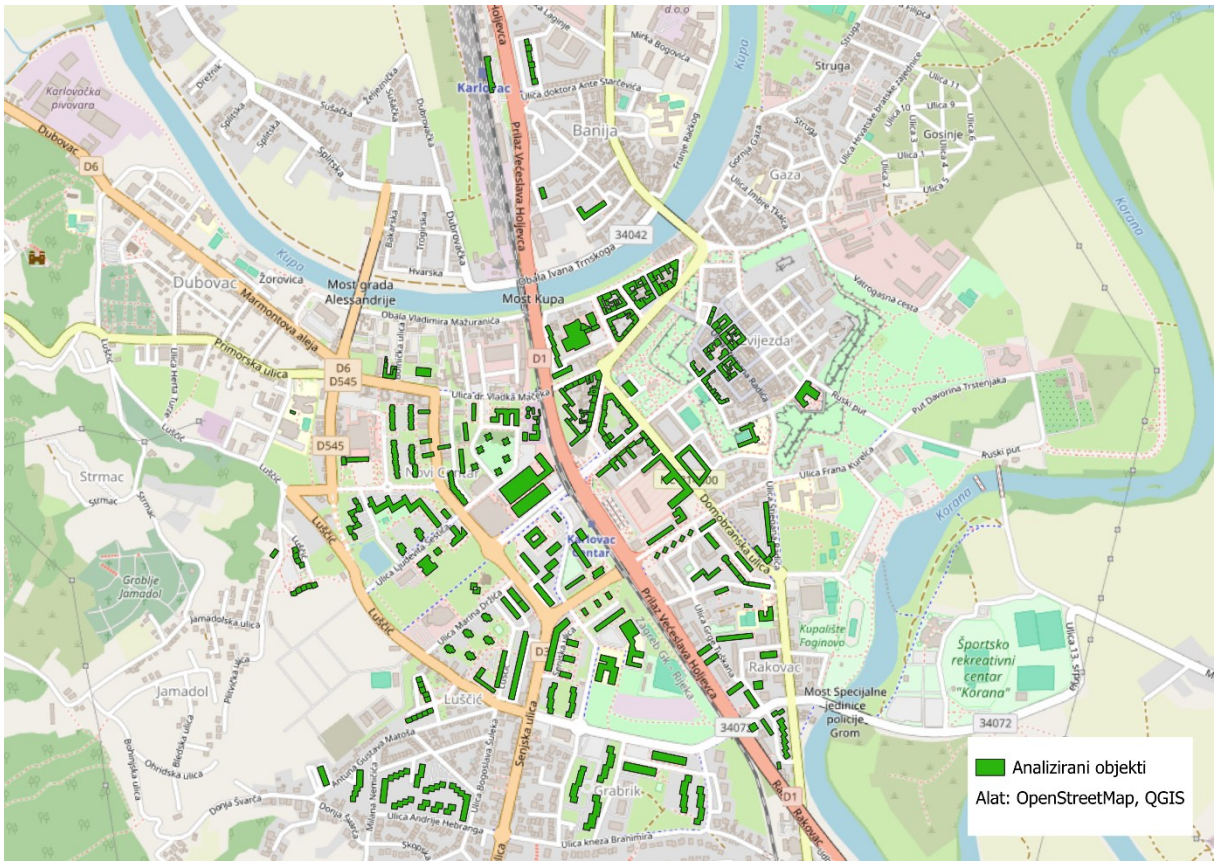
Centralizirani toplinski sustav na slici je označen simbolom strelice, a predstavlja objekt kojim upravlja tvrtka Gradska Toplana d.o.o., odgovorna za opskrbu grada Karlovca toplinskom energijom, kao što je prethodno navedeno.

Vezano na prikazanu sliku toplinskih potreba analiziranih objekata u studiji slučaja na slici 13 se nalazi krivulja relativne potrebe grijanja tih prostora unutar jedne godine.



Slika 13 *Krivulja relativne potrebe za grijanjem prostora*

Slika 14 predstavlja prikaz svih objekata u gradu Karlovcu koji su spojeni na toplinsku distribucijsku mrežu i koriste uslugu Gradske Toplane.



Slika 14 *Prikaz objekata studije slučaja*

U tablici 1 prikazane su ukupne površine i toplinske potrebe analiziranog kvarta u okviru ovog istraživanja. Površine objekata određene su korištenjem računalnog alata QGIS, koji je također korišten za izračun ukupne toplinske potrebe promatranih objekata. Specifična toplinska potreba daljinskog grijanja dobivena je omjerom ukupne toplinske potrebe i ukupne izračunate površine. Ukupna toplinska potreba određena je na temelju neto površine objekata pomnožene s prosječnom godišnjom toplinskom potrebom za grad Karlovac. Podaci potrebni za proračun preuzeti su iz izvora Energetskog instituta Hrvoje Požar [19].

Tablica 1 *Prikaz ukupne toplinske potrebe i površine*

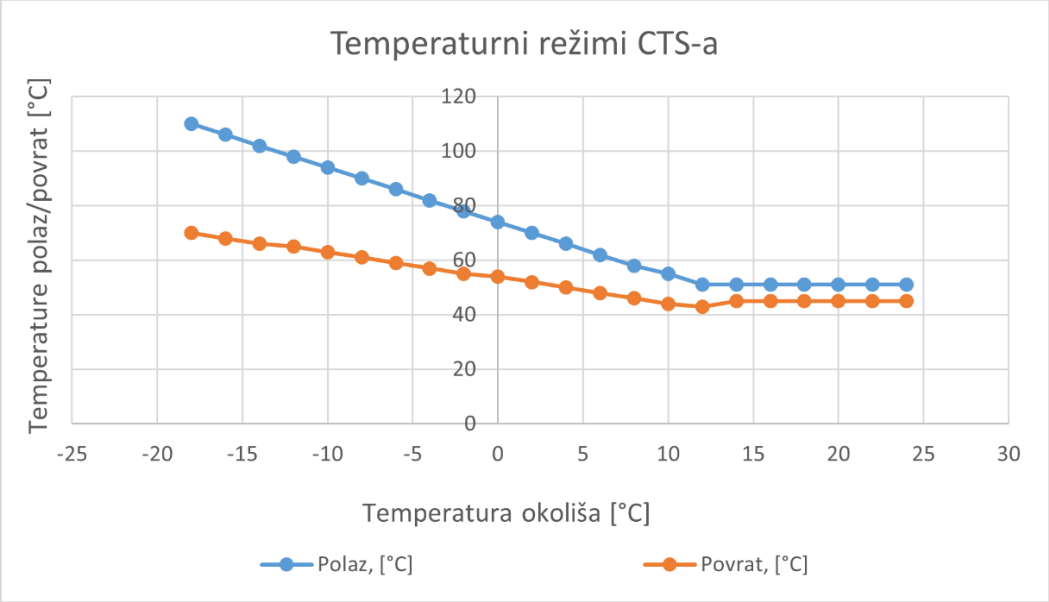
Naziv	Iznos	Mjerna jedinica
Ukupna toplinska potreba	48 539 064	kWh/a
Promatrana površina	587 351	m^2

5.2. Trenutno stanje CTS-a

Trenutno stanje temperaturnih režima u promatranom centraliziranom toplinskom sustavu grada Karlovca karakterizirano je visokim temperaturama polaznog i povratnog voda. Takav režim rada termodinamički je neučinkovit zbog značajnih toplinskih gubitaka.

Kako bi se smanjili gubici topline, postigle financijske uštede te doprinijelo zaštiti okoliša smanjenjem korištenja fosilnih goriva za proizvodnju električne energije, u ovoj analizi razmatraju se temperaturni režimi s nižim polaznim i povratnim temperaturama. Učinkovitost sustava pritom ovisi o integriranoj tehnologiji u sustav – bilo da je riječ o dizalici topline ili izmjenjivaču topline koji preuzima toplinsku energiju sa različitih toplinskih izvora. Iako su početna ulaganja u modernizaciju visoka, dugoročno smanjenje operativnih troškova i poboljšana energetska učinkovitost opravdavaju takve investicije.

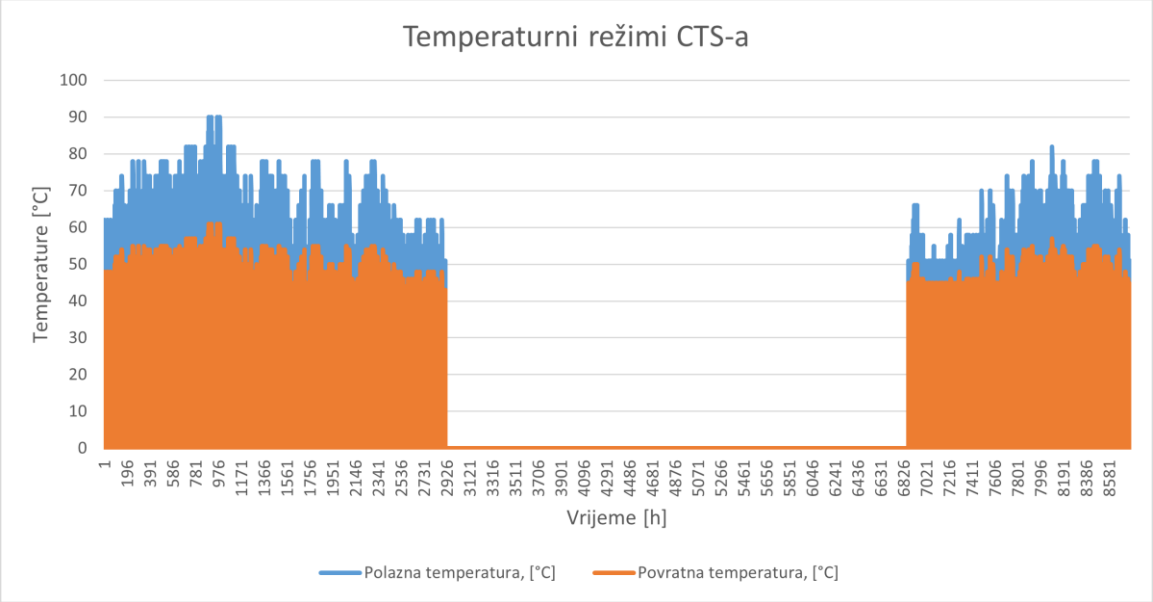
Na slici 15 prikazane su trenutno postojeće temperature polaznog i povratnog voda u CTS-u Karlovca, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi okoliša. Ovi podaci služe kao referentna osnova za usporedbu s optimiziranim režimima rada koji će biti analizirani u nastavku.



Slika 15 *Postojeći temperaturni režimi CTS-a grada Karlovca u ovisnosti o vanjskoj temperaturi*

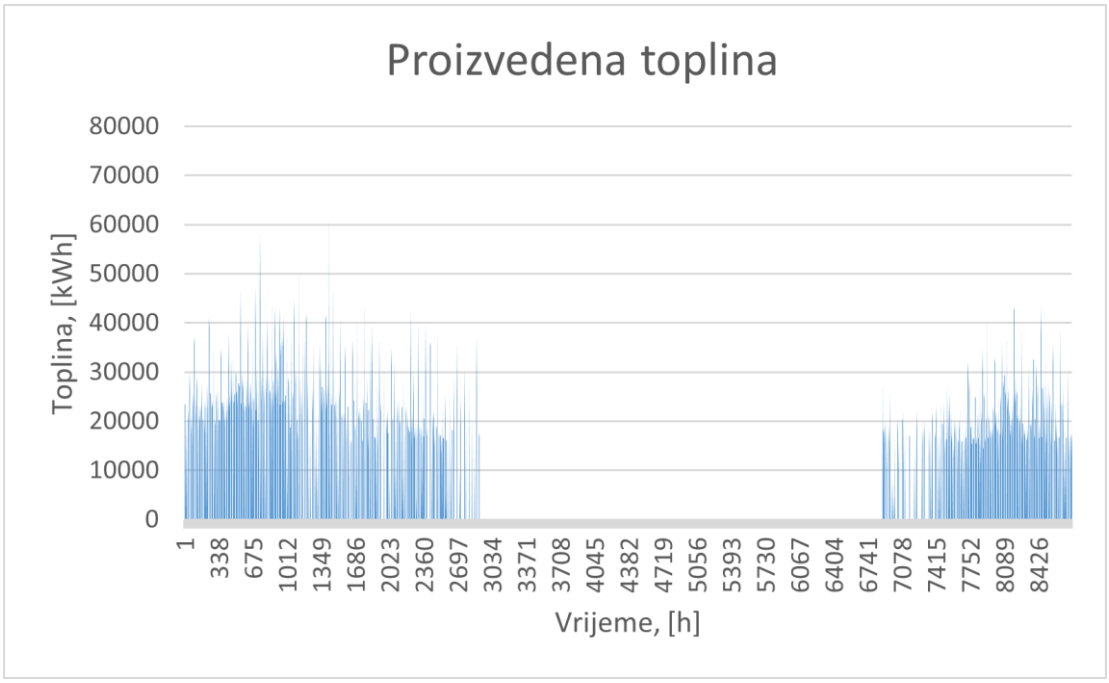
Za cjelovitu analizu rada centraliziranog toplinskog sustava tijekom cijele godine, prikazano je trenutno stanje u gradu Karlovcu. Na slici 16 prikazane su vrijednosti temperaturnih režima u funkciji vremena unutar jedne godine. Iz prikazanih podataka vidljivo je da temperatura polaznog voda doseže i do 90 °C, odnosno povratnog voda do 65 °C što ukazuje na značajne toplinske gubitke i nižu učinkovitost sustava. Tijekom ljetnih mjeseci nije potrebna isporuka

toplinske energije krajnjim korisnicima iz razloga što trenutni CTS ne isporučuje toplinsku energiju za potrebe PTV-a te se to može vidjeti u dijagramu.



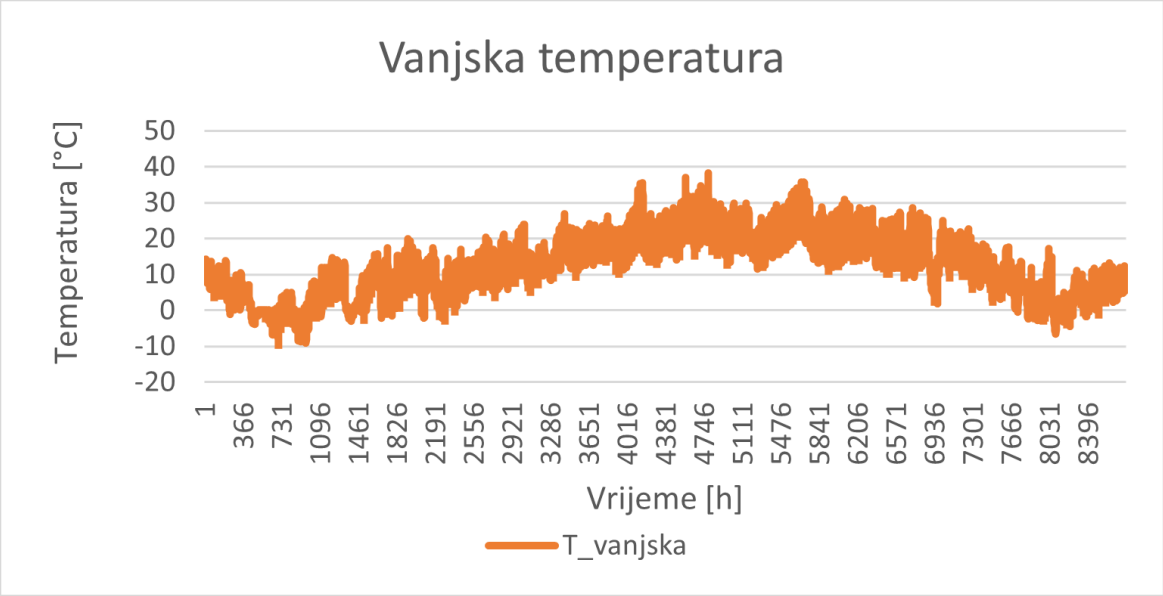
Slika 16 *Postojeći temperaturni režimi CTS-a grada Karlovca u ovisnosti o vremenu*

Dodatno, radi usporedbe s rezultatima modernizacije toplinskih podstanica u kontekstu proizvodnje toplinske energije u gradu Karlovcu, prikazano je trenutno stanje sustava. Prikaz ovog stanja dostupan je na slici 17. Iz dijagrama je vidljivo da vrijednosti dosežu čak do 60.000 kWh unutar određenih vremenskih intervala tijekom godine.



Slika 17 *Proizvedena toplina CTS-a grada Karlovca*

Na slici 18 je prikazana kretanje vanjske temperature grada Karlovca kroz godinu. Dijagrami su napravljeni pomoću dobivenih realnih podataka za grad Karlovac unutar jedne godine.



Slika 18 *Kretanje vanjske temperature grada Karlovca unutar godine*

5.3. Opis zadatka

Ovaj rad usmjeren je na analizu upotrebe različitih temperaturnih režima daljinskog grijanja u gradu Karlovcu. Specifično, analizirat će se tri temperaturna režima: NTDH, ULTDH i LTDH. Sama analiza obuhvaća dva scenarija koji su kategorizirani prema stanju zgrada te unutar tih scenarija dva slučaja koji se razlikuju po integraciji potrošne tople vode u sustav daljinskog grijanja:

1. Zgrade s provedenom djelomičnom energetskom obnovom
   a) Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a
   b) Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a
2. Zgrade s provedenom potpunom energetskom obnovom
   a) Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a
   b) Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a

Kao ekonomski alat za procjenu isplativosti različitih metoda, koristi se metodologija niveliranog troška topline, koja je prethodno opisana. Time se omogućuje detaljan uvid u ekonomsku efikasnost odabranih temperaturnih režima.

Energetskom obnovom zgrada podrazumijeva se poboljšanje toplinske izolacije, čime se povećava energetska učinkovitost sustava grijanja. Djelomična obnova obuhvaća osnovne mjere poput tankog sloja izolacije vanjskih zidova, djelomične zamjene prozora te poboljšanja brtvljenja otvora, čime se postižu određene uštede, ali bez značajnijeg smanjenja toplinskih gubitaka. S druge strane, potpuna obnova uključuje temeljitu izolaciju cijele ovojnice zgrade debljim slojem izolacije, zamjenu svih prozora i vrata boljim izvedbama te optimizaciju sustava grijanja.

Uključivanje PTV-a u sustav daljinskog grijanja ključan je faktor jer određeni temperaturni režimi zahtijevaju dodatno zagrijavanje polazne vode, što utječe na ukupnu potrošnju energije i toplinske gubitke. Također, neovisno o potrebama grijanja prostora, tijekom ljetnih mjeseci sustav mora osigurati toplinsku energiju za pripremu PTV-a, što dodatno utječe na ekonomsku isplativost modernizacije.

Kod primjene ULDTH i NTDH režima daljinskog grijanja, u sustav će biti integrirane dizalice topline s ciljem podizanja temperature, čime se osigurava prevencija razvoja bakterije Legionella i omogućava sigurna priprema potrošne tople vode u drugom slučaju analize. Nasuprot tome, u slučaju LTDH režima, dodatno povećanje temperature nije potrebno jer su postojeće temperature sustava već dovoljno visoke za zadovoljenje potreba grijanja i pripreme potrošne tople vode.

Dodatno, oba slučaja unutar oba scenarija uključuju analizu dviju varijanti LTDH temperaturnog režima. Prva varijanta odnosi se na obnovljene zgrade i kuće, gdje je integrirano podno grijanje kao učinkovitiji način distribucije toplinske energije. Druga varijanta podrazumijeva zgrade gdje nije integrirano podno grijanje već se toplinska energija prenosi izmjenjivačem topline i izravno distribuira prema već postojećim ogrjevnim tijelima (radijatorima) unutar stambenih i poslovnih objekata. Ova analiza omogućit će usporedbu učinkovitosti različitih pristupa u kontekstu energetske optimizacije i ekonomske isplativosti.

5.3.1. Ekonomski ulazni podaci

Kao što je prethodno navedeno, kapitalni i operativni troškovi ključni su parametri u LCOH ekonomskoj analizi. Tijekom projektiranja i implementacije toplinske podstanice u daljinsko grijanje, značajan dio inicijalnih ulaganja odnosi se na ugradnju dizalica topline, dok su troškovi ugradnje izmjenjivača topline znatno niži.

U kontekstu modernizacije toplinskih podstanica unutar centraliziranog toplinskog sustava, u Tablici 2 prikazani su procijenjeni kapitalni i operativni troškovi za samu toplinsku podstanicu.

Iako ovaj rad primarno ne obuhvaća analizu centralne toplinske stanice i distribucijske mreže, njihovi troškovi ipak će biti uključeni u izračune kako bi dobiveni rezultati što bolje odražavali stvarnu ekonomsku isplativost predloženih rješenja.

Tablica 2 *Ekonomski ulazni podaci*

Naziv	**Iznos**	**Mjerna jedinica**
Ugljični otisak električne energije	0,235	tCO_{2eq}/MWh
O&M trošak distribucijske mreže	0,6%	Od sveukupne investicije
Fiksni O&M trošak centralne jedinice	2000	€/MW
Promjenjivi O&M trošak centralne jedinice	1,83	€/MWh
Cijena el. Energije za kućanske potrošače	126,90	€/MWh
Cijena el. Energije za nekućanske potrošače	81,10	€/MWh
Faktor primarne energije	1,614	/
Diskontna stopa	3%	/

Diskontna stopa predstavlja bitan faktor u ekonomskoj analizi jer omogućuje procjenu sadašnje vrijednosti budućih troškova i prihoda, uzimajući u obzir vremensku vrijednost novca. U kontekstu modernizacije toplinskih podstanica, njena uloga je posebno važna pri izračunu kapitalnih troškova i operativnih troškova tijekom životnog vijeka sustava. Odabirom odgovarajuće diskontne stope moguće je realnije procijeniti isplativost investicije, usporediti različite scenarije i donijeti optimalne odluke o dugoročnom financiranju projekta.

Faktor primarne energije ključan je u analizi energetske učinkovitosti jer omogućuje procjenu ukupne količine primarne (izvorne) energije potrebne za proizvodnju iskoristive toplinske energije. U kontekstu modernizacije toplinskih podstanica, ovaj faktor je važan jer uzima u obzir gubitke u proizvodnji, prijenosu i distribuciji energije te omogućuje objektivnu usporedbu različitih izvora topline, poput fosilnih goriva, obnovljivih izvora i električne energije. Smanjenjem faktora primarne energije postiže se veća energetska učinkovitost, smanjuju emisije CO_2 te se optimizira potrošnja resursa, što doprinosi ekonomskoj i ekološkoj održivosti sustava grijanja.

5.3.2. Tehnički ulazni podaci

U okviru tehničkih parametara analizirane su temperature polaznog i povratnog voda za svaki od proučavanih temperaturnih režima daljinskog grijanja (ULTDH, LTDH, NTDH). Budući da se unutar režima LTDH razmatraju dvije varijante - jedan s integriranim podnim grijanjem i drugi s konvencionalnim ogrjevnim tijelima (radijatorima) unutar grijanih prostora - za analizu su uzete odgovarajuće temperature polaza i povrata za oba slučaja. Time se osigurava cjelovit prikaz utjecaja različitih sustava grijanja na učinkovitost i energetsku isplativost moderniziranog toplinskog sustava.

Tablica 3 *Iznosi temperatura polaza/povrata*

Naziv	Polaz iznos	Povrat iznos	Mjerna jedinica
ULTDH	40	25	°C
LTDH_1 s integriranim podnim grijanjem	60	30	°C
LTDH_2 s konvencionalnim grijanjem	70	50	°C
NTDH	20	10	°C

Tablica 4 prikazuje vrijednosti korištene u ekonomskoj analizi četiri analizirana slučaja. Udio toplinske potrebe namijenjene za grijanje prostora odnosi se na udio ukupne toplinske potrebe koji se troši isključivo za tu svrhu. Toplinska potreba za pripremu potrošne tople vode čini 20 % ukupne toplinske potrebe koja je prikazana u Tablici 1.

U slučaju djelomične obnove zgrade, toplinska potreba za grijanje prostora iznosi 75 % ukupne toplinske potrebe, dok se kod potpune obnove ta vrijednost smanjuje na 50 % od ukupne toplinske potrebe. Postoci smanjenja toplinske potrebe predstavljaju pretpostavljene vrijednosti koje odražavaju očekivano smanjenje potrošnje toplinske energije u svakom od analiziranih scenarija.

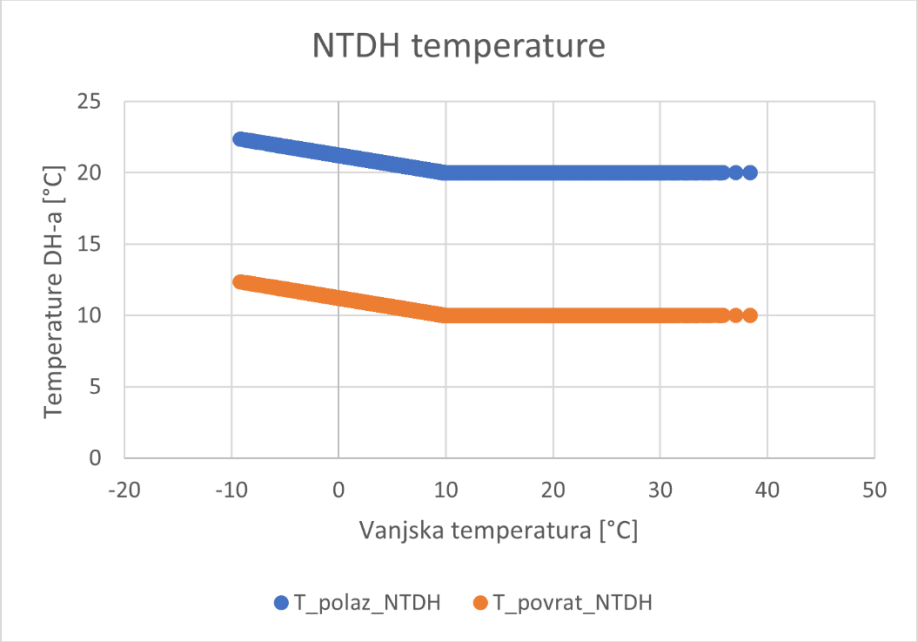
Tablica 4 *Podaci za toplinske potrebe u četiri analizirana slučaja*

Naziv	**Djelomična obnova s PTV-om**	**Djelomična obnova bez PTV-a**	**Potpuna obnova s PTV-om**	**Potpuna obnova bez PTV-a**
Udio za potrebe grijanja prostora (*eng. SH share*)	0,79	1	0,714	1
Toplinska potreba za PTV [kWh]	9 707 812,8	0	9 707 812,8	0
Toplinska potreba za SH [kWh]	36 404 298	36 404 298	24 269 532	24 269 532

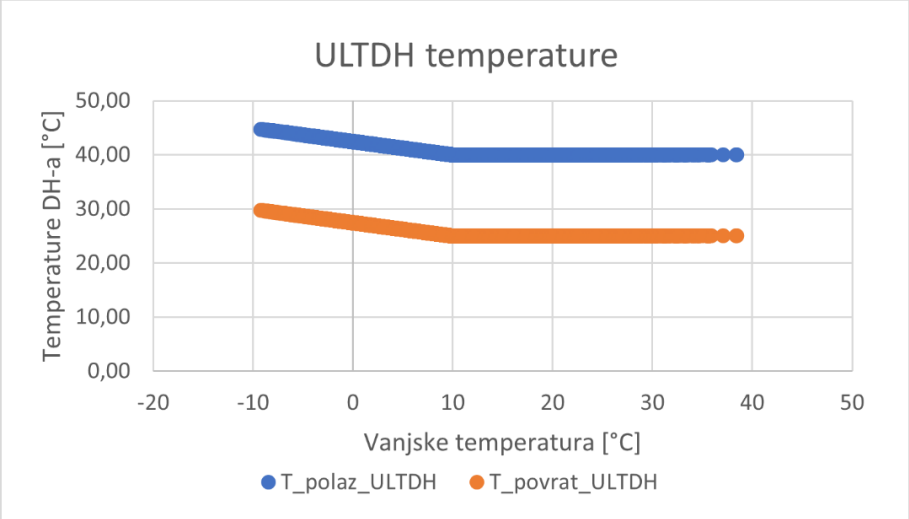
6. REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati tehno-ekonomske analize modernizacije toplinskih podstanica unutar postojećeg centraliziranog toplinskog sustava u gradu Karlovcu.

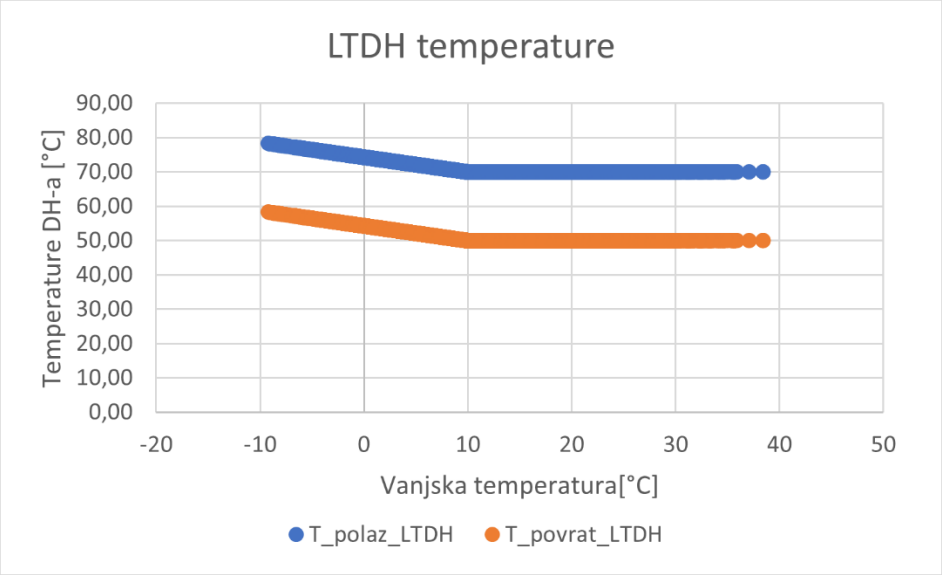
U svrhu analize, utjecaj temperaturnih režima NTDH, ULTDH i LTDH o temperaturi okoliša prikazan je na sljedećim dijagramima. Može se vidjeti na svim dijagramima kako povećanjem vanjske temperature okoliša pada temperatura daljinskog grijanja za pojedini temperaturni režim.



Slika 19 *NTDH temperature u ovisnosti o okolišu*

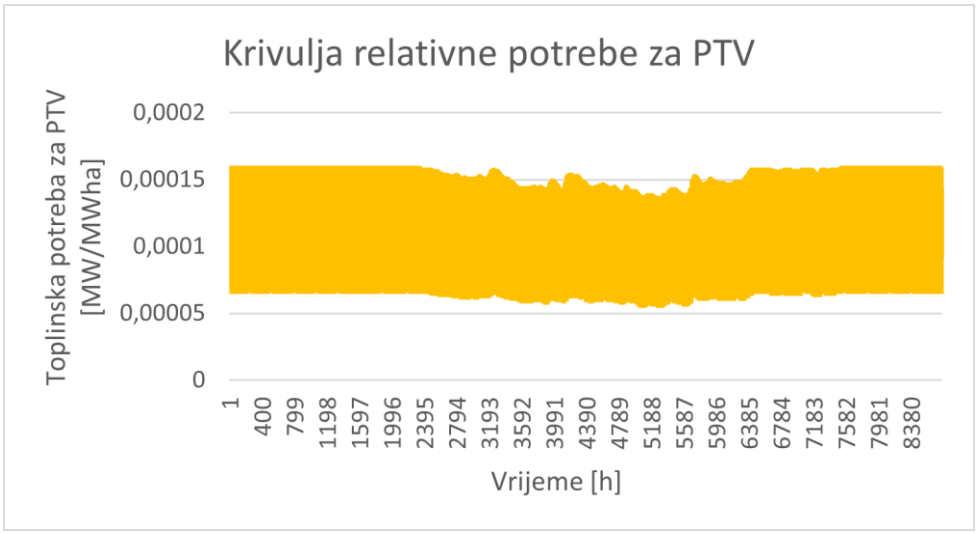


Slika 20 *ULTDH temperature u ovisnosti o okolišu*

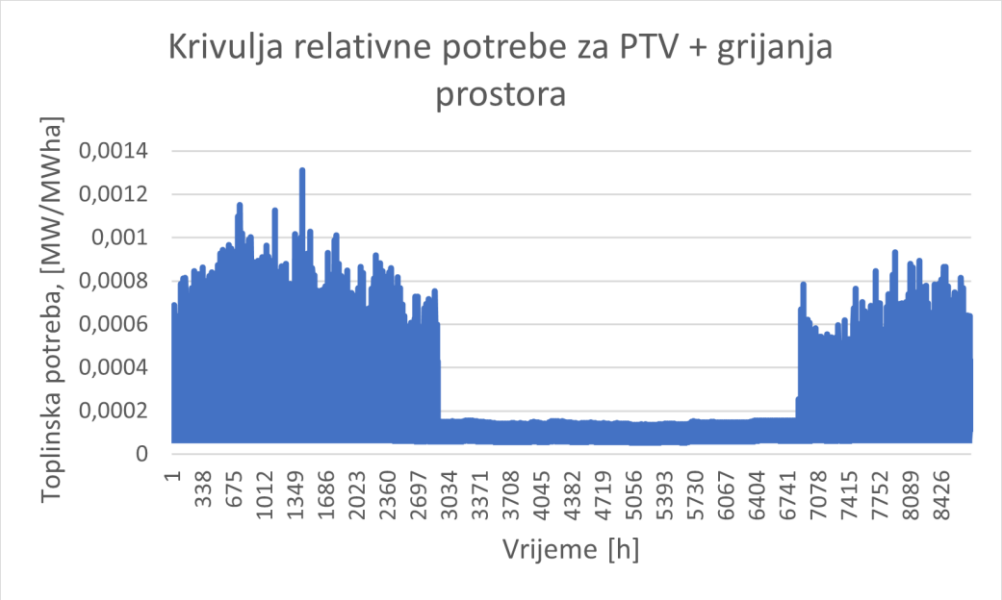


Slika 21 *LTDH temperature u ovisnosti o okolišu*

U nastavku su prikazane relativne krivulje toplinske potrebe za pripremu potrošne tople vode tijekom godine, kao i kombinirane toplinske potrebe za PTV i grijanje prostora koje su korištene za modeliranje potrošnje u analiziranim scenarijima. Iz prikazanih podataka na slici 22 jasno je vidljivo da se potreba za PTV-om tijekom godine održava na približno konstantnoj razini, uz mali pad tijekom ljetnih mjeseci. S druge strane, analiza dijagrama na slici 23 koji prikazuje ukupnu potrebu za grijanjem prostora i PTV-om ukazuje na izražene sezonske oscilacije. Tijekom zimskih mjeseci ukupna toplinska potreba značajno raste, dok se ljeti smanjuje isključivo na razinu potrebnu samo za pripremu PTV-a.



Slika 22 *Krivulja relativne potrebe za PTV kroz jednu godinu*

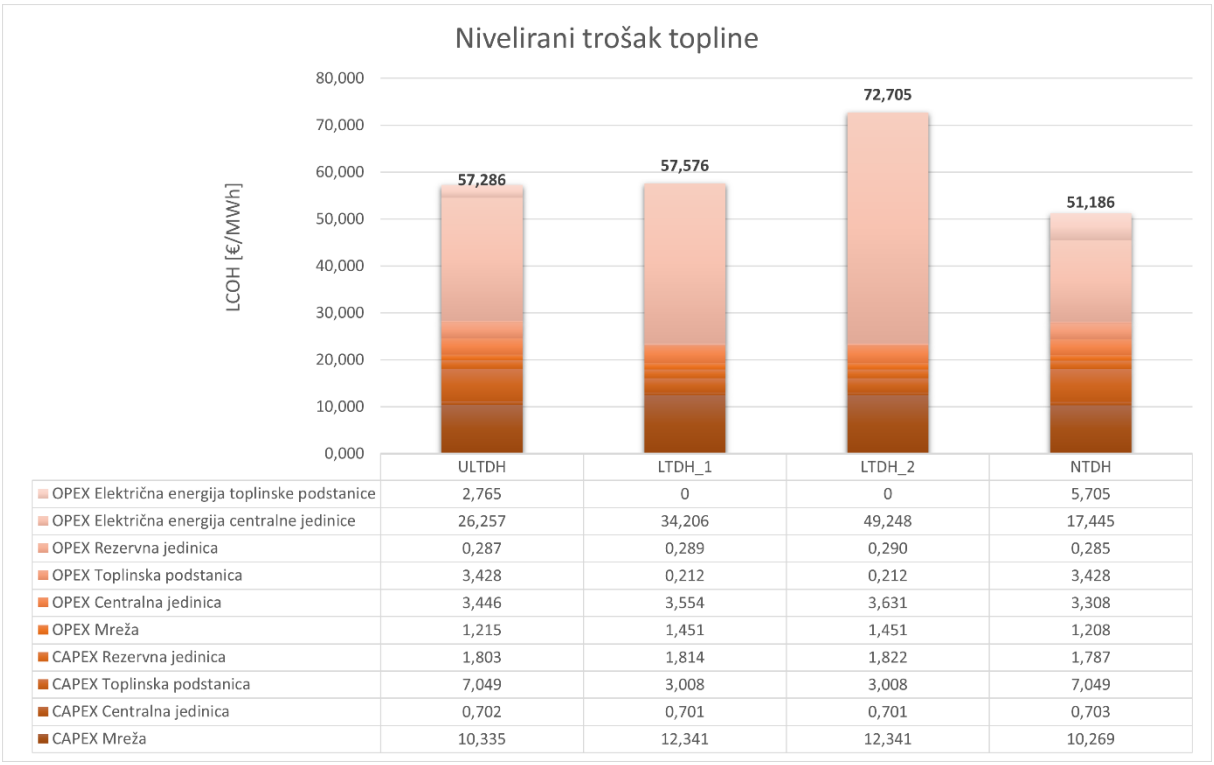


Slika 23 *Krivulja relativne potrebe PTV + SH kroz jednu godinu*

6.1. Zgrade s provedenom djelomičnom energetskom obnovom

6.1.1. Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a

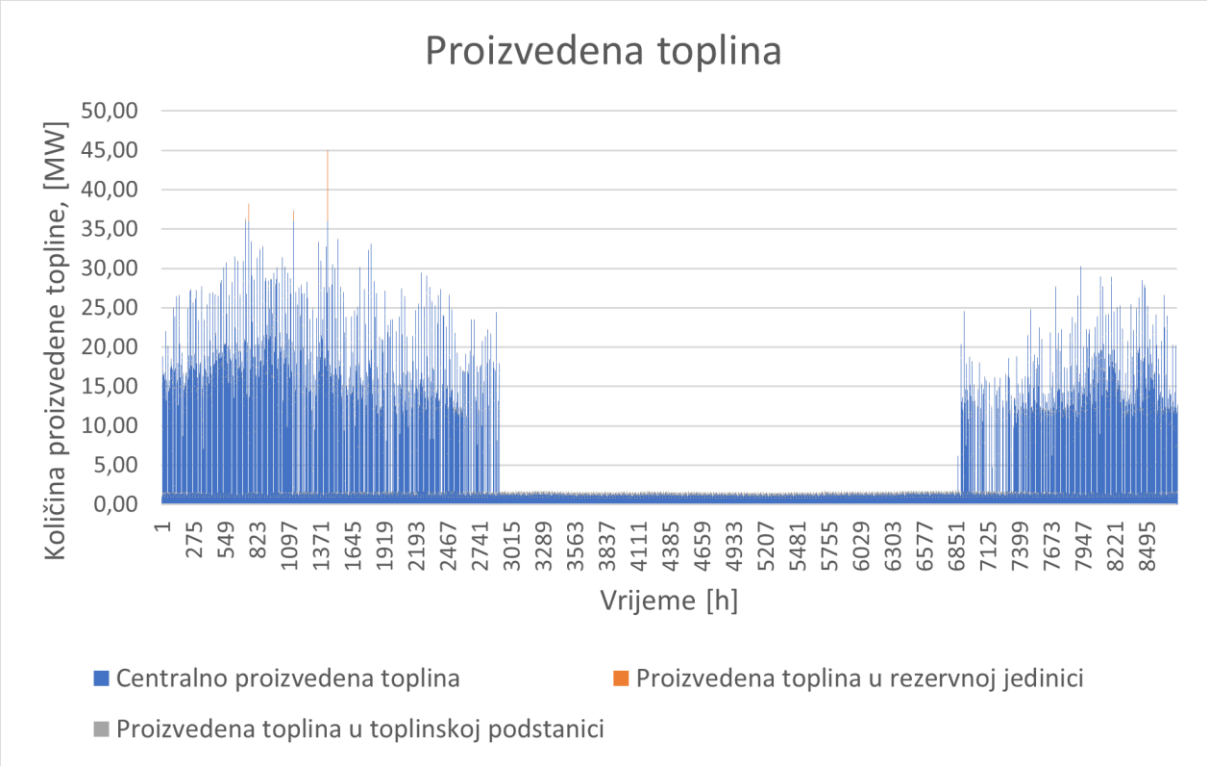
Na temelju podataka prikazanih u dijagramu na slici 24 može se zaključiti da je ekonomski najisplativiji temperaturni režim NTDH s integriranom dizalicom topline kod kojeg vrijednost LCOH iznosi 51,186 €/MWh. Ovaj sustav omogućuje optimiziranu potrošnju energije uz smanjene toplinske gubitke, čime se postiže financijska učinkovitost u dugoročnom razdoblju. S druge strane, LTDH s konvencionalnim ogrjevnim tijelima pokazuje se najmanje isplativim s vrijednosti LCOH 72,705 €/MWh, prvenstveno zbog povećanih zahtjeva za prijenos topline i niže učinkovitosti u prijenosu energije na grijane prostore.



	ULTDH	LTDH_1	LTDH_2	NTDH
OPEX Električna energija toplinske podstanice	2,765	0	0	5,705
OPEX Električna energija centralne jedinice	26,257	34,206	49,248	17,445
OPEX Rezervna jedinica	0,287	0,289	0,290	0,285
OPEX Toplinska podstanica	3,428	0,212	0,212	3,428
OPEX Centralna jedinica	3,446	3,554	3,631	3,308
OPEX Mreža	1,215	1,451	1,451	1,208
CAPEX Rezervna jedinica	1,803	1,814	1,822	1,787
CAPEX Toplinska podstanica	7,049	3,008	3,008	7,049
CAPEX Centralna jedinica	0,702	0,701	0,701	0,703
CAPEX Mreža	10,335	12,341	12,341	10,269

Slika 24 *LCOH analiza prvog slučaja za prvi scenarij*

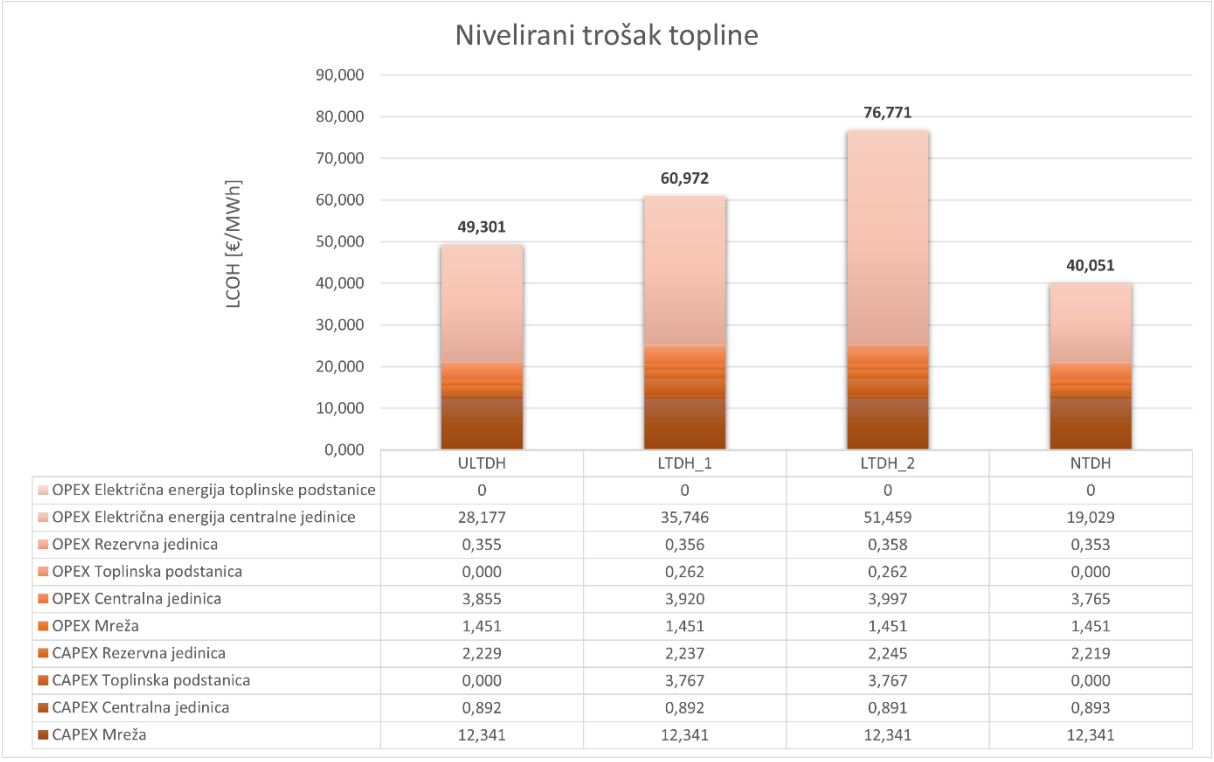
Dijagram na slici 25 prikazuje proizvodnju toplinske energije po satu tijekom godine, pri čemu je vidljivo da u slučajevima gdje je sustav odgovoran za pripremu potrošne tople vode, dolazi do kontinuirane i smanjene potrebe za toplinskom energijom tijekom ljetnih mjeseci gdje zahtjevi za grijanje prostora nisu prisutni. Uzeta je u obzir proizvodnja topline na razini centralne toplinske stanice, toplinske podstanice te rezervne (*eng. backup*) stanice. Iako je teško u dijagramu uočiti, ali u ovom slučaju dolazi do proizvodnje toplinske energije unutar toplinske podstanice iz razloga što je PTV uključen u daljinsko grijanje te je potrebno dodatno grijanje.



Slika 25 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za prvi slučaj u prvom scenariju*

6.1.2. Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a

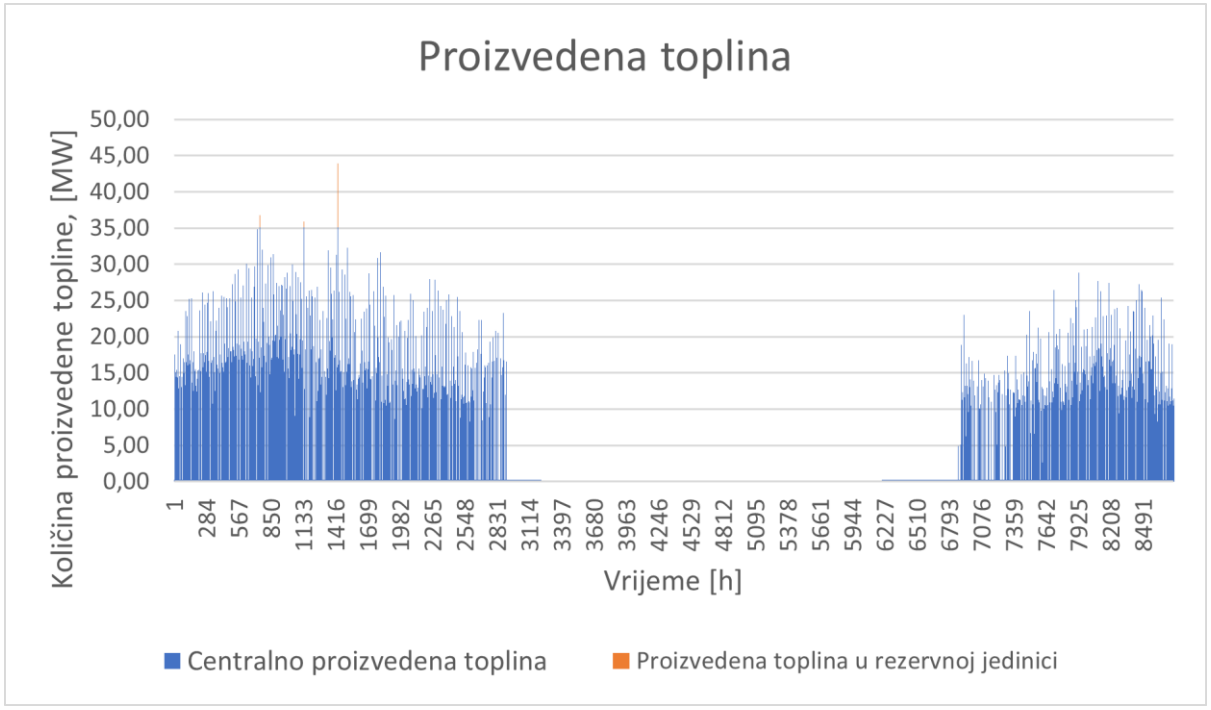
U slučaju kada priprema potrošne tople vode nije uključena u sustav, dolazi do određenih promjena u ekonomskoj isplativosti pojedinih temperaturnih režima, što se odražava na vrijednosti LCOH koja se u svakom slučaju smanjuje. Glavna promjena koja se može vidjeti u dijagramu na slici 26 jest kod parametara za OPEX električne energije toplinske podstanice gdje je u svakom temperaturnom režimu jednak nuli što proizlazi iz činjenice da PTV nije uključen u sustav. Također je važno naglasiti da dolazi i do tehničkih promjena u odnosu na sustav s PTV-om. Naime, ukupna toplinska potreba se smanjuje za 20%, što predstavlja vrijednost koja odlazi za potrebe pripreme potrošne tople vode.



	ULTDH	LTDH_1	LTDH_2	NTDH
OPEX Električna energija toplinske podstanice	0	0	0	0
OPEX Električna energija centralne jedinice	28,177	35,746	51,459	19,029
OPEX Rezervna jedinica	0,355	0,356	0,358	0,353
OPEX Toplinska podstanica	0,000	0,262	0,262	0,000
OPEX Centralna jedinica	3,855	3,920	3,997	3,765
OPEX Mreža	1,451	1,451	1,451	1,451
CAPEX Rezervna jedinica	2,229	2,237	2,245	2,219
CAPEX Toplinska podstanica	0,000	3,767	3,767	0,000
CAPEX Centralna jedinica	0,892	0,892	0,891	0,893
CAPEX Mreža	12,341	12,341	12,341	12,341

Slika 26 *LCOH analiza za drugi slučaj u prvom scenariju*

Na slici 27 se može vidjet količina proizvedene topline unutar nekog razdoblja po satu za ovaj slučaj. Vidi se iz dijagrama kako je ta količina proizvedene topline tijekom ljetnih mjeseca značajno pala što predstavlja posljedicu isključenja PTV-a iz sustava. Također, iz istog razloga ne dolazi do proizvodnje topline unutar toplinske podstanice.



Slika 27 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za drugi slučaj u prvom scenariju*

U prvom analiziranom slučaju, kada je PTV bio uključen, LTDH s podnim grijanjem pokazao je vrlo sličnu vrijednost LCOH sa onim kod ULTDH. Međutim, može se vidjeti prema rezultatima kada PTV nije uključen, vrijednosti LCOH za LTDH su se povećale, odnosno za ULTDH i NTDH se smanjile. Ovaj preokret može se objasniti sljedećim faktorima:

1. Kada je PTV bio uključen, dizalica topline u ULTDH i NTDH režimima povećavala je troškove, čime je taj režim bio ekonomski sličan u odnosu na LTDH. No, kada PTV nije uključen**,** dizalica topline u ULTDH i NTDH režimima više nema ulogu u povećanju operativnog dijela LCOH**,** što dovodi do sniženja ukupnih troškova ULTDH i NTDH u odnosu na LTDH.
2. LTDH s podnim grijanjem oslanja se na niže polazne temperature za osiguranje potrebne toplinske energije, što znači da sustav mora isporučiti veći volumen vode kako bi pokrio potrebe grijanja. Dodatno, u slučaju LTDH temperaturnog režima nije integrirana dizalice topline u toplinsku podstanicu te iz tog razloga vidi se rast u vrijednosti OPEX-a električne energije centralne jedinice.

Također se može vidjeti kao što je bilo u prvom slučaju da je najviša vrijednost LCOH kod LTDH temperaturnog režima s radijatorima. Radijatori kao prijenosnici topline zahtijevaju više polazne temperature nego podno grijanje, što dovodi do povećanih toplinskih gubitaka i veće ukupne potrošnje energije.

Smanjenje LCOH za NTDH režim može se objasniti time što ovaj sustav već koristi dizalice topline, koje omogućuju veću fleksibilnost i učinkovitost u prilagodbi potrebne temperature. Kada PTV nije uključen, NTDH režim ostvaruje značajne uštede u potrošnji električne energije, što smanjuje njegovu ukupnu vrijednost LCOH.

Do smanjenja kapitalnih troškova u svim temperaturnim režimima dolazi jer u slučaju kada PTV nije uključen u sustav**,** nije potrebno integrirati dizalice topline za podizanje temperature vode u toplinsku podstanicu, čime se smanjuju investicijski troškovi. Također, smanjuje se potreba za dodatnom opremom i infrastrukturnim prilagodbama u toplinskim podstanicama, što dodatno smanjuje ukupne početne troškove sustava.

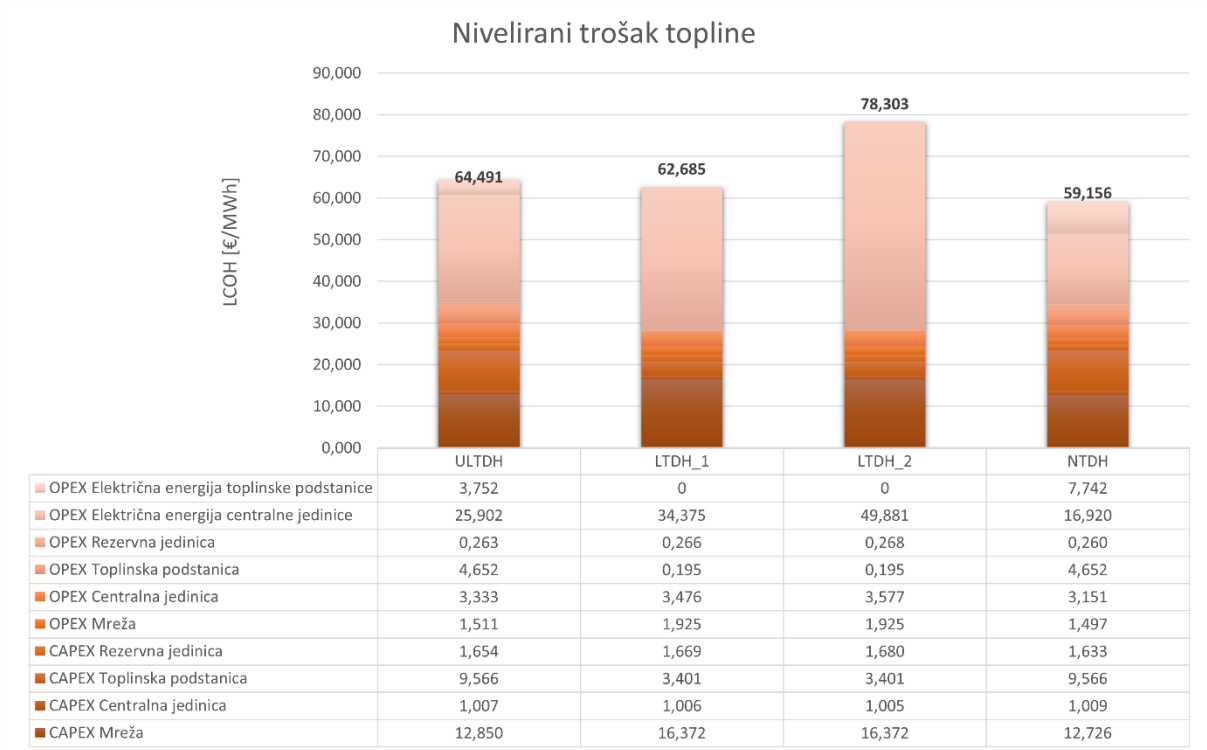
Zaključno, promjene u odnosima među temperaturnim režimima jasno pokazuju kako prisutnost ili odsutnost PTV-a značajno utječe na ekonomsku isplativost sustava, osobito u kontekstu dizalica topline i različitih načina prijenosa topline unutar objekta.

6.2. Zgrade s provedenom potpunom energetskom obnovom

6.2.1. Sustav daljinskog grijanja uključuje pripremu PTV-a

Energetska obnova zgrade obuhvaća niz mjera koje smanjuju potrošnju energije za grijanje i hlađenje kao što je opisano unutar ovog rada. Time se poboljšava ukupna energetska učinkovitost objekta. Ključne mjere uključuju toplinsku izolaciju ovojnice zgrade, zamjenu ili poboljšanje vanjske stolarije radi smanjenja toplinskih gubitaka te modernizaciju sustava grijanja.

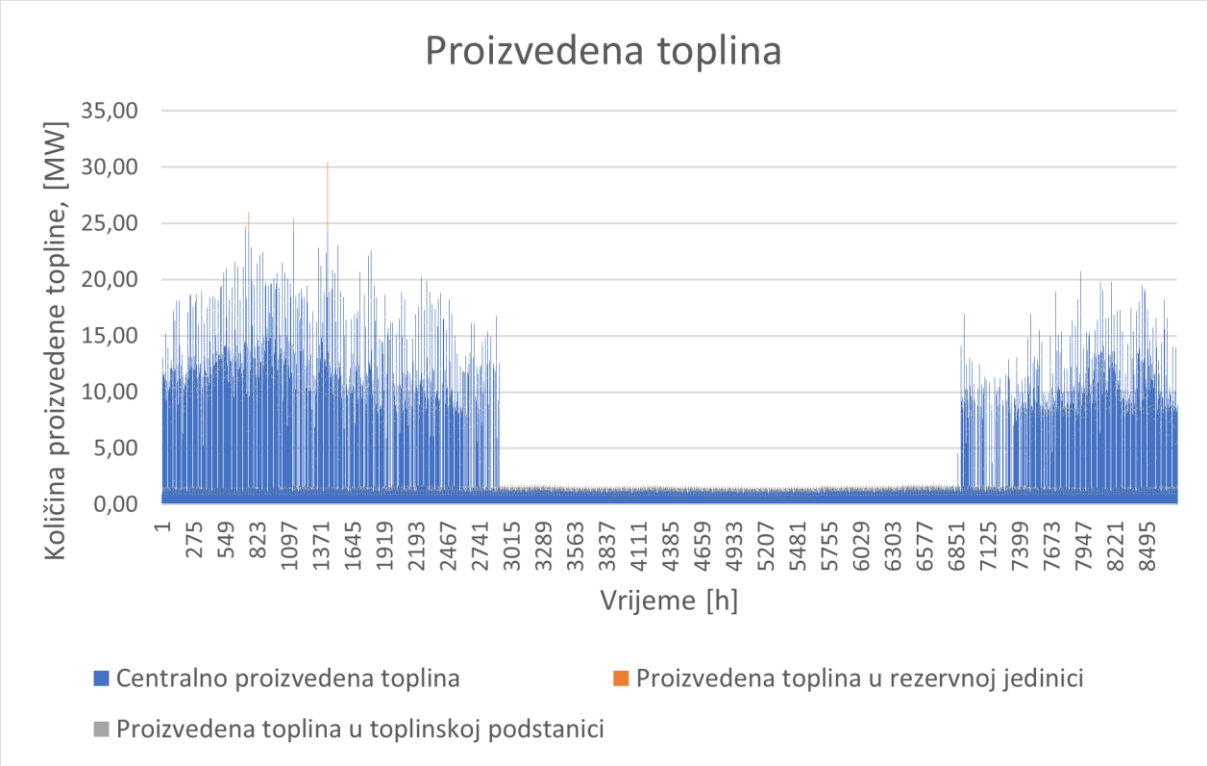
Na slici 28 prikazani su rezultati ekonomske analize prema LCOH metodi, iz kojih je vidljivo da je temperaturni režim LTDH s konvencionalnim načinom grijanja najmanje ekonomski isplativ. S druge strane, temperaturni režim NTDH ponovno se pokazao se kao najisplativiji među analiziranim opcijama.



	ULTDH	LTDH_1	LTDH_2	NTDH
OPEX Električna energija toplinske podstanice	3,752	0	0	7,742
OPEX Električna energija centralne jedinice	25,902	34,375	49,881	16,920
OPEX Rezervna jedinica	0,263	0,266	0,268	0,260
OPEX Toplinska podstanica	4,652	0,195	0,195	4,652
OPEX Centralna jedinica	3,333	3,476	3,577	3,151
OPEX Mreža	1,511	1,925	1,925	1,497
CAPEX Rezervna jedinica	1,654	1,669	1,680	1,633
CAPEX Toplinska podstanica	9,566	3,401	3,401	9,566
CAPEX Centralna jedinica	1,007	1,006	1,005	1,009
CAPEX Mreža	12,850	16,372	16,372	12,726

Slika 28 *LCOH analiza za prvi slučaj u drugom scenariju*

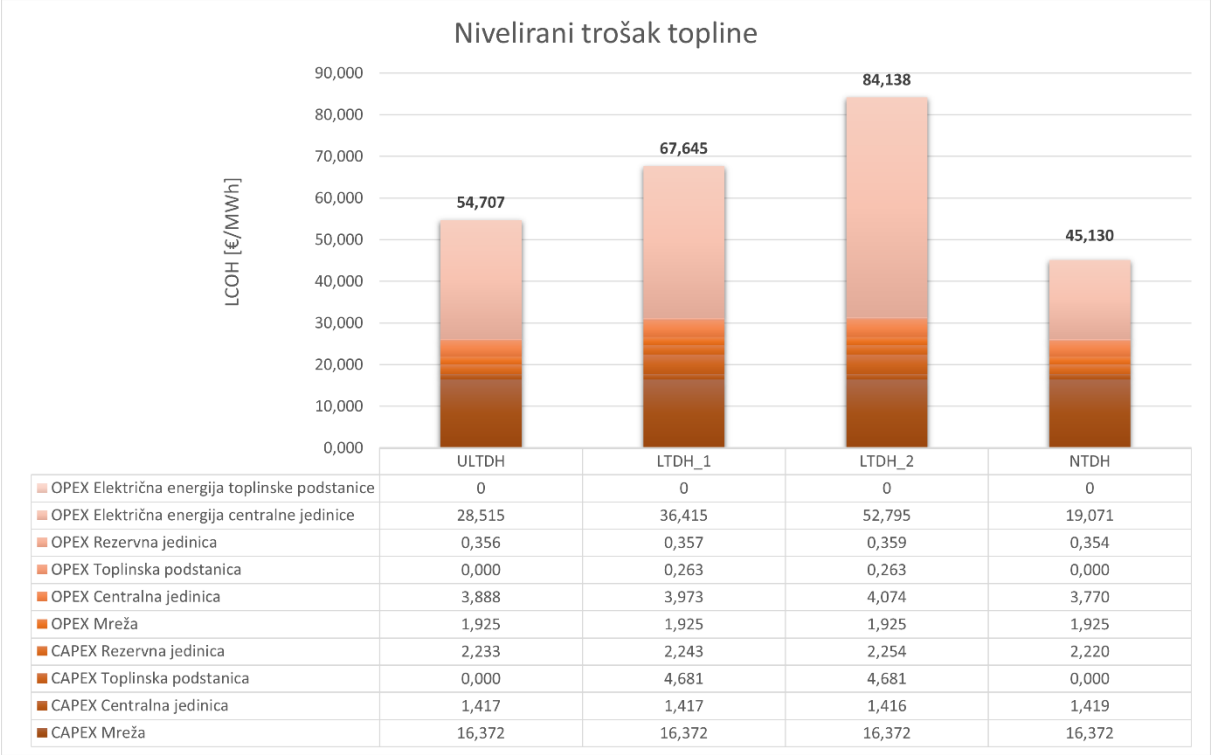
Na slici 29 prikazan je dijagram proizvedene toplinske energije tijekom jedne godine, pri čemu se može uočiti sličnost s rezultatima prvog slučaja iz prvog scenarija. Međutim, kada su objekti djelomično obnovljeni može se primijetiti kako proizvedena toplina doseže veće vrijednosti u odnosu na slučaj potpune obnove objekata. To je posljedica većeg smanjenja ukupne toplinske potrebe unutar objekata nakon potpune obnove.



Slika 29 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za prvi slučaj u drugom scenariju*

6.2.2. Sustav daljinskog grijanja ne uključuje pripremu PTV-a

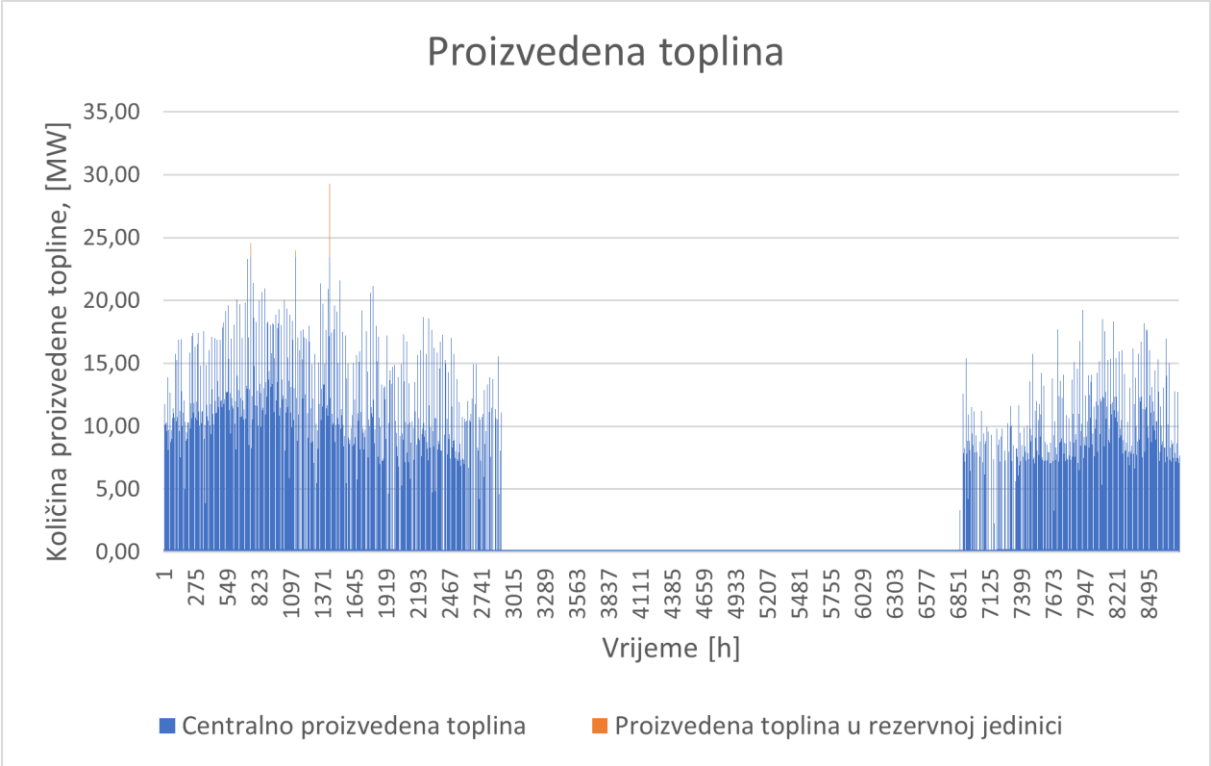
Na temelju slike 30 može se zaključiti da je i u ovom slučaju NTDH temperaturni režim ekonomski najisplativiji, dok je najmanje isplativ LTDH režim s konvencionalnim grijanjem pomoću ogrjevnih tijela (radijatora). Usporedba oba slučaja unutar drugog scenarija gdje su objekti potpuno obnovljeni može se provesti na isti način kao usporedba dva slučaja unutar prvog scenarija gdje su objekti djelomično obnovljeni.



	ULTDH	LTDH_1	LTDH_2	NTDH
OPEX Električna energija toplinske podstanice	0	0	0	0
OPEX Električna energija centralne jedinice	28,515	36,415	52,795	19,071
OPEX Rezervna jedinica	0,356	0,357	0,359	0,354
OPEX Toplinska podstanica	0,000	0,263	0,263	0,000
OPEX Centralna jedinica	3,888	3,973	4,074	3,770
OPEX Mreža	1,925	1,925	1,925	1,925
CAPEX Rezervna jedinica	2,233	2,243	2,254	2,220
CAPEX Toplinska podstanica	0,000	4,681	4,681	0,000
CAPEX Centralna jedinica	1,417	1,417	1,416	1,419
CAPEX Mreža	16,372	16,372	16,372	16,372

Slika 30 *LCOH analiza za drugi slučaj u drugom scenariju*

Na slici 31 prikazan je dijagram proizvedene toplinske energije po jedinici vremena tijekom godine, koji također potvrđuje prethodno donesene zaključke iz ranijih analiziranih slučajeva.



Slika 31 *Satna proizvodnja topline tijekom godine za drugi slučaj u drugom scenariju*

7. ZAKLJUČAK

Dobiveni rezultati temelje se na realnim parametrima za analizirano područje, odnosno grad Karlovac. Međutim, budući da priprema potrošne tople vode trenutačno nije integrirana u sustav daljinskog grijanja u Karlovcu, u ovom radu su korištene okvirne procjene za taj slučaj u svrhu analize slučajeva s integriranom pripremom PTV-a u centralizirani toplinski sustav.

Također, temperaturni režimi sustava i ekonomski ulazni podaci preuzeti su iz relevantne literature kao što su prethodno navedene. Na temelju rezultata provedenog istraživanja moguće je izvesti tri ključna zaključka.

Najniže vrijednosti LCOH u svim analiziranim slučajevima postignute su pri temperaturnom režimu NTDH. Međutim, unutar tog režima, najpovoljniji scenarij prema LCOH analizi jest djelomična obnova bez integrirane pripreme PTV-a, što upućuje na njegovu najveću ekonomsku isplativost.

Drugi zaključak proizlazi iz usporedbe scenarija djelomične i potpune obnove objekata. Iako rezultati pokazuju više vrijednosti LCOH za scenarij potpune obnove, to ne ukazuje nužno njegovu manju dugoročnu isplativost u odnosu na djelomičnu obnovu. Naime, djelomična obnova podrazumijeva veću toplinsku potrebu za grijanje prostora i pripremu PTV-a, što dovodi do većih troškova u odnosu na slučaj s potpunom obnovom.

U Tablici 5 prikazani su rezultati ekonomske analize dvaju slučaja u kontekstu kapitalnih troškova i ukupnih operativnih troškova.

Tablica 5 *Prikaz parametara za CAPEX i ukupan OPEX u dva slučaja*

Naziv	**Djelomična obnova s PTV-om**	**Potpuna obnova s PTV-om**
CAPEX mreže, [€]	476 595,52	436 631,60
CAPEX toplinske podstanice, [€]	325 035,46	325 035,46
CAPEX centralne jedinice, [€]	32 376,01	34 223,97
CAPEX rezervne jedinice, [€]	83 118,99	56 194,43
OPEX, [€]	1 724 521,94	1 339 214,79

Kako bi se donijeli zaključci o ekonomskoj isplativosti analiziranih rješenja, potrebno je najprije sagledati kretanje vrijednosti navedenih parametara. Radi usporedbe odabrana su dva scenarija: djelomična obnova uz pripremu potrošne tople vode te potpuna obnova uz pripremu potrošne tople vode. Odabrani slučajevi temelje se na daljinskom grijanju ULTDH temperaturnog režima.

Iz tablice je vidljivo da je CAPEX mreže i CAPEX rezervne jedinice u slučaju potpune obnove manji u odnosu na djelomičnu obnovu. S druge strane, kapitalni troškovi toplinske podstanice ostaju nepromijenjeni u oba scenarija, budući da je podstanica projektirana na isti način, s obzirom na prisutnost pripreme potrošne tople vode u oba slučaja.

Međutim, CAPEX centralne jedinice viši je kod potpune obnove nego kod djelomične obnove. To se može objasniti ekonomijom razmjera, prema kojoj veći sustavi ostvaruju niže troškove po jedinici kapaciteta, ukoliko kod potpune obnove dobiven toplinski kapacitet centralne jedinice jest 24,32 MW te predstavlja manji u odnosu na djelomičnu obnovu koji je 35,97 MW. Ukupni operativni troškovi uključuju troškove električne energije, rada i održavanja te cijenu ugljičnog otiska. Analizom tabličnih podataka može se uočiti da su operativni troškovi niži u slučaju potpune obnove u usporedbi s djelomičnom obnovom. U konačnici, analiza pokazuje da je scenarij potpune obnove objekata dugoročno isplativiji.

Treći zaključak odnosi se na utjecaj pripreme PTV-a na ekonomsku isplativost sustava. Analiza pokazuje da su sustavi daljinskog grijanja isplativiji kada ne uključuju pripremu PTV-a, budući da njezina integracija povećava operativne i kapitalne troškove toplinske podstanice, posebice kod sustava ULTDH i NTDH zbog integrirane dizalice topline. Kod sustava LTDH ovakvi troškovi nisu prisutni, što rezultira jednakim vrijednostima parametara za OPEX i CAPEX za scenarije s i bez PTV-a. Ipak, važno je napomenuti da potreba za PTV-om u kućanstvima ostaje neizbježna, te bi u slučaju njezina neuključivanja u sustav daljinskog grijanja bila potrebna alternativa čija bi isplativost zahtijevala dodatnu analizu. Buduća istraživanja mogla bi uključiti usporedbu LCOH-a za individualne sustave pripreme PTV-a u Karlovcu, čime bi se osigurao potpuniji uvid za ovaj sustav daljinskog grijanja.

LITERATURA

[1] 'REWARDHeat planning schemes database - Renewable and Waste Heat Recovery for Competitive District Heating and Cooling Networks'. Accessed: Dec. 29., 2024. [Online] Available:https://www.rewardheat.eu/gallery/D2.1%20REWARDHeat%20planning%20schemes%20database_full.pdf

[2] 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. Accessed: Dec. 29.2024.[Online].Available:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214002369

[3] 'European Commission: Energy Efficiency Directive'. Accessed: Dec. 22., 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en#heating-and-cooling-supply

[4] 'European Union: EUR-Lex'. Accessed: Dec. 22., 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL_202402395

[5] 'European Union: EUR-Lex'. Accessed: Jan. 13., 2025. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2023_231_R_0001&qid=1695186598766

[6] 'European Commission: Renewable Energy Directive'. Accessed: Dec. 27., 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en

[7] 'Eurostat: Renewable energy statistics'. Accessed: Dec 23., 2024. [Online]. Available:https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics

[8] 'European Commission: Renewable Energy Directive'. Accessed: Dec. 27., 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en

[9] 'European Commission: Communication from the Commission'. Accessed: Jan. 14., 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/document/download/b2347855-0e3d-4dc8-aed6-338f318e1b20_en?filename=C_2024_6226_1_EN_ACT_part1_v5.pdf

[10] O. Ruhnau, L. Hirth, and A. Praktiknjo, “Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling,” Accessed: Feb. 02. 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335462107_Time_Series_of_Heat_Demand_and_Heat_Pump_Efficiency_for_Energy_System_Modeling

[11] “IEA DHC: Toward 4th Generation District Heating: Experience and Potential of LowTemperature District Heating, 2014.” Accessed: Feb. 02. 2025. [Online]. Available: https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_X/IEA_Annex_X_Final_Report_2014_-_Toward_4th_Generation_District_Heating.pdf

[12] X. Yang, H. Li, and S. Svendsen, “Alternative solutions for inhibiting Legionella in domestic hot water systems based on low-temperature district heating,” Accessed: Feb. 02. 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/283828072_Alternative_solutions_for_inhibiting_Legionella_in_domestic_hot_water_systems_based_on_low-temperature_district_heating

[13] Article, 'Low temperature or ambient temperature district heating', Accessed: Feb. 05. 2025. [Online]. Available: https://assets.danfoss.com/documents/latest/178386/AC368739176351en-000101.pdf

[14] J. E. Thorsen and T. Ommen, ‘Field experience with ULTDH substation for multifamily building' . Accessed: Feb. 05. 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218304806

[15] J. E. Thorsen, T. Ommen, W. Meesenburg, K. Smith, and E. M. Oliver, ‘Deliverable D10.1c. 1: Heat Booster Substation for Domestic Hot Water and 2: Circulation Booster for Domestic Hot Water’, Accessed: Feb. 05. 2025. [Online]. Available: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/245670581/d10.1c_heat_boosters_for_hot_tap_water_and_heating.pdf

[16] T. Reiners, M. Gross, L. Altieri, “Heat Pump Efficiency in fifth Generation Ultra-Low Temperature District Heating Networks using a Wastewater Heat Source” Accessed: Feb. 03. 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221015668

[17] Waterkotte GmbH (Hrsg.): Betriebsanleitung Planung und Installation EcoTouch Ai1 Compact. Herne, (2018). Accessed: Feb. 03. 2025. [Online]. Available: https://www.waterkotte.de/fileadmin/data/editor/6_systempartner/BDA_s/WP/Z23944_EcoTouchAi1Geo_Compact_Inverter_V24_WWPR2.pdf

[18] 'Gradska Toplana d.o.o. Karlovac' Available: https://www.gradska-toplana.hr/

[19] 'Energetski institut Hrvoje Požar: Energija u Hrvatskoj, 2023. – godišnji energetski pregled'