

Strategije fleksibilnog vođenja sustava daljinskog grijanja

Horvat, Ines

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:397493>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ines Horvat

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Studentica:

Ines Horvat

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru na strpljenju i pruženoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Ines Horvat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ines Horvat**

Mat. br.: 0035199437

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Strategije fleksibilnog vođenja sustava daljinskog grijanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flexible Operation Strategies of District Heating Systems**

Opis zadatka:

S povećanjem udjela obnovljivih izvora energije u energetske sustavima promijenila se i uloga termoelektrana toplana priključenih na sustave daljinskog grijanja. Termoelektrane toplane se pored ispunjavanja primarne zadaće, opskrbe toplinskih potrošača trebaju prilagoditi i varijabilnoj proizvodnji vjetroelektrana i fotonaponskih sustava te pratećim promjenama tržišnih cijena električne energije. Uz promjenu načina vođenja pogona mijenja se i konfiguracija toplinskih izvora na lokaciji, najčešće dogradnjom električnih kotlova i/ili dizalica topline velikih snaga, dok se sustav daljinskog grijanja razmatra kao dodatni toplinski spremnik koji omogućava povećanje fleksibilnosti pogona toplinskog izvora.

U okviru rada potrebno je:

1. Odrediti veličinu i broj vršnih izvora potrebnih za opskrbu sustava daljinskog grijanja priključne toplinske snage potrošača 300 MW smještenog u kontinentalnom dijelu RH – pretpostaviti da se na lokaciji kao temeljni izvor već koristi visokoučinkovita kogeneracijska jedinica nazivne toplinske snage 150 MW;
2. Izvesti pojednostavljene matematičke modele izvora prikladne za troškovnu analizu proizvodnje toplinske i električne energije;
3. Opisati strategije troškovno optimalnog vođenja pogona toplinskih izvora i to:
 - statičku, definiranu cjenovnim pragovima i
 - dinamičku koja cijevnu mrežu sustava koristi kao toplinski spremnik;
4. Analizom godišnjih satnih profila toplinskog opterećenja kao i cijena električne energije na veleprodajnom tržištu odabrati reprezentativne vremenske intervale u kojima će se simulacijom usporediti odabrane strategije vođenja pogona sustava.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

5. ožujka 2020.

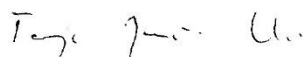
7. svibnja 2020.

11. – 15.5.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Dražen Lončar


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. DALJINSKO GRIJANJE	4
2.1. Izvori topline u sustavu daljinskog grijanja	6
2.1.1. Kogeneracijska postrojenja	7
2.1.2. Dizalica topline	8
2.1.3. Plinski kotao.....	10
2.2. Fleksibilnost u sustavima daljinskog grijanja i veza s elektroenergetskim sustavom	11
2.2.1. Toplinski spremnik	15
2.2.2. Toplovod – distribucijska mreža.....	15
3. ANALIZA PROFILA GODIŠNJEG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA I CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE	17
3.1. Toplinsko opterećenje	17
3.2. Cijena električne energije.....	19
3.3. Odabir reprezentativnih vremenskih intervala simulacija	20
3.4. Odabir vršnih izvora topline	21
4. STRATEGIJE TROŠKOVNO OPTIMALNOG VOĐENJA	22
4.1. Modeli izvora topline	22
4.1.1. Kogeneracijsko postrojenje.....	23
4.1.3. Dizalica topline	23
4.1.4. Toplinski spremnik	24
4.2. Strategija 1) – statička, definirana cjenovnim pragom	25
4.3. Strategija 2) – dinamička, optimizacija.....	28
4.4. Strategija 3) – dinamička, dodatni spremnik topline - cjevovod	30
5. REZULTATI	31
5.1. Strategija vođenja prema cjenovnom pragovima	31
5.1.1. S1a - Postojeća cijena električne energije.....	31
5.1.3. Usporedba S1a i S1b	35
5.2. Strategija 2 – Linearna optimizacija	38
5.2.1. S2a - Postojeća cijena električne energije.....	38
5.2.2. S2b – Dvostruko veća cijena električne energije	40

5.2.3. Usporedba slučajeva S2a i S2b	41
5.3. Strategija 3 – linearna optimizacija s dodanim spremnikom koji imitira mrežu daljinskog grijanja.....	44
5.3.1. S3a - Postojeća cijena električne energije.....	44
5.3.2. Slučaj S3b	46
5.3.3. Usporedba S3a i S3b	47
5.4. Usporedba osnovnih rezultata pojedinih strategija i slučajeva	50
6. ZAKLJUČAK.....	51
7. LITERATURA	53

POPIS SLIKA

Slika 1 Udio korištenja određenim toplinskih izvora za namirenje određenih toplinskih potreba u sektoru zgradarstva u EU [2]	2
Slika 2 Korištenje pojedinog izvora energije za grijanje prostora (podaci za 2015.godinu) [2] 3	3
Slika 3 Razvoj sustava daljinskog grijanja [5]	5
Slika 4 CAPEX raznih postrojenja u sustavu daljinskog grijanja [2]	6
Slika 5 Instalirana snaga postrojenja u sustavu poticaja u RH u razdoblju od 2007. do 2018. godine	8
Slika 6 Varijabilni troškovi proizvodnje toplinske energije pri različitim cijenama električne energije [15]	10
Slika 7 Izvori fleksibilnosti u sustavu daljinskog grijanja [19].....	13
Slika 8 Vođenje sustava daljinskog grijanja u ovisnosti o dostupnosti obnovljivih izvora [19]	14
Slika 9 Korištenje potrošne tople vode	18
Slika 10 Toplinsko opterećenje sustava s LDC krivuljom.....	19
Slika 11 Cijene električne energije.....	19
Slika 12 Toplinsko opterećenje i cijena električne energije u promatranom razdoblju	21
Slika 13 Marginalni trošak proizvodnje toplinske energije iz pojedinog izvora.....	27
Slika 14 Rad sustava strategije 1 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S1a	31
Slika 15 Rad sustava strategije 1 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije od referentnih – S1b	33
Slika 16 LDC krivulje – Strategija 1a i 1b	36
Slika 17 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje - S1a i S1b.....	37
Slika 18 Rad sustava strategije 2 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S2a	38
Slika 19 Rad sustava strategije 2 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije – S2b.....	40
Slika 20 LDC krivulje – Strategija 2a i 2b	42
Slika 21 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje – S2a i S2b	43
Slika 22 Napunjenost spremnika prema strategijama 1 i 2	43
Slika 23 Rad sustava strategije 3 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S3a	44
Slika 24 Rad sustava strategije 3 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije – S3b.....	46
Slika 25 LDC krivulje – Strategija 3a i 3b	48
Slika 26 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje – S3a i S3b	49

POPIS TABLICA

Tablica 1 Izvori topline u promatranom sustavu.....	21
Tablica 2 Ulazni podaci za dobivanje marginalnog troška proizvodnje električne energije ...	26
Tablica 3 Troškovi za promatrano razdoblje - S1a	33
Tablica 4 Troškovi za promatrano razdoblje - S1b	34
Tablica 5 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S1a i S1b.....	35
Tablica 6 Troškovi za promatrano razdoblje – S2a.....	39
Tablica 7 Troškovi za promatrano razdoblje – S2b	41
Tablica 8 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S2a i S2b.....	42
Tablica 9 Troškovi za promatrano razdoblje – S3a.....	45
Tablica 10 Troškovi za promatrano razdoblje – S3b	47
Tablica 11 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S3a i S3b.....	48
Tablica 12 Ukupan trošak i emisije CO ₂ po strategijama i slučajevima	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>CHP</i>	-	Kogeneracijsko postrojenje
<i>COP</i>	-	Faktor grijanja dizalice topline (toplinski množitelj)
<i>C_{CO2}</i>	<i>EUR/t_{CO2}</i>	Naknada za emisije CO ₂
<i>C_{el}</i>	<i>EUR /MWh</i>	Cijena električne energije
<i>C_{pl}</i>	<i>EUR /MWh</i>	Cijena prirodnog plina
<i>C_{topl,chp}</i>	<i>EUR/MWh</i>	Trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije iz kogeneracije
<i>C_{topl,DT}</i>	<i>EUR/MWh</i>	Trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije iz dizalice topline
<i>C_{topl,pk}</i>	<i>EUR /MWh</i>	Trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije iz plinskog kotla
<i>C_{VOM,chp}</i>	<i>EUR /MWh</i>	Varijabilni troškovi pogona i održavanja kogeneracijskog postrojenja
<i>C_{VOM,pk}</i>	<i>EUR/MWh</i>	Varijabilni troškovi pogona i održavanja plinskog kotla
<i>C_{VOM,DT}</i>	<i>EUR /MWh</i>	Varijabilni troškovi pogona i održavanja dizalice topline
<i>C_i^{VO&M}</i>		Varijabilni troškovi pojedinog postrojenja
<i>DT</i>	-	Dizalica topline
<i>K_i</i>	<i>tonaCO₂/MWh_t</i>	Označava intenziteta emisija CO ₂ pojedinog postrojenja
<i>L_i</i>	<i>MWh_e/MWh_t</i>	Omjer električne i toplinske energija (kod kogeneracije)
<i>m_{CO2,chp}</i>	<i>tona</i>	Ukupna emisija CO ₂ iz kogeneracijskog postrojenja
<i>m_{CO2,pk}</i>	<i>tona</i>	Ukupna emisija CO ₂ iz plinskog kotla
<i>O_i</i>		Opterećenje postrojenja
<i>PK</i>	-	Plinski kotao
<i>s^{pp}</i>	<i>MWh</i>	Punjenje ili pražnjenje toplinskog spremnika
<i>s^{razina}</i>	<i>MWh</i>	Razina napunjenosti spremnika
<i>SS</i>	<i>°C</i>	Stupanj sat
<i>STP</i>	<i>MWh</i>	Satno toplinsko opterećenje sustava
<i>UPT</i>	<i>MWh</i>	Ukupna proizvedena toplinska energija iz toplana i kogeneracija
<i>USTP</i>	<i>MWh</i>	Ukupno satno toplinsko opterećenje sustava
<i>q_{pl,chp}</i>	<i>MWh</i>	Potrošnja goriva (prirodnog plina) kogeneracijskog postrojenja
<i>q_{pl,pk}</i>	<i>MWh</i>	Potrošnja goriva (prirodnog plina) plinskog kotla
<i>Q_{CHP}</i>	<i>MW</i>	Toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja
<i>Q_{CHP,nom}</i>	<i>MW</i>	Nazivna toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja
<i>Q_{DT}</i>	<i>MWh</i>	Toplinska energija dobivena dizalicom topline
<i>Q_{DT,el}</i>	<i>MWh</i>	Električna energija potrebna za pogon dizalice topline
<i>Q_{el,chp}</i>	<i>MWh</i>	Proizvedena električna energija iz kogeneracije

Q_{opt}	<i>MWh</i>	Toplinsko opterećenje sustava
Q_{PK}	<i>MWh</i>	Proizvedena toplinska energija plinskog kotla
$Q_{PK,nom}$	<i>MW</i>	Nazivna toplinska snaga plinskog kotla
$Q_{topl,chip}$	<i>MWh</i>	Proizvedena toplinska energija kogeneracijskog postrojenja
$Q_{topl,pk}$	<i>MWh</i>	Proizvedena toplinska energija plinskog kotla
Q_u	<i>MWh</i>	Ukupno satno toplinsko opterećenje sustava
Q_v	<i>MWh</i>	Vršno satno toplinsko opterećenje sustava
$T_{projektna}$	$^{\circ}C$	Projektna temperatura prostora
TS	-	Toplinski spremnik
$T_{vanjska}$	$^{\circ}C$	Vanjska temperatura zraka
Φ_B	<i>MW</i>	Nazivna toplinska snaga baznih jedinica
Φ_V	<i>MW</i>	Nazivna toplinska snaga vršnih jedinica

SAŽETAK

Sve veći udio varijabilnih obnovljivih izvora u elektroenergetskom sustavu te zahtjevi za ograničenje CO₂ emisija značajno mijenjaju način vođenja postojećih postrojenja u elektroenergetskom i toplinarskom sustavu. Kako sektor grijanja zauzima veliki udio u ukupnom broju emisija, potrebno je pronaći opcije koje će pridonijeti njihovom smanjenju. Uz to, navedena varijabilnost i sve veća zastupljenost obnovljivih izvora energije smanjuje broj radnih sati konvencionalnim postrojenjima. Budući da se potpuni prelazak na obnovljive izvore energije i izbacivanje fosilnih ne može dogoditi naglo, u ovom vremenu energetske tranzicije je potrebno pronaći rješenja i osigurati veću fleksibilnost postojećih postrojenja kako bi se zadržala njihova konkurentnost. U ovom radu je analizirano ponašanje sustava daljinskog grijanja koje uključuje tri različita tipa toplinskih izvora; kogeneracijsko postrojenje, dizalice topline i plinske kotlove. Uspoređene su tri različite strategije vođenja s ciljem postizanja što nižih troškova odnosno većeg profita. Strategije vođenja su redom bile zasnovane na različitim cjenovnim pragovima, na matematičkoj optimizaciji pogona s toplinskim spremnikom dok se u posljednjoj optimirao pogon s velikim toplinskim spremnikom, toplovodnom mrežom ustava daljinskog grijanja. Nadalje, iste te strategije su uspoređene i za slučaj povećanja cijena električne energije na veleprodajnom tržištu. Uz to je prije samih simulacija proračunat profil toplinskog opterećenja te cijene električne energije kako bi se mogao odabrati vremenski period za koji će se provesti simulacija. Na posljetku su izračunati prihodi i rashodi za svaku razmatranu strategiju te je iznijeta njihova analiza i usporedba.

Ključne riječi: daljinsko grijanje, strategije vođenja, fleksibilnost, kogeneracija, dizalica topline, toplinski spremnik, plinski kotao

SUMMARY

Growing share of variable renewable sources in the electricity system and the requirements for CO₂ emissions reduction significantly affect existing plants in the electricity and heating system. As the heating sector accounts for a large share of the total number of emissions, it is necessary to find solutions that will contribute to their reduction. Moreover, this variability and the increasing portion of renewable energy sources reduces the number of operating hours of conventional plants. Since the complete transition to renewable energy and fossil fuels be implemented abruptly, it is necessary to find solutions and ensure greater flexibility of existing plants in order to maintain their competitiveness in the ongoing energy transition. This thesis analyses the behaviour of a district heating system that includes three different types of heat sources; cogeneration plant, heat pumps and gas boilers. Additionally, a comparison of three different operating strategies was made with in order to achieve the lowest possible costs and higher profits. Strategies were based as follows: on electricity price thresholds, on linear programming and the latter included a large heat tank represented by the district heating network. Furthermore, same strategies were simulated in the case of an increase in wholesale market electricity price. In addition, as a basis for simulations, the heat load profile and electricity prices were calculated in order to select the time period for which the simulation was be performed. Finally, revenue and expenses were calculated, and their analysis and comparison presented.

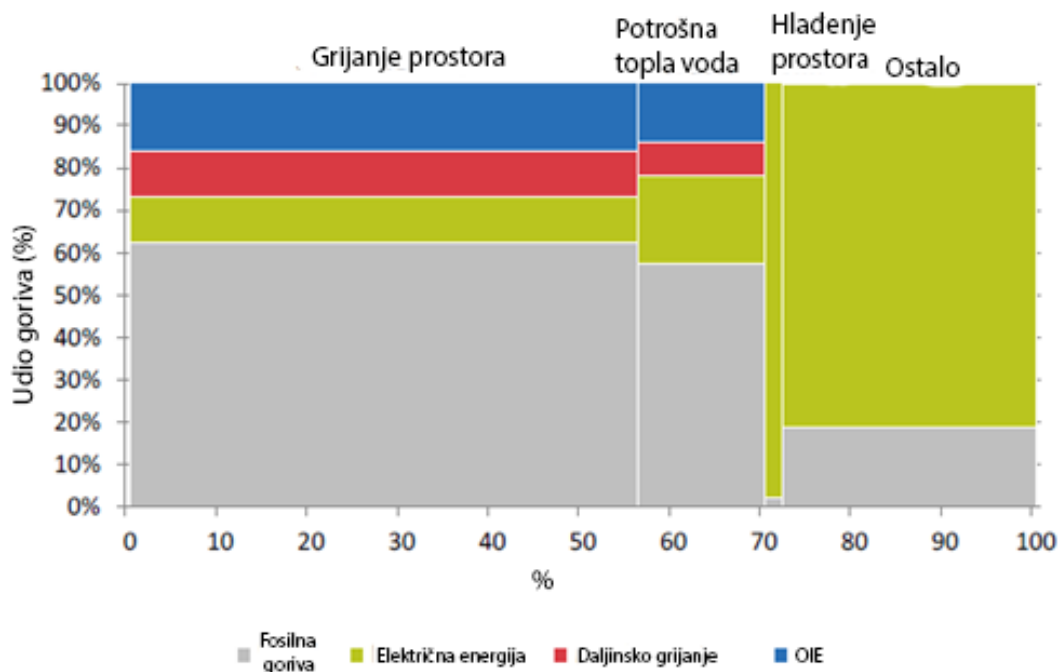
Key words: district heating, operation strategies, flexibility, cogeneration, heat pump, heat storage, gas boiler

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina energetska sustava prolazi kroz tranziciju ponajprije u segmentu proizvodnje i distribucije energije. Potreba za uvođenjem tih promjena proizlazi iz uviđanja štetnih posljedica pogona većine postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije. Naime, konvencionalna postrojenja, poput termoelektrana i toplana na fosilna goriva, tijekom pogona emitiraju stakleničke plinove koji pridonose globalnom zagrijavanju. Kako bi se ublažile klimatske promjene koje se događaju, postavljaju se brojni zahtjevi na izvedbu i pogon tih postrojenja te se isto tako teži korištenju obnovljivih izvora energije (OIE) umjesto fosilnih. Međutim, obnovljivi izvori, kao što su vjetar i Sunčeva energija iako zauzimaju sve veći udio u proizvodnji električne energije, ne mogu pratiti krivulju njene potrošnje. Razlog tome je njihova ovisnost o vremenskim prilikama odnosno neprilikama pa tako još uvijek ne mogu biti pouzdan izvor električne energije. Zbog toga konvencionalne elektrane koje nemaju problem intermitentnosti još su uvijek značajne za proizvodnju energije za zadovoljavanje potreba. Jedan od mogućih načina smanjenja odnosa emisija i proizvedene energije iz takvih postrojenja je proizvodnja toplinske uz električnu energiju tj. kogeneracija čime se povećava učinkovitost postrojenja čija će primjena biti detaljnije opisana u nekim od sljedećih poglavlja.

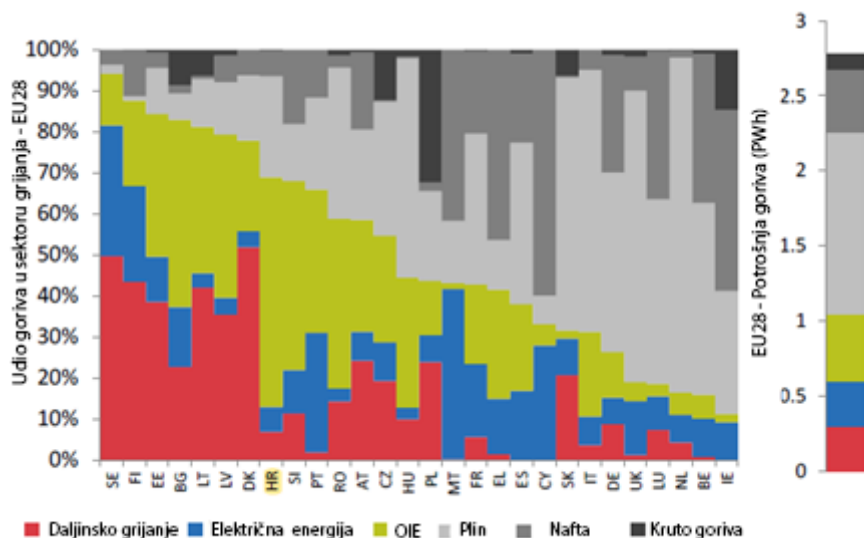
Ukoliko se promatra udio emisija po sektorima, sektor zgradarstva s iznosom od 40 % [1] zauzima najveći udio finalne potrošnje energije u EU. U tome veći dio zauzimaju stambeni prostori (54 %), a slijedi ih industrija (24 %) i uslužni objekti (21 %). Zbog tako velikog iznosa je taj sektor poprimio veliku važnost u europskoj energetska politici jer se njegovim poboljšanjem u smislu smanjenja emisije donosi veliki potencijal postizanja klimatski neutralne Europe do 2050. godine. Procijenjeno je kako će oko 80 % današnjih zgrada biti postojano i te ciljne godine pa je potrebno smanjiti njihovu potrošnju energije. To se može postići na više načina; boljom toplinskom izolacijom zgrada, pametnim uređajima ili sustavima energetske menadžmenta. Međutim, to nije dovoljno za drastično smanjivanje emisija ako se uz to ne promjeni i način proizvodnje potrebne energije. Između ostalog se to velikim dijelom odnosi na korištenje obnovljivih izvora za grijanje uz mogućnost korištenja električne energije (dobivene iz isto tako iz obnovljivih izvora) te implementaciju daljinskog grijanja koje također treba sadržavati obnovljive izvore. Potencijal za poboljšanje u smislu smanjenja emisija se može uočiti sa slike 1 gdje je prikazana koja vrsta goriva se i na koji dio troši u sektoru zgradarstva. Više od dvije trećine energije se koristi za grijanje prostora i potrošne tople vode. Uočljivo je da trenutno fosilna goriva zauzimaju najveći udio u proizvodnji energije za potrebe

grijanja (62 % grijanje prostora i 57 % za pripremu potrošne tople vode). To vrlo dobro ukazuje na potencijal koji ima ovaj sektor u smanjenju emisija CO₂. Iz prikaza se također može uočiti kako daljinsko grijanje zauzima tek oko 10 %, a obnovljivi izvori oko 15 %.



Slika 1 Udio korištenja određenim toplinskih izvora za namirenje određenih toplinskih potreba u sektoru zgradarstva u EU [2]

Pregled trenutnog stanja u sektoru grijanja u EU prikazuje slika 2 gdje su države uspoređene prema primjeni različitih izvora za proizvodnju toplinske energije. Prema tome je Švedska s 95 % na prvom mjestu po potrošnji toplinske energije iz nefosilnih izvora, a pri primjeni daljinskog grijanja prednjači Danska. Hrvatska se nalazi u gornjem dijelu poretka zbog velikog udjela obnovljivih izvora energije koji je rezultat rasprostranjene primjene biomase, no ima manje od 10 % udjela daljinskog grijanja [3]. Iz prikaza se može zaključiti da sjevernoeuropske države imaju najveću primjenu sustava daljinskog grijanja, a udio obnovljivih izvora energije je zbog primjene biomase dominantan u državama istočne Europe. Centralnu i zapadnu Europu karakterizira visoki udio plina, a primjena nafte i ugljena koji su "najprljaviji" izvori još uvijek ima veliku ulogu i opskrbi energijom u dijelu država.



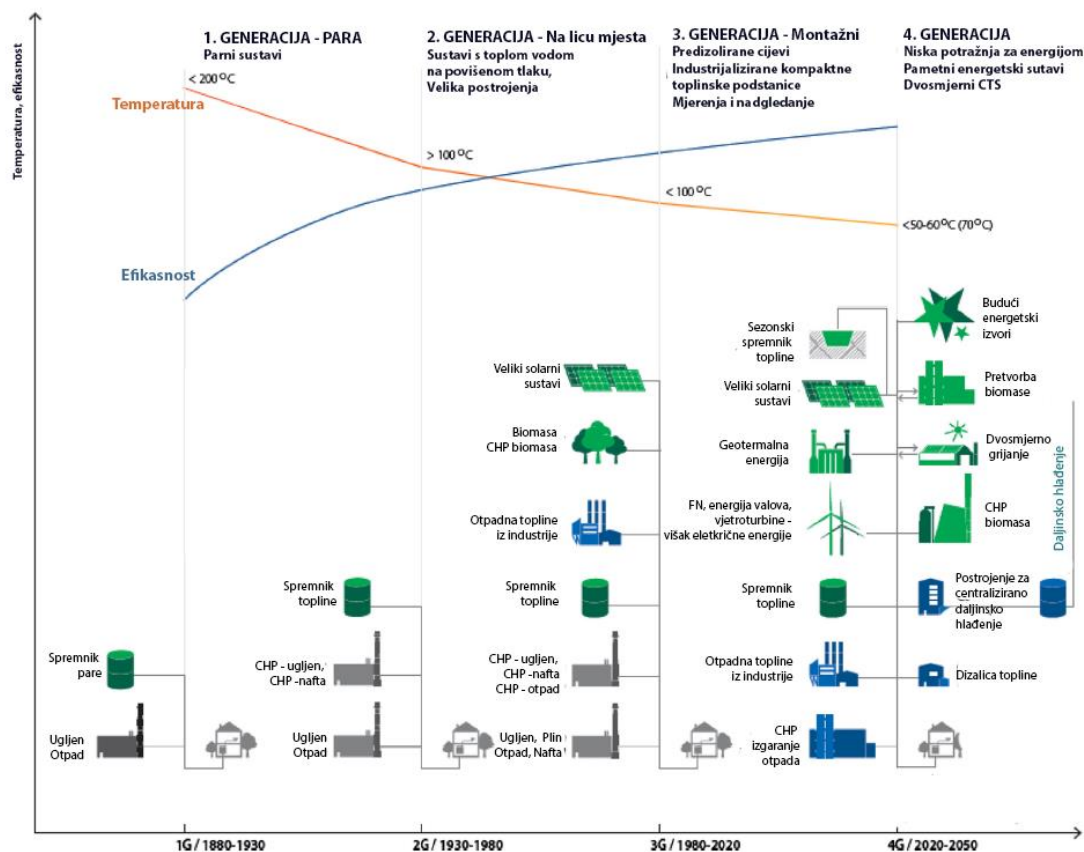
Slika 2 Korištenje pojedinog izvora energije za grijanje prostora (podaci za 2015.godinu) [2]

Osim navedenog, prostora za poboljšanje u sektoru grijanja ima i povećanje učinkovitosti. Naime, omjer isporučene korisne energije i finalne potrošnje energije je još uvijek nizak. On se može povećati korištenjem daljinskog grijanja uz povećan udio električne energije i obnovljivih izvora energije. Sjevernoeuropske države upravo zbog rasprostranjene primjene tih tehnologija imaju najveće stupnjeve učinkovitosti u Europi (i preko 90 % u slučaju Švedske), dok one s većom primjenom fosilnih goriva imaju niže. Hrvatska se nalazi u donjem dijelu ljestvice s učinkovitosti od otprilike 60 % [2].

2. DALJINSKO GRIJANJE

Daljinsko grijanje podrazumijeva centraliziranu proizvodnju toplinske energije te njenu distribuciju potrošačima. Načelno sustav obuhvaća toplanu, pumpe, spremnik topline, postrojenja za pripremu vode te distribucijsku mrežu. Pri tome postoje mnoga postrojenja gdje se toplina proizvodi usporedno s električnom energijom tj. kogeneracijom. Tipične temperature vode na ulazu u mrežu iznose oko 105 °C u zimskim mjesecima, kada je potreba visoka, te oko 80 °C ljeti. Temperatura povrata iznosi između 60 i 80 °C te je poželjno da bude što niža [4].

Razvoj sustava daljinskog grijanja se prema svojim značajkama i korištenim toplinskim izvorima može podijeliti na četiri generacije. Prva se razvila koncem 19. stoljeća te je karakterizira korištenje pare kao medija za prijenos topline. Drugom generacijom se smatra sustav u kojem se prešlo na korištenje vode pod tlakom s temperaturama u polaznom vodu iznad 100 °C. Nakon toga se od 1970-ih pa sve do danas koristi treća generacija koja se od prethodne razlikuje po iznosu polazne temperature koja je niža od 100 °C. Uvođenjem ove generacije se povećala sigurnost opskrbe. Sljedeća generacija koja slijedi će biti okarakterizirana nižim temperaturama (do 70 °C), boljom izolacijom cijevi i većom učinkovitosti. Promatrajući vrijednosti temperatura distribucijske mreže i energetske učinkovitosti sustava, može se zaključiti kako je prisutna tendencija ka smanjenju temperatura u sustavu uz povećanje energetske učinkovitosti. Osim toga, s godinama se koriste različiti izvori energije prikazani na slici 3. Tako je daljinsko grijanje od sustava koji se sastoji od toplane na ugljen ili otpad zajedno s toplinskim spremnikom preraslo u mnogo kompleksniji sustav koji u današnje vrijeme primarno teži ka smanjenju emisija CO₂ i povećanju sigurnosti opskrbe.



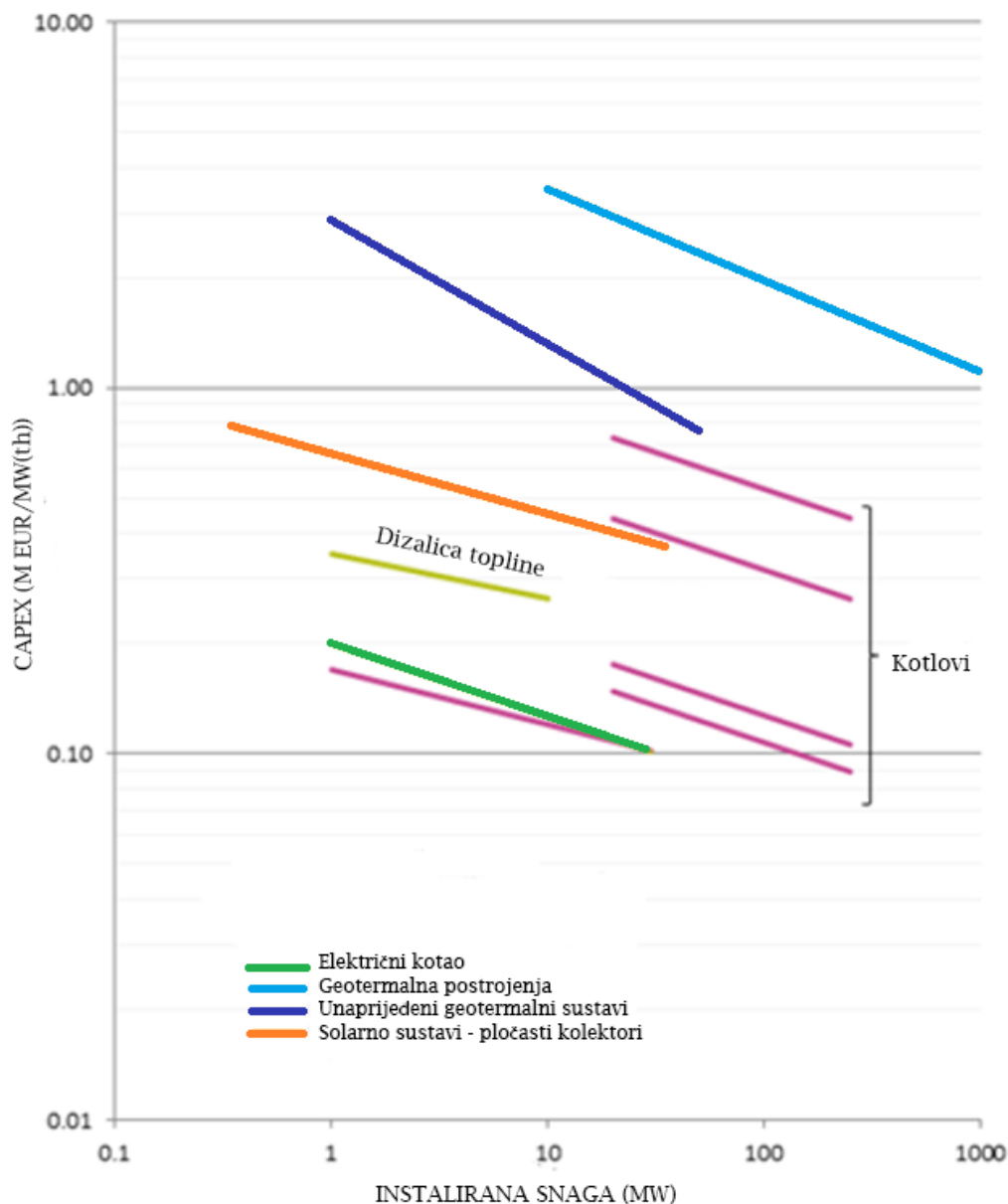
Slika 3 Razvoj sustava daljinskog grijanja [5]

Neke od prednosti korištenja centralnih toplinskih sustava su vrlo visoka pouzdanost opskrbe krajnjih kupaca zbog korištenja više vrsta goriva i izvora u sustavu, distribucija toplinske energije putem vrele/tople vode nema negativan utjecaj na okoliš, smanjenje emisije štetnih plinova te visokoučinkovita proizvodnja s obzirom na potrebe krajnjih kupaca [6].

Kako bi sustav bio konkurentan, potrebno ga je instalirati na području s relativno visokim i predvidivim toplinskim opterećenjem te ugraditi jeftini toplinski izvor. Međutim, prepreka koja koči razvoj i širenje ovih sustava je potreba za gradnjom distribucijske mreže. Ukoliko su krajnji potrošači previše udaljeni od izvora, toplinski gubici i investicijski troškovi su veći. Konkurentnost toplinske energije u narednom razdoblju ovisit će o mnogo faktora, dinamici energetske obnove zgrada, rekonstrukciji i obnovi mreža, raspoloživim resursima za proizvodnju topline bez emisija, cijenama emisija CO_2 te interesu novih potrošača toplinske energije. Mogućnost razvoja sustava četvrte generacije se, osim s korištenjem obnovljivih toplinskih izvora te snižavanjem temperature, povećava i s povećanjem udjela energetski obnovljenih i novih zgrada [7].

2.1. Izvori topline u sustavu daljinskog grijanja

Toplinski izvori u krugu daljinskog grijanja mogu biti različiti ovisno o području, zahtjevima mreže te odabiru investitora. Izvori koji se primjenjuju su industrijski otpad, geotermalna energija, sunčeva energija, fosilna goriva te električna energija (dizalice topline, električni kotlovi). Sa slike 4 se može uočiti kako je isplativije koristiti proizvodna postrojenja što većih kapaciteta.



Slika 4 CAPEX raznih postrojenja u sustavu daljinskog grijanja [2]

Također je vidljivo da plinski kotlovi mogu postići najveće snage, a u novije vrijeme geotermalna postrojenja premašuju te snage. Dizalice topline imaju nešto više troškove i niže

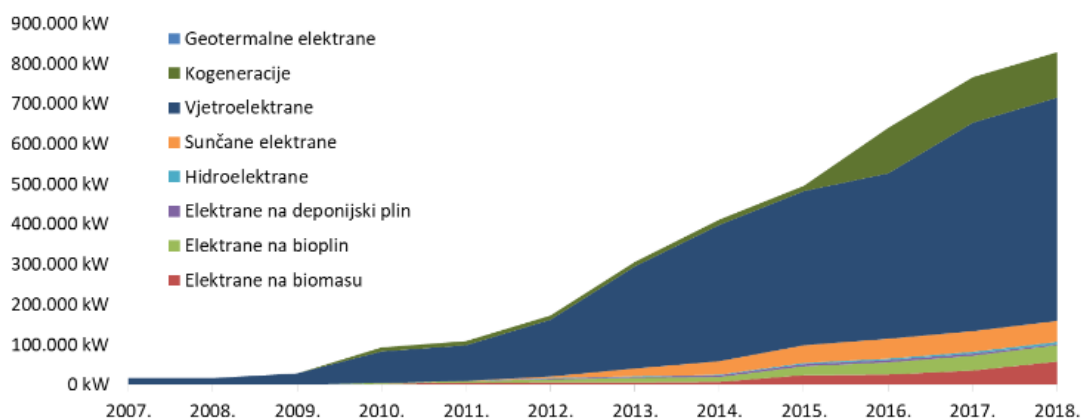
iznose snage, ali im je potencijal za ugradnju velik jer omogućava smanjenje emisija CO₂ i imaju niske troškove pogona u uvjetima niskih cijena električne energije. Električni bojleri s druge strane imaju niže investicijske troškove, ali im je potrošnja električne energije po MWh proizvedene toplinske viša u usporedbi s onom kod dizalice topline te su im zbog toga troškovi pogona veći.

U nastavku će se u osnovnim crtama detaljnije prikazati toplinski izvori relevantni za ovaj rad u kontekstu sustava daljinskog grijanja.

2.1.1. Kogeneracijska postrojenja

Učinkovit način istovremene proizvodnje topline i električne energije se odvija u kogeneracijskim postrojenjima (*engl. Combined Heat and Power – CHP*). Kogeneracija se može definirati kao sekvencijalno korištenje primarne energije za proizvodnju dva oblika energije; toplinske i mehaničkog rada koji se koristi za generiranje električne energije. Kao pogonsko gorivo se ovisno o raspoloživosti i cijeni goriva koristi prirodni plin, biomasa ili vodik kod gorivih članaka. Tehnologije koje se mogu koristiti su parne i plinske turbine, mikroturbine, motori s unutrašnjim sagorijevanjem, Stirlingov stroj i gorivni članci. Raspon snaga se kreće od 1 kW za Stirlingov stroj do 250 MW za plinske turbine. Postrojenja velikih snaga koje koriste plinske turbine su široko primijenjena tehnologija u sustavima daljinskog grijanja koja se koristi i razvija kroz dugi niz godina. U primjeni su različite konfiguracije i to s protutlačnom turbinom, kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare i plinskom turbinom s korištenjem otpadne topline dimnih plinova. Vođenje pogona kogeneracijskih postrojenja se može provesti na dva načina; tako da radi primarno zadovoljavajući toplinsko opterećenje ili kao elektrana čija se otpadna toplina koristi za grijanje. Istovremeno dobivanje dvije vrste energije donosi visoku ukupnu učinkovitost u odnosu na konvencionalne elektrane gdje je učinkovitost do 50 %. U novije vrijeme se ona kreće i preko 90 %, od čega je 40-50 % toplinske energije i 27-45 % električne energije [8]. Što je veći stupanj učinkovitosti, to je tehnologija povoljnija za korištenje te ima niže emisije stakleničkih plinova po MWh proizvedene energije. U današnje vrijeme se potiče visokoučinkovita kogeneracija koja je prema Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji definirana kao kogeneracijsko postrojenje koje osigurava uštedu primarne energije od najmanje 10 % u usporedbi s referentnom odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije. U istom zakonu je navedeno da su korištenje OIE

i visokoučinkovite kogeneracije od interesa za Republiku Hrvatsku te je proizvodnja električne energije iz tih izvora u sustavu subvencioniranja kao povlaštenih proizvođača čime je njihova konkurentnost na tržištu povećana [9]. Zbog toga osim instalacije obnovljivih izvora energije u posljednjih nekoliko godina raste i instalacija kogeneracijskih postrojenja kao što se može vidjeti na slici 5.



Izvor: HROTE

Slika 5 Instalirana snaga postrojenja u sustavu poticaja u RH u razdoblju od 2007. do 2018. godine

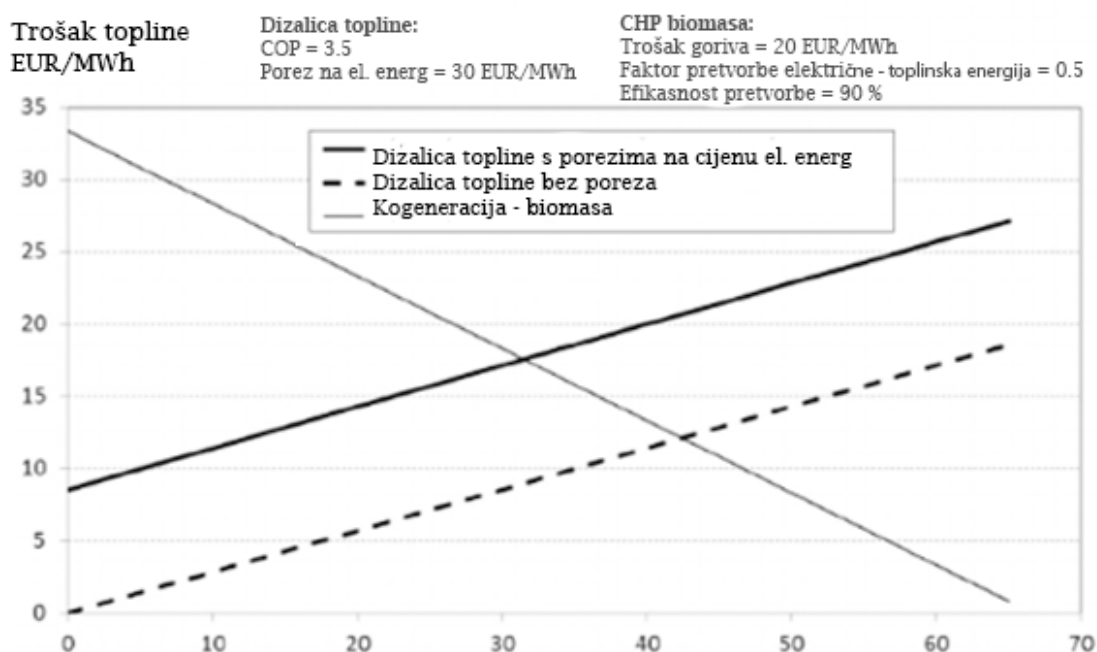
Iako se kogeneracija u sustavima daljinskog grijanja navodi kao prijelazna tehnologija [10], u Republici Hrvatskoj će se zasigurno zadržati dulje nego u skandinavskim državama te je potrebno osigurati njeno optimalno vođenje kako bi se na postojećem i budućem tržištu osigurala njena konkurentnost.

2.1.2. Dizalica topline

Dizalice topline (DT) koriste električnu ili toplinsku (apsorpcijske dizalice topline) energiju kao primarni izvor energije za proizvodnju toplinske. Uobičajeno se toplinski množitelj (COP, *engl. coefficient of performance*) dizalica topline u sustavima daljinskog grijanja kreće od 1,7 do 3,8, s time da se zahvaljujući kontinuiranom razvoju kod novijih izvedbi postižu i više vrijednosti [11]. Najviša vrijednost od 6,34 je postignuta na jednoj češkoj lokaciji gdje je dizalica topline od 1 MW pogonjena na otpadnu toplinu uz korištenje amonijaka kao radne tvari. U Europi se nalazi 149 sustava s ugrađenim dizalicama topline velikih snaga čiji ukupni toplinski kapacitet iznosi više od 1580 MW. Pretežito se koristi R134a kao radna tvar, a nakon toga slijedi amonijak (NH₃). Kao toplinski izvor, kod velikih sustava je najzastupljenija voda i to u najvećoj mjeri kanalizacijska otpadna voda te voda iz jezera i mora. Kod apsorpcijskih

uređaja koristi se otpadna toplina iz različitih postrojenja i procesa [12]. Prosječna instalirana snaga velikih dizalica topline u Europi trenutno iznosi oko 11 MW [13], a raspon raspoložive snage je između nekoliko kW pa sve do 25 MW toplinske snage u državama gdje je dopušteno korištenje HFC (*engl. hydrofluorocarbons*) radnog medija u kompresijskim dizalicama topline s turbokompresorima [14].

Od prve velike dizalice topline (*engl. large scale heat pump*) instalirane 1981. u Švedskoj, razvoj tehnologije današnjih dizalica topline je postigao zadovoljavajuću razinu za primjenu u postojećim i budućim mrežama daljinskog grijanja. Pri tome je potrebno odabrati prihvatljiv radni medij kako bi se smanjio nepovoljan utjecaj na okoliš. Izvedbe trebaju omogućiti često uključivanje i isključivanje iz pogona odnosno prilagodbu intermitentnoj proizvodnji obnovljivih izvora energije. Instalirane dizalice topline u državama sjeverne Europe, gdje ih se i većinom nalazi, rade prema različitim načinima vođenja ovisno o lokaciji. Jasna uloga u sustavima daljinskog grijanja zbog toga još nije identificirana. Neke od onih instaliranih od 2011. - 2016. godine rade kao bazni izvor od 7000 - 8000 sati godišnje i to većinom iz razloga da se postigne što kraći period povrata investicije. Drugi dio dizalica topline radi kao sekundarni izvor s 4000 - 7000 sati godišnje i to većinom u sezoni grijanja. Trenutačno vrlo mali dio njih funkcionira intermitentno prema cijeni električne energije jer nisu projektirane za neograničen broj ciklusa pokretanja i obustave rada [12]. Međutim, smatra se da je pogon u intermitentnim režimima neophodan za konkurentnost takvih sustava. Što se tiče konkurentnosti u odnosu na kogeneracijska postrojenja, bitno je spomenuti problematiku vezanu za cijene električne energije. Naime, s velikim dodacima na veleprodajnu cijenu električne energije koja se koristi kod ovih dizalica topline, troškovi proizvodnje topline se povećavaju. To se dobro vidi na slici 6 koja je preuzeta iz primjera Švedske, države s velikim udjelom ovakvih sustava. Iznos poreza i naknada je različit ovisno o državi, a ukoliko je razlika između tih iznosa bez i s naknadama velika, sjecište krivulja CHP (kogeneracija, *engl. Combined Heat and Power*) i DT se nalazi pri nižem iznosu cijene električne energije na veleprodajnom tržištu što može smanjiti broj sati rada dizalice topline. Zbog ovakvog odnosa je povoljno imati u sustavu i kogeneraciju i dizalicu topline, pogotovo pri velikim iznosima poreza na električnu energiju i razlikama između najviše i najniže vrijednosti cijene [15].



Slika 6 Varijabilni troškovi proizvodnje toplinske energije pri različitim cijenama električne energije [15]

2.1.3. Plinski kotao

U plinskim kotlovima se kemijska energija plinskog goriva pretvara u toplinsku koja služi za zagrijavanje vode. Ukoliko se ona samo zagrijava, uređaji su nazvani toplovodni kotlovi, a u slučaju proizvodnje pare se nazivaju generatori pare. Toplovodni kotlovi se mogu koristiti kao manje jedinice za grijanje zasebnih stambenih, poslovnih i industrijskih objekata, ali i kao izvor topline u centraliziranom toplinskom sustavu. Pri korištenju plinskog kotla u centraliziranom sustavu sa svrhom namirivanja vršnog toplinskog opterećenja se mogu koristiti toplovodni vatrocijevni kotlovi pri temperaturi vode u sustavu od 80 °C do 150 °C ili kondenzacijski kotlovi ukoliko je temperatura vode niža [13]. Učinkovitosti ovih postrojenja se u novije vrijeme kreću i preko 97 % .

Iako plinski kotlovi zbog korištenja fosilnog goriva dugoročno nemaju budućnost u elektroenergetskom sustavu, prirodni plin je u RH zastupljen u velikoj mjeri i smatra se tranzicijskim gorivom pa će se izgledno koristiti u energetsom sustavu RH još niz godina [7]. Zbog toga se i korištenje ovakvih postrojenja na fosilna goriva treba još uvijek analizirati te im pravilnim vođenjem smanjiti iznos emisija.

2.2. Fleksibilnost u sustavima daljinskog grijanja i veza s elektroenergetskim sustavom

Definicija fleksibilnosti nije jednoznačna. U širem kontekstu može se definirati kao prolazna sposobnost elektroenergetskog sustava da apsorbira višak ili nadoknadi manjak opskrbe energijom. Različite fleksibilnosti na strani opskrbe se prema [2] mogu podijeliti u tri kategorije:

- Prijenos energije u vremenu: Spremnik energije
- Prijenos energije u prostoru: Interkonekcija
- Smanjivanje potrošnje energije

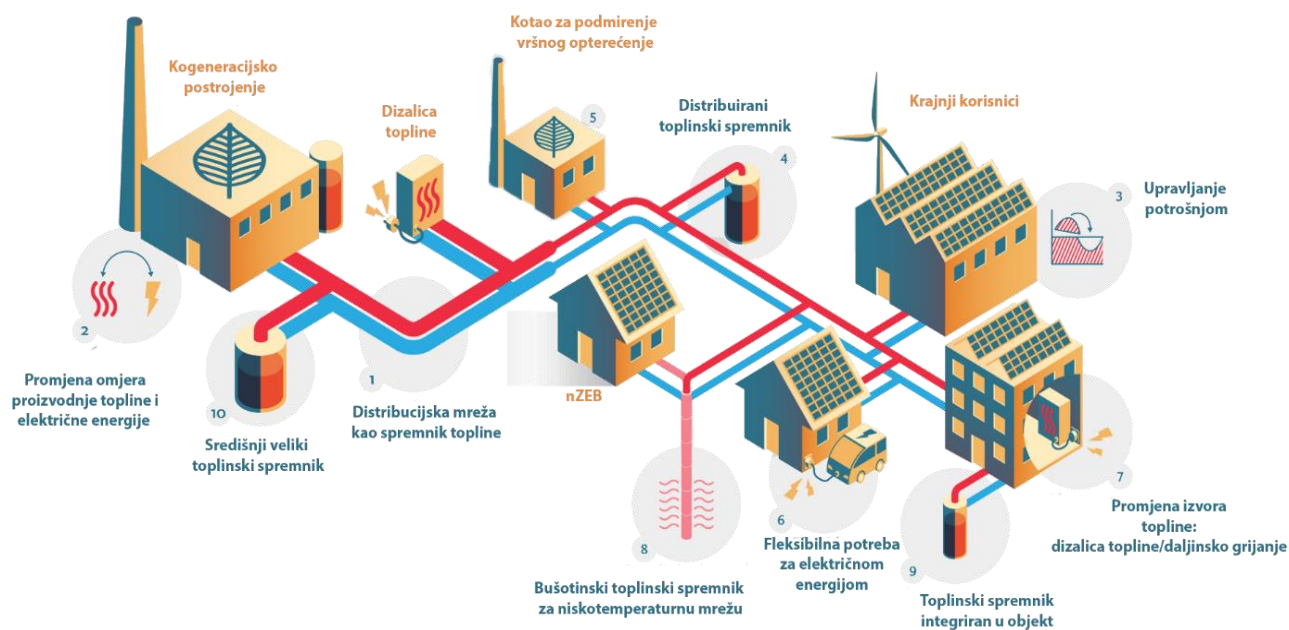
Prema [16] pojam fleksibilnosti je definiran kao mjera za održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne energije te je potrebno uravnotežiti varijabilnost u proizvodnji i potrošnji. Opskrba energijom se smatra fleksibilnom kada ima mogućnost regulacije povećanja ili smanjenja proizvodnje ili potrošnje energije. To se može rješavati na lokalnoj razini ili razmjenom sa susjednim regijama ili državama.

U budućnosti će fleksibilnost biti nužna kako bi se mogli integrirati veći kapaciteti varijabilnih izvora energije na siguran i isplativ način te će se time ujedno i zadovoljiti zahtjevi smanjenja emisija. Fluktuirajuća potreba za energijom u kombinaciji s također intermitentnom proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora može predstavljati problem za energetska tržišta. Rješenja s dinamičkim daljinskim grijanjem s kogeneracijskim postrojenjima mogu pružiti takvim postrojenjima prilagodbu raznim tržištima električne energije kao što su dan unaprijed, unutardnevno te tržište pomoćnih usluga. Konvencionalna kogeneracijska postrojenja su vođena tako da se zadovolji toplinsko opterećenje mreže, a proizvedena električna energija proda tržištu. Dinamičke mreže daljinskog grijanja omogućavaju isplativije sudjelovanje na tržištu s vrlo promjenjivim cijenama električne energije i tako donose korist i elektroenergetskom sustavu (EES) i samom investitoru [17].

U EES su prisutne elektrane koje za pogon koriste različite izvore energije te sukladno svojim radnim karakteristikama imaju drugačiju ulogu u zajedničkoj opskrbi mreže. Uloge koju pojedina elektrana može poprimiti u mreži su da radi kao temeljna, vršna ili pa prati predvidive promjene opterećenja [18]. Konvencionalne termoelektrane će se u budućnosti sve manje koristiti kao bazne te će morati smanjiti broj pogonskih sati na 2000 - 3000 sati godišnje. Na njihov rad se nameće zahtjev povećanja fleksibilnosti i to u smislu bržeg odaziva promjene

snage, frekventnije i brže obustave rada i pokretanja te veći gradijenti opterećivanja. Također će se morati povećati pogonski raspon tako da se snizi granica tehničkog minimuma.

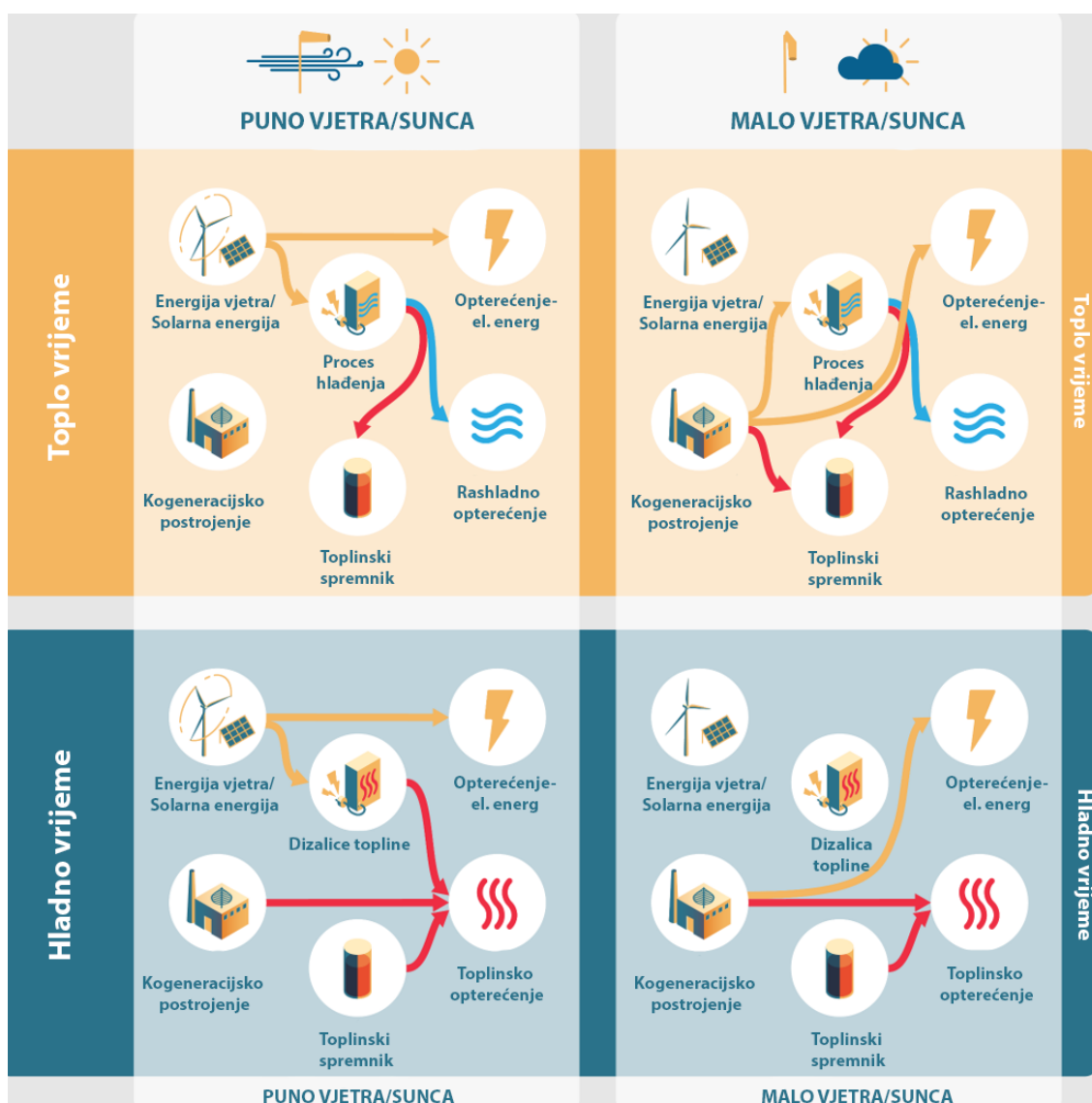
Sve veća primjena varijabilnih OIE donosi sve veće mogućnosti za primjenu viška energije. Jedan od pogodnih načina korištenja te električne energije je za pogon dizalica topline i električnih kotlova ugrađenih u sustav daljinskog grijanja. Toplina proizvedena na taj način se može izravno iskoristiti u mreži, ukoliko postoji potreba za toplinom, ili se pohraniti u spremnik topline te koristiti kasnije. Zbog velikog kapaciteta daljinskog grijanja, može se različitim vođenjem sustava sudjelovati na tržištu električne energije te pružanja pomoćnih usluga. Korelacija između vršne proizvodnje električne energije iz vjetroturbina zimi te potreba za toplinom je generalno pozitivna. Time se transformacija električne u toplinsku energiju, tzv. *power to heat*, u mrežama daljinskog grijanja pokazuje kao isplativa opcija u odnosu na ostale kao što su baterije ili proizvodnja sintetskog plina, tzv. *power to gas*. Povezivanje elektroenergetskog i toplinskog sustava zajedno sa skladištenjem energije omogućava značajno smanjenje vršnih iznosa električne energije, maksimizira primjenu OIE te povećava učinkovitost cijelog sustava opskrbe energijom. Cilj je smanjiti odstupanje između profila opterećenja i opskrbe alternativnih izvora energije te zauzvrat smanjiti korištenje fosilnih goriva u vršnom opterećenju zimi te izbjeći konkurenciji u opskrbi tijekom ljeta. Nova rješenja trebaju poboljšati isplativost skladištenja energije i/ili poboljšati integraciju na strani korisnika u vidu uvođenja pametnog sustava zgrade koji nudi fleksibilnost. Načini ostvarivanja fleksibilnosti u budućim toplinskim sustavima su prikazani na slici 7. Može se uočiti da je fleksibilnost smještena na više mjesta u mreži. Prikazani primjeri su budućnost mreža, a obuhvaćaju korištenje distribucijske mreže kao spremnika topline, reguliranje omjera proizvodnje topline i električne energije u kogeneracijskom postrojenju, upravljanje potrošnjom, distribuirane toplinske spremnike, fleksibilnu potrebu za električnom energijom, promjenu izvora topline na mjestu krajnjih potrošača - dizalica topline/daljinsko grijanje, bušotinski toplinski spremnik za niskotemperaturnu mrežu, toplinske spremnike integrirane u zgrade te veliki središnji toplinski spremnik.



Slika 7 Izvori fleksibilnosti u sustavu daljinskog grijanja [19]

Slika 8 zorno prikazuje redosljed korištenja različitih energetskih izvora ovisno o količini OIE i opterećenju. Narančastim strelicama je označen tok električne energije, crvenim toplinske, a plavim rashladne. Tako se mogu izdvojiti četiri slučaja. Za vrijeme ljeta kada nema potrebe za grijanjem već samo hlađenjem, različit način vođenja se može primijeniti s obzirom na količine vjetra i sunca. Kad je insolacija velika i ima dovoljno vjetra za pogon vjetroturbina, dobiva se velika količina električne energije iz tih obnovljivih izvora te se ona jednim dijelom koristi za namirivanje opterećenja sustava, a drugim za pogon kompresora dizalice topline kojom se ostvaruje hlađenje medija u sustavu. Pri višku energije, kogeneracijsko postrojenje je u izvan pogona jer potrebe za toplinskom energijom nema, a isto tako ni za električnom jer obnovljivi izvori energije namiruju opterećenje. U periodu toplog vremena, ali bez dostupnih OIE (vjetra i sunca), u pogon se uključuje kogeneracijsko postrojenje s pojačanom proizvodnjom električne energije koja se koristi za pogon rashladnog uređaja i namirivanje potreba za električnom energijom. Proizvedena toplina se pohranjuje u toplinski spremnik te se može koristiti za potrebe potrošne tople vode. Za vrijeme hladnog vremena se javlja toplinsko opterećenje koje se namiruje iz različitih izvora također u ovisnosti o vremenskim prilikama, odnosno dostupnosti vjetra i sunca. Kada je njihov intenzitet visok, proizvedena energija iz solarnih elektrana i vjetroturbina se koristi za namirivanje potrebe za električnom energijom, a drugim dijelom za pogon postrojenja (dizalica topline ili električni bojler) u kojem se odvija konverzija

iz električne u toplinsku energiju. Kako su potrebe u zimskom periodu visoke, dodatno se koristi toplinska energija pohranjena u toplinskom spremniku te ona proizvedena u kogeneracijskom postrojenju. U slučaju kada su vremenski uvjeti za veću proizvodnju energije iz promatranih elektrana nepogodni, kogeneracijsko postrojenje ima veću ulogu te pod većim opterećenjem proizvodi i električnu i toplinsku energiju. Električnom se namiruju potrebe u elektroenergetskom sustavu, a toplinskom opterećenje, dok se višak sprema u toplinski spremnik i koristi kasnije.



Slika 8 Vođenje sustava daljinskog grijanja u ovisnosti o dostupnosti obnovljivih izvora [19]

2.2.1. Toplinski spremnik

Toplinski spremnici su najrašireniji način pohranjivanja topline koji se koristi na manjoj razini kao što je kućanstvo, ali i većih razmjera u sustavu daljinskog grijanja. U potonjem sezonske i dnevne varijacije toplinskog opterećenja daju poticaj za njihovom ugradnjom. Prema tome se spremnici mogu podijeliti na sezonske i one s dnevnom pohranom energije. Veća profitabilnost se lakše ostvaruje korištenjem spremnika koji se prazne/pune na dnevnoj bazi nego na sezonskoj gdje se godišnje ostvaruje samo jedan protok novca. Iz tog razloga se u sustavima pretežito koriste spremnici koje se koriste na dnevnoj bazi i to najčešće veliki spremnici s vodom [20].

Pohranjivanje toplinske energije ima mnogo prednosti u raznim sustavima, a na razini daljinskog sustava je ono ključno: smanjenje vršnog opterećenja, pružanje sigurnosti opskrbe i optimiziranje troškova tj. povećanje profitabilnosti. Buduće korištenje toplinskih spremnika se može razmatrati u pogledu velikih sezonskih ili manjih koji služe balansiranju elektroenergetskog sustava. Prvi su većim dijelom predviđeni za pokrivanje sezonskih vršnih opterećenja i time smanjivanjem potreba za instalacijom vršnih toplinskih izvora, a drugi za pružanje fleksibilnosti na dnevnoj bazi.

2.2.2. Toplovod – distribucijska mreža

Cjevovod toplinske mreže se može koristiti u svrhu kratkoročne pohrane osjetne topline. Njegova fleksibilnost proizlazi iz korištenja toplinske inercije vode u cjevovodu kako bi se vremenski preraspodijelilo toplinsko opterećenje. Dakle, voda koja se nalazi u cijevima daljinskog grijanja se može dodatno pregrijati u razdoblju manjeg toplinskog opterećenja na strani krajnjih korisnika kako bi se kasnije ta energija iskoristila i smanjio iznos vršnog toplinskog opterećenja. Prema nekim radovima [21] se simulacijama pokazalo da se na ovaj način može dnevna vršna potrošnja smanjiti do 15 % uz nužno povećanje toplinskih gubitaka od 0,3 %. Na taj način se samo promjenom vođenja sustava, odnosno variranjem temperatura u mreži daljinskog grijanja može smanjiti utrošak goriva na godišnjoj razini te time i količina CO₂ emisija. Međutim, pri korištenju ovog pristupa se mora obratiti pažnja na bitna ograničenja koja se nameću, a to su dopušteno povećanje odnosno smanjenje temperature u cjevovodu te sama veličina i svojstva materijala cjevovoda. Učestalo variranje temperatura može dovesti do toplinskog naprezanja i zamora materijala cjevovoda. Tako česta promjena temperatura s ciljem

poboljšanja svojstava sustava može prouzrokovati neželjene posljedice kao što je pucanje cijevi čime se poništava prethodni povoljni učinak ovakvog vođenja [22].

Korištenjem cjevovoda kao dinamičkog spremnika toplinske energije zajedno s kogeneracijskim postrojenjem se ostvaruje korist za postrojenje (odnosno vlasnika) jer omogućava reakciju na različite cjenovne signale s tržišta električne i toplinske energije.

3. ANALIZA PROFILA GODIŠNJEG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA I CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE

3.1. Toplinsko opterećenje

Sezonske promjene u toplinskom opterećenju proizlaze iz sezonskih promjena vanjskih temperatura zraka, a dnevne proizlaze i još dodatno iz različitog socijalnog obrasca ponašanja korisnika u vidu potrošnje vode ili grijanja prostora. Radi nedostupnosti podataka određenog sustava daljinskog grijanja na području grada Zagreba, proveo se proračun za dobivanje satnih profila toplinskog opterećenja korištenjem stupanj-sat analize [13]. Kao ulazne podatke je potrebno poznavati nazivne snage vršne i bazne toplinske jedinice, ukupno toplinsko opterećenje sustava te vanjsku i projektnu temperaturu zraka. Kao potonji ulazni podaci su uzete reprezentativne vrijednosti temperatura iz perioda 2004. - 2013. godine.

Toplinsko opterećenje u pojedinom satu se izračunava pomoću jednadžbe:

$$STP = \left(\frac{UPT}{\sum_1^{8760} SS} \right) \cdot SS \quad (1)$$

Pri tome je:

STP – satno toplinsko opterećenje [MWh],

UPT – ukupna proizvedena toplinska energija iz toplana i kogeneracija [MWh],

SS – stupanj sat [$^{\circ}C$] koji se proračunava pomoću sljedeće jednadžbe :

$$SS = T_{projektna} - T_{vanjska} \quad (2)$$

Gdje je:

$T_{projektna}$ – projektna temperatura na koju se mora grijati prostor te iznosi $21^{\circ}C$

$T_{vanjska}$ – vanjska temperatura zraka [$^{\circ}C$].

Za ukupnu proizvodnju toplinske energije UPT su bili dostupni podaci iz [23] gdje je navedeno ukupna proizvodnja iz 2017. godine koja iznosi 2439780 MWh.

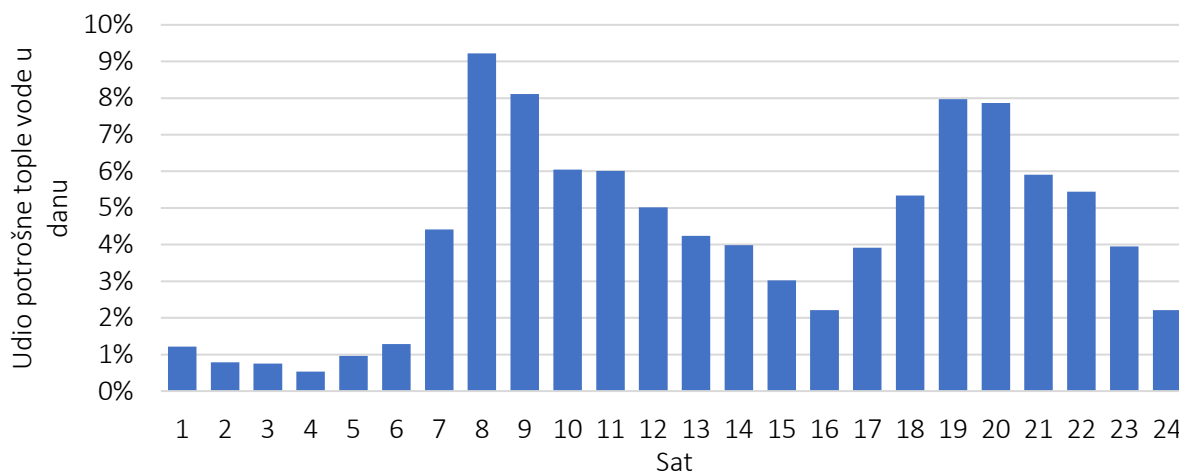
Dodatna ograničenja koja su se uzela u proračun kako bi se dobili vjerodostojniji podaci su:

- Sezona grijanja traje od 1.10. do 1.5 te SS izvan te sezone iznosi 0.
- Grijanje sustava radi od 5 do 23 sati.
- Ako je u sezoni grijanja $T_{vanjska}$ veća od $16^{\circ}C$, grijanje se gasi.

Uzimajući u obzir toplinsko opterećenje za namirivanje potreba potrošne tople vode, ukupno satno opterećenje se može izraziti kao:

$$USTP = STP + PTV \quad (3)$$

Potrošnja tople vode se pretpostavila kao 20 % ukupnog toplinskog opterećenja, a satni profil je modeliran prema [24] te je prikazan na slici 9.



Slika 9 Korištenje potrošne tople vode

Ukupno satno toplinsko opterećenje promatranog sustava se računa prema jednadžbi (4), a vršno toplinsko opterećenje prema (5).

$$Q_u = (\Phi_V + \Phi_B) \cdot \frac{USTP}{maxUSTP} \quad (4)$$

$$Q_v = \left\{ \begin{array}{l} (\Phi_V + \Phi_B) \cdot \frac{USTP}{maxUSTP} - \Phi_B; \text{ ako je } \frac{USTP}{maxUSTP} > \frac{\Phi_V}{\Phi_V + \Phi_B} \\ 0; \text{ ako je } \frac{USTP}{maxUSTP} \leq \frac{\Phi_V}{\Phi_V + \Phi_B} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Gdje je:

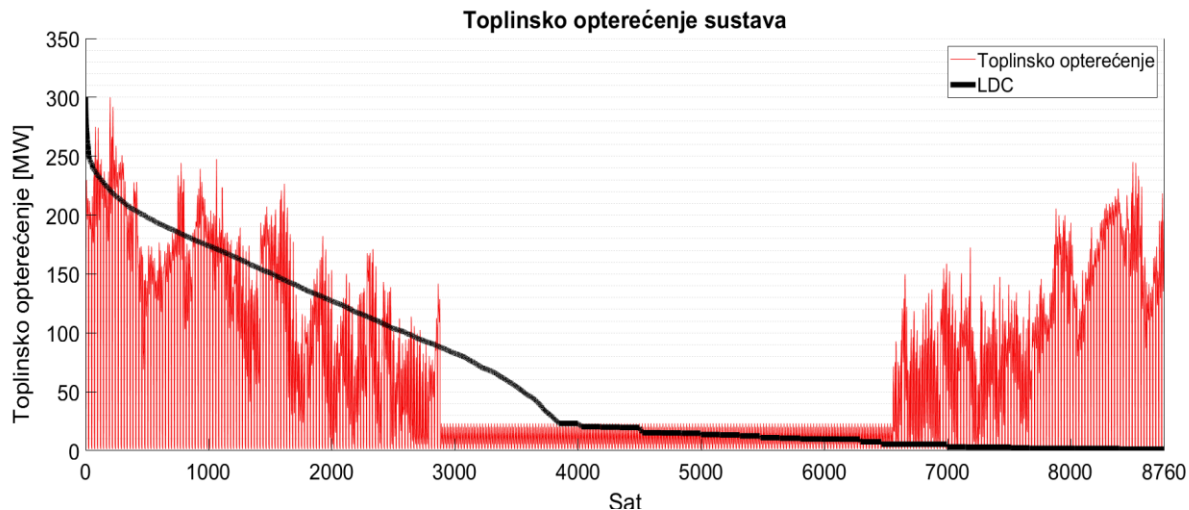
Q_u – ukupno satno toplinsko opterećenje sustava [MWh],

Φ_V – nazivna toplinska snaga vršnih jedinica [MW],

Φ_B – nazivna toplinska snaga baznih jedinica [MW],

Q_v – vršno satno toplinsko opterećenje sustava [MWh].

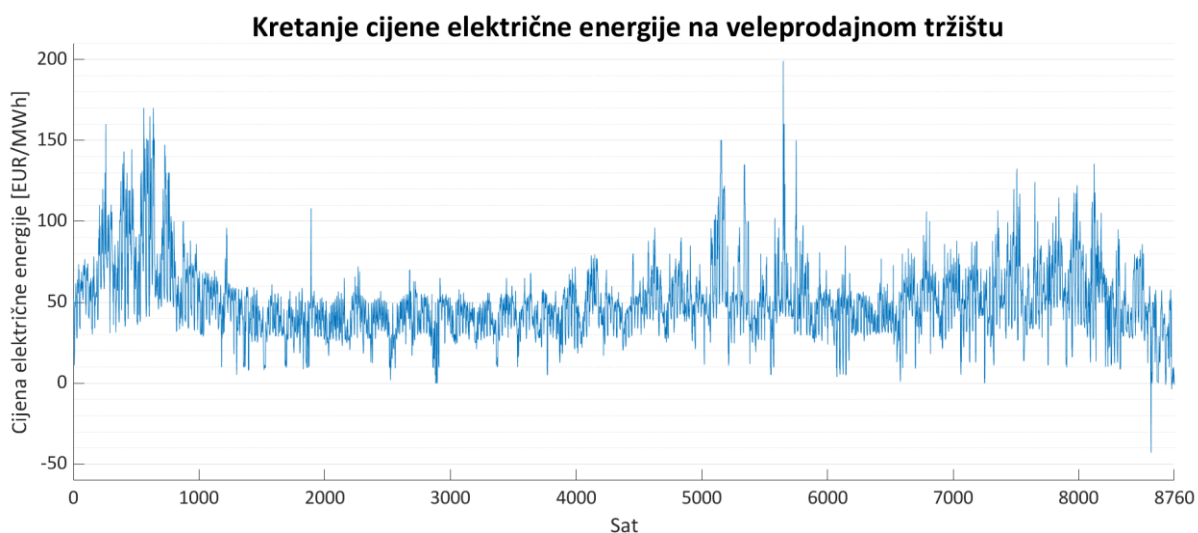
Na temelju izračuna dobivene su satni profili toplinskog opterećenja prikazani zajedno s krivuljom trajanja opterećenja (*engl. Load Duration Curve - LDC*) na slici 10.



Slika 10 Toplinsko opterećenje sustava s LDC krivuljom

3.2. Cijena električne energije

Cijena električne energije na veleprodajnom tržištu je u pravilu različita u svakom satu. Podaci hrvatskog tržišta električne energije CROPEX nisu bili dostupni na godišnjoj razini pa je godišnji profil kretanja cijena energije je preuzet sa slovenske burze [25] te je prikazan na slici 11. Može se uočiti kako su razlike između najniže i najviše godišnje vrijednosti veće od 200 EUR/MWh, gdje minimalna cijena na početku godine poprima negativne vrijednosti i iznosi -42,93 EUR/MWh, a najviša iznosi 199 EUR/MWh. Godišnji prosjek je jednak 49,52 EUR/MWh.

Slika 11 Cijene električne energije¹

¹ Podaci preuzeti s [25] za 2017. godinu

3.3. Odabir reprezentativnih vremenskih intervala simulacija

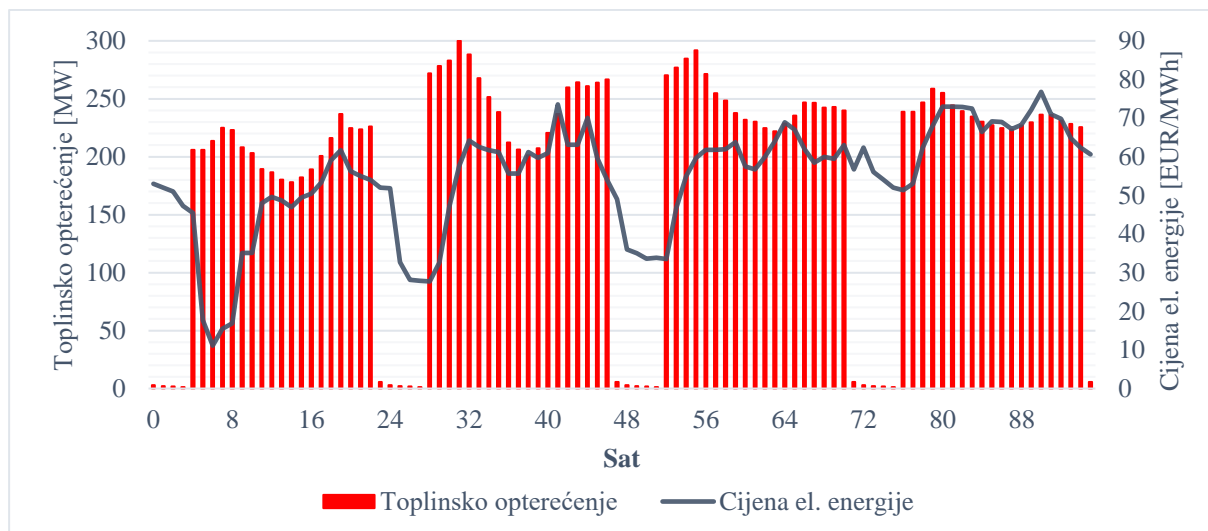
Za potrebe simulacije pogona sustava su se odabrani kraći vremenske periodi kako bi se jasnije vidjelo uključivanje pojedinih postrojenja u rad. Odabran je interval od četiri dana s visokim opterećenjem i niskom cijenom električne energije. Također je još uzet jednak profil s toplinskog opterećenja u uvjetima dvostruko većih cijena jednakim. Za označavanje i lakše snalaženje, u nastavku su navedene strategije i uvjeti:

- **S1: Strategija vođenja definirana prema cjenovnim pragovima**
 - **S1a:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.
 - **S1b:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i dvostruko viša cijena električne energije od S1a) slučaja.
 - **S1c:** Nametnuto nisko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.

- **S2: Strategija vođenja korištenjem optimizacije linearnim programiranjem**
 - **S2a:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.
 - **S2b:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i dvostruko viša cijena električne energije od S2a) slučaja.
 - **S2c:** Nametnuto nisko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.

- **S3: Strategija vođenja korištenjem optimizacije linearnim programiranjem uz dodan velikog spremnika koji predstavlja toplinsku mrežu**
 - **S3a:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.
 - **S3b:** Nametnuto visoko toplinsko opterećenje i dvostruko viša cijena električne energije od S3a) slučaja.
 - **S3c:** Nametnuto nisko toplinsko opterećenje i referentna cijena električne energije koja se pojavljuje u tom razdoblju.

Za referentni slučaj visokog toplinskog opterećenja i postojećih cijena električne energije je odabran period od 169. do 265. sata u godini što predstavlja razdoblje od 7. do 11. siječnja u kojem se za promatrani profil javilo i maksimalno toplinsko opterećenje. Cijene električne energije su uzete one koje su se javile u tim satima, a iznosi su im prikazani na slici 12.



Slika 12 Toplinsko opterećenje i cijena električne energije u promatranom razdoblju

3.4. Odabir vršnih izvora topline

S ciljem pokrivanja vršnih potreba koje se u promatranom sustavu javljaju, odabrana su postrojenja ukupne snage 150 MW. Korištena su dva plinska kotla od 45 MW_t nazivne toplinske snage i tri dizalice topline od 20 MW_t. Korišteni toplinski izvori s pripadajućim karakteristikama su prikazani u tablici 1.

Tablica 1 Izvori topline u promatranom sustavu

	Kogeneracijsko postrojenje	Dizalice topline	Plinski kotlovi
Nazivna toplinska snaga	150 MW _t	3 x 20 MW _t	2 x 45 MW _t
Učinkovitost	Toplinska: 45% Električna: 50%	COP =3,5	87 %

4. STRATEGIJE TROŠKOVNO OPTIMALNOG VOĐENJA

Modeli strategija vođenja su simulirani s promjenama veličina na satnoj razini te su simulacije provedene pomoću programa MATLAB za manje intervale od četiri dana kako bi se zornije prikazao utjecaj cijena i veličine komponenata na pogon postrojenja. Heuristički algoritam za prvu razmatranu strategiju razvijen je na temelju troškova proizvodnje topline iz određenog postrojenja te formulacijom određenih cjenovnih pragova kojima se diktira uključivanje/isključivanje postrojenja ili punjenje/pražnjenje toplinskog spremnika s ciljem ostvarivanja nižih troškova. Druga strategija izvedena je s pomoću linearnog programiranja gdje je optimizacijska funkcija postavljena s ciljem smanjenja troškova u promatranom vremenskom razdoblju. Ovaj pristup koristi cjelokupni razmatrani profil toplinskog opterećenja te se prema tome u određenim intervalima puni ili prazni spremnik, a ne samo prema trenutnom opterećenju kao što se to provodi u prvoj strategiji. Kod trećeg slučaja se uz postojeću konfiguracija sustava dodaje dodatni spremnik topline koji predstavlja distribucijsku mrežu daljinskog grijanja uz ograničenu mogućnost pregrijavanja u određenim razdobljima s ciljevima koji su spomenuti u prethodnim poglavljima. Matematički modeli koji su zajednički svim strategijama su navedeni u nastavku, a svaka strategija je posebno dodatno pojašnjena nakon toga.

4.1. Modeli izvora topline

Matematički modeli komponentni sustava su postavljeni pojednostavljeno s primarnim fokusom na zadovoljavanje toplinskog opterećenja i prikaz troškova koji se javljaju pri pogonu. Jednadžbe koje ih opisuju su linearne kako bi se mogle uvrstiti u funkciju cilja kod linearne optimizacije. Pri tome je potrebno napomenuti kako stvarni sustav nije definiran samo linearnim funkcijama pa je točnost ovog modela smanjena u odnosu na stvarni sustav, ali je ipak zadovoljavajuća za potrebe provođenja usporedbe među različitim strategijama vođenja u ovom radu. U nastavku su navedene jednadžbe i ograničenja svakog pojedinog izvora dok se ostale funkcije za izračun troškova nalaze uz opise strategija vođenja. Uz to se napominje da se oznaka t kod pojedinih jednadžbi u nastavku odnosi na odabrani vremenski korak od jednog sata.

4.1.1. Kogeneracijsko postrojenje

Ovakva postrojenja obično imaju određeni tehnički minimum, no pri formiranju modela se radi složenosti algoritma on nije uzeo u obzir pa isporučena toplina može biti unutar intervala od 0 do nazivne toplinske snage:

$$0 \leq Q_{CHP,t} \leq Q_{CHP,nom} \quad (6)$$

Gdje je:

Q_{CHP} – toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja [MW],

$Q_{CHP,nom}$ – nazivna toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja [MW].

Kako bi model zadržao linearna svojstva postavila su se još dva pojednostavljenja:

- smanjenje učinkovitosti postrojenja s smanjenjem stupnja opterećenja koji se javlja u realnom slučaju nije uzeto u obzir već se uzima konstanta vrijednosti učinkovitosti,
- ovisnost proizvodnje električne energije intenzitetu toplinske proizvodnje nije razmatrano
- nije razmatrana međuovisnost procesnih parametara u komponentama (kotlu, plinskoj i parnoj turbini, zagrijačima) kogeneracijskog postrojenja.

4.1.2. Plinski kotao

Na model plinskog kotla je postavljeno ograničenje maksimalne snage u određenom satu:

$$0 \leq Q_{PK,t} \leq Q_{PK,nom} \quad (7)$$

Gdje je:

Q_{PK} – toplinska snaga plinskog kotla [MW],

$Q_{PK,nom}$ – nazivna toplinska snaga plinskog kotla [MW].

4.1.3. Dizalica topline

Pri opisu dizalice topline se nije uzela u obzir promjena faktora grijanja tj. toplinskog množitelja (COP) koji se javlja uslijed promjene temperatura u sustavu. Odabrana je potrebna nazivna toplinska snaga dizalice, a potrošnja električne energije je dobivena iz jednadžbe za izračun faktora grijanja čija vrijednost u promatranom slučaju iznosi 3,5.

$$COP = \frac{Q_{DT}}{Q_{DT,el}} \quad (8)$$

Gdje je:

COP – faktor grijanja (toplinski množitelj) [-],

Q_{DT} – toplinska energija dobivena dizalicom topline [MWh],

$Q_{DT,el}$ – električna energija potrebna za pogon dizalice topline [MWh].

Uz to je za dizalicu topline postavljeno ograničenja minimalne i maksimalne toplinske snage u određenom trenutku t . Pri čemu ona nema tehnički minimum pa se njen stupanj opterećenja kreće u području od 0 (isključen) do 1 (maksimalna snaga). Vrijedi:

$$0 \leq Q_{DT,t}(t) \leq Q_{DT,nom} \quad (9)$$

$Q_{DT,nom}$ – instalirana toplinska snaga dizalice topline [MW].

4.1.4. Toplinski spremnik

U toplinski spremnik se pohranjuje višak proizvedene energije koja se iskorištava kasnije pri većem toplinsko opterećenju ili višim cijenama proizvodnje toplinske energije iz izvora. Kako se vrijednosti punjenja ili pražnjenja spremnika ne bi akumulirale u satima i tako premašile realna ograničenja koja se odnose na njegovu veličinu, potrebno je postaviti jednadžbe kojima bi se to ograničilo. Jedna je postavljanje energetske bilance za napunjenost spremnika gdje je ona jednaka onoj iz prethodnog sata uvećanoj ili umanjeno za iznos punjenja odnosno pražnjenja. To ograničenje je prikazano u sljedećoj jednadžbi:

$$s_{(t)}^{razina} = s_{(t-1)}^{razina} + s_{(t)}^{pp} \cdot \eta_{TS} \quad (10)$$

Gdje t označava promatrani sat, a $t-1$ prethodni i uz to je:

- s^{pp} – punjenje ili pražnjenje toplinskog spremnika [MWh],
- s^{razina} – razina napunjenosti spremnika [MWh],
- η_{TS} - stupanj učinkovitost punjenja odnosno pražnjenja spremnika (0,98).

Kada se spremnik puni $s_{(t)}^{pp}$ poprima pozitivnu vrijednost, a negativna ukazuje na pražnjenje spremnika. Napunjenost spremnika $s_{(t)}^{razina}$ je uvijek pozitivna vrijednost i to veća od 0 i manje od maksimalne:

$$0 \leq s_{(t)}^{razina} \leq s_{max}^{razina} \quad (11)$$

Sljedeće ograničenje koje se postavlja je da se u jednom satu može pohraniti ili isprazniti 50 % iznosa količine maksimalne zapremnine spremnika:

$$|s_{(t)}^{pp}| \leq \frac{s_{max}^{razina}}{2} \quad (12)$$

4.2. Strategija 1) – statička, definirana cjenovnim pragom

Kod strategije vođenja definirane cjenovnim pragom se period uključivanja pojedinog toplinskog izvora definira prema ovisnosti o cijenama električne energije i toplinskih potreba i to definiranjem pragova iznad odnosno ispod kojih se pojedino postrojenje uključuje ili isključuje da bi se zadovoljilo toplinsko opterećenje. Najprije je potrebno formirati dijagram marginalne cijene proizvodnje toplinske energije iz određenog izvora kako bi se mogli odrediti prikladni cjenovni pragovi. Ulazni podaci potrebni za dobivanje linija ovisnosti cijena električne energije o proizvodnoj cijeni toplinske energije su prikazani u tablici 2. Naime, trošak proizvodnje toplinske energije se formira uzimajući u obzir cijenu goriva, varijabilne troškove održavanja te emisije CO₂.

Kod kogeneracijskog postrojenja to iznosi:

$$C_{topl,chp} = (q_{pl,chp} \cdot C_{pl} + Q_{el,chp} \cdot C_{VOM,chp} + m_{CO2,chp} \cdot C_{CO2} - Q_{el,chp} \cdot C_{el}) / Q_{topl,chp} \quad (13)$$

Gdje je:

$C_{topl,chp}$ – trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije iz kogeneracije [EUR/MWh],

$q_{pl,chp}$ – potrošnja goriva (prirodnog plina) [MWh],

C_{pl} - cijena prirodnog plina [EUR/MWh],

$Q_{el,chp}$ – proizvedena električna energija [MWh_e],

$C_{VOM,chp}$ - varijabilni troškovi pogona i održavanja kogeneracijskog postrojenja (*engl. Variable Operation and Maintenance - O&M costs*) [EUR/MWh_e]

$m_{CO_2, chp}$ – ukupna emisija CO₂ iz kogeneracijskog postrojenja [t]

C_{CO_2} – naknada za emisije CO₂ [EUR/t]

$Q_{topl, chp}$ - proizvedena toplinska energija [MWh],

U slučaju plinskog kotla:

$$C_{topl, pk} = (q_{pl, pk} \cdot C_{pl} + Q_{topl, pk} \cdot C_{VOM, pk} + m_{CO_2, pk} \cdot C_{CO_2}) / Q_{topl, pk} \quad (14)$$

Gdje je:

$C_{topl, pk}$ - trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije iz plinskog kotla [EUR/MWh],

$q_{pl, pk}$ - potrošnja goriva (prirodnog plina) [MWh],

$Q_{topl, pk}$ - proizvedena električna energija [MWh_e],

$C_{VOM, pk}$ - varijabilni troškovi pogona i održavanja plinskog kotla (*engl. variable O&M costs*) [EUR/MWh]

$m_{CO_2, pk}$ - ukupna emisija CO₂ iz plinskog kotla [t]

U slučaju dizalice topline nema emisija CO₂, ali valja napomenuti da je cijena električne energije potrebne za pogon uzeta 33 % veća od one na veleprodajnom tržištu radi dodatnog troška mrežarine.

$$C_{topl} = (Q_{DT} / COP \cdot (C_{el} \cdot 1.33) + Q_{DT} \cdot C_{VOM, DT}) / Q_{DT} \quad (15)$$

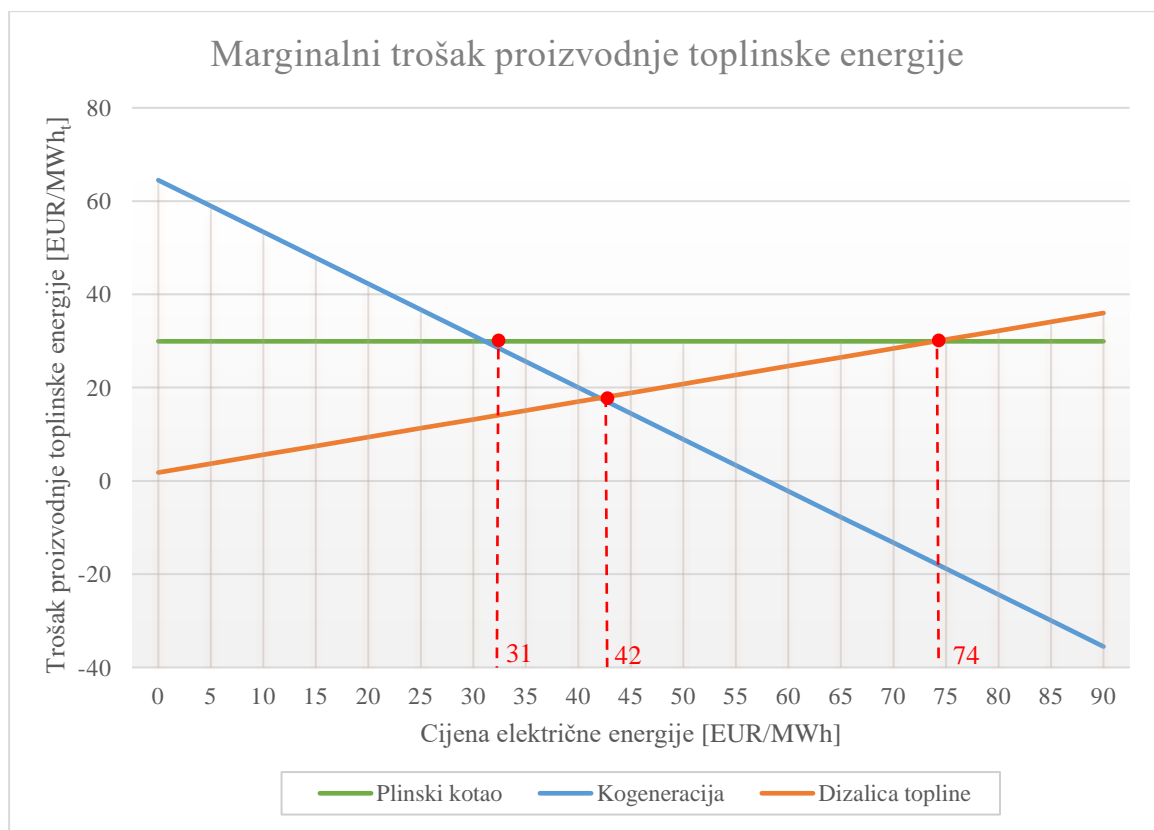
Gdje je:

$C_{VOM, DT}$ – varijabilni troškovi pogona i održavanja dizalice topline (*engl. variable O&M costs*) [EUR/MWh]

Tablica 2 Ulazni podaci za dobivanje marginalnog troška proizvodnje električne energije

	Plinski kotao	Kogeneracija	Dizalica topline
Proizvedena toplinska energija [MWh]	1,00	1,00	1,00
Proizvedena električna energija [MWh]	0,00	1,11	0,00
Potrošnja prirodnog plina [MWh]	1,08	2,22	0,00
Cijena prirodnog plina [EUR/MWh]	22,30		-
Specifična emisija CO ₂ [t/MWh]	0,18	0,18	0,00
Ukupna emisija CO ₂ [t]	0,19	0,40	0,00
Varijabilni O&M [EUR/MWh]	1,10	4,40	1,80
Naknada za emisije CO ₂ [EUR/MWh]	25,00		

Može se uočiti kako je pod proizvedenom toplinskom energijom vrijednost jedan, a razlog tome je taj što se dijagram iskazivao upravo za 1 MWh proizvedene toplinske energije. Na sljedećoj slici je prikazan rezultat dobiven na temelju vrijednosti iz tablice 2. Ordinata označava marginalni trošak proizvodnje 1 MWh toplinske energije, a apscisa cijene električne energije dan unaprijed tržišta.



Slika 13 Marginalni trošak proizvodnje toplinske energije iz pojedinog izvora

Sa slike 13 se može vidjeti kako su određena tri cjenovna praga gdje niži, 31 EUR/MWh, srednji 42 EUR/MWh, a najviši 74 EUR/MWh. Postavljeni pragovi su odabrani za različite uvjete unutar algoritma kako bi se pokušalo što vjernije opisati sustav. Inače bi se prema kriteriju praćenja samo vrste najjeftinijeg izvora moglo odrediti samo jedan prag sjecišta krivulja koji u ovom slučaju iznosi 41 EUR/MWh te je ispod njega isplativije koristiti dizalicu topline, a iznad kogeneracijsko postrojenje. Međutim, u ovom slučaju su se odabrala tri jer u svakom intervalu drukčiji poredak povoljnog uključivanja postrojenja. Uvjeti unutar algoritma i slučajevi su predloženi u nastavku.

- $C_{el,min} < 31$ EUR/MWh:
 - Za namirivanje vršnog opterećenja se uključuje dizalica topline zbog niskih pogonskih troškova u okruženju niskih cijena električne energije. S njom se i u

slučaju nižeg toplinskog opterećenja puni spremnik topline, a prazni se kada plinski kotao i dizalica topline nisu dostatni za namirenje toplinskog opterećenja. Ukoliko energija iz dizalice topline i toplinskog spremnika nije dovoljna, uključuje se prvo plinski kotao, a prema potrebi pri maksimalnom toplinskom opterećenju kogeneracijsko postrojenje.

- **$31 < C_{el} < 41$ EUR/MWh**

- U ovom području cijena električne energije se također prvo uključuje dizalica topline, nakon toga kogeneracijsko postrojenje, a naposljetku plinski kotao iz kojeg je u ovom slučaju troškovno najnepovoljnija proizvodnja toplinske energije.

- **$41 < C_{el} < 70$ EUR/MWh**

- Prelaskom sjecišta krivulje kogeneracije i dizalice topline, prednost za upuštanje u pogon ima kogeneracijsko postrojenje pošto su troškovi proizvodnje niži. Višak topline iz kogeneracije se pohranjuje u spremnik, a pri povećanom toplinskom opterećenju se uključuje prvo dizalice topline pa plinski kotao koji je i u ovom slučaju nepovoljna opcija.

- **$C_{el} > 70$ EUR/MWh**

- U periodima visoke cijene električne energije se preferira pogon kogeneracijskog postrojenja s fokusom na što veću proizvodnju električne energije jer njena prodaja donosi veći profit (negativne vrijednosti troška proizvodnje toplinske energije). Toplinski spremnik se puni ako je toplinsko opterećenje niže od topline proizvedene u kogeneracijskom postrojenju. Za namirenje vršnog opterećenja se prvo pali plinski kotao, zatim se prazni spremnik, a samo u slučaju najvećeg opterećenja se uključuje dizalica topline koja je troškovno neisplativa.

Pri tome je uzeto u obzir da se u svakom satu mora namiriti toplinsko opterećenje te ograničenja da se spremnik ne može puniti više od maksimalne napunjenosti i prazniti manje od pola razine u jednome satu kao što je opisano u jednadžbama (11) i (12).

4.3. Strategija 2) – dinamička, optimizacija

Funkcija cilja (jednadžba (16)) napravljena je prema [26] i sastoji se od ukupnih troškova kroz promatrani vremenski period. Ti troškovi uključuju varijabilne troškove pogona i održavanja

uz odvojene cijene goriva, CO₂ emisija i električne energije. Investicijski trošak te fiksni troškovi pogona i održavanja (*engl. Fixed Operation and Maintenance - O&M costs*) nisu razmatrani. Cilj je da iznos ovog izraza kroz promatrano razdoblje bude minimalan.

Općenita ciljna funkcija glasi:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [(C_i^{VO\&M} + C_{pl} + C_{CO_2} K_i - C_{el,t} L_i) Q_{i,cap} O_{i,t}] \quad (16)$$

Gdje je:

$C_{i,t}^{VO\&M}$ – varijabilni troškovi pojedinog postrojenja [EUR/MWh],

$C_{i,t}^{CO_2}$ – trošak emisija pojedinog postrojenja [EUR/MWh],

L_i – omjer električne i toplinske energija (kod kogeneracije) [MWh_e/MWh_t],

K_i označava intenziteta emisija CO₂ izražen u [ton_{CO2}/MWh_{topl}]. Njegova vrijednost je jednaka 0,18 ton_{CO2}/MWh_t za kogeneracijsko postrojenje i plinsku turbinu, a za dizalicu topline pretpostavljena je 0 ton_{CO2}/MWh_t iako može ovisiti o trenutnom *mixu* proizvodnje i uvoza u razmatranoj regiji. U funkciju se u slučaju dizalice toplinu umjesto cijene goriva dodaje trošak na potrošnju električne energije za njen pogon ($C_{el,dt}$) prema izrazu:

$$C_{el,dt} = Q_{DT}/COP \cdot C_{el} \cdot 1.33 \quad (17)$$

Indeks i iz funkcije cilja se odnosi na pojedino postrojenje, dakle na kogeneracijsko postrojenje, dizalicu topline ili plinski kotao, dok t označava promatrani vremenski period od jednog sata. Potrebno je naglasiti da su vrijednosti i i proračun pojedinih parametara usklađenim s onim iz strategije 1. Izraz (18) označava da u svakom satu potreba za toplinskom energijom sa strane potrošača mora biti zadovoljena proizvodnjom iz kombinacije toplinskih izvora. Uz to uključuje doprinos toplinskog spremnika tako da se potrebna proizvodnja toplinske energije smanjuje ukoliko se toplinski spremnik prazni ($s_t^{pp} < 0$), odnosno povećava kada se toplinski spremnik puni ($s_t^{pp} > 0$):

$$\sum_{i \in I} Q_{i,cap} \eta_i O_{i,t} = Q_{opt,t} + s_t^{pp} \quad (18)$$

Gdje je:

$Q_{opt,t}$ – toplinsko opterećenje sustava [MWh].

Varijable koje se javljaju u modelu te se mijenjaju u svakom vremenskom periodu od jednog sata su:

- $O_{i,t}$ - Opterećenje postrojenja
- s^{pp} – punjenje/praznjenje toplinskog spremnika

Opterećenje postrojenja se mijenja između 0 i 1. Tako da 0 označava isključeno postrojenje, a 1 rad pod maksimalnom snagom. Pritom je potrebno napomenuti da zbog složenosti algoritma kriterij minimalnog stabilnog opterećenja nije uzet u obzir.

Opterećenje:

$$0 \leq O_{i,t} \leq 1 \quad (19)$$

Varijabla je s_t^{pp} negativna kada se spremnik prazni (daje se energija za namirivanje toplinske potrebe mreže), a pozitivna kada se puni (troši se energija proizvedena iz određenog izvora topline).

$$s_t^{razina} = s_{t-1}^{razina} + s_t^{pp} \cdot \eta_{TS} \quad (20)$$

Također, varijabla s_t^{razina} poprima vrijednost od nula do maksimalnog kapaciteta spremnika, a s_t^{pp} ne može prijeći vrijednost napunjenosti spremnik u slučaju dok se spremnik prazni odnosno vrijednost potrebnu za potpunu napunjenost spremnika (11). Učinkovitost punjenja odnosno praznjenja spremnika je označen s η_{TS} . Dodatno je uključeno ograničenje maksimalno dozvoljenog punjenja spremnika u jednom satu koje iznosi polovicu kapaciteta spremnika (12).

4.4. Strategija 3) – dinamička, dodatni spremnik topline - cjevovod

Navodeći se potencijalom iskorištavanja distribucijske toplinske mreže a u svrhu ostvarivanja veće fleksibilnosti sustava i optimalnog vođenja, modeliran je slučaj takvog sustava. Ova strategija je dodana kao nadogradnja na prethodnu tako da se razmatrao još jedan toplinski spremnik koji je definiran jednadžbama kao i u strategiji 2. Budući da se zbog složenosti pristupa izbjeglo razmatranje termohidrauličkih bilanci sustava (analiza trenutnih vrijednosti protoka i temperatura u sustavu) već su postavljene samo energetske bilance, pregrijavanje cijevne mreže za nekoliko stupnjeva je teže precizno definirati. Kao aproksimativno rješenje poslužilo je definiranje spremnika velikog kapaciteta (1500 MWh) na koji su postavljena ograničenja punjenja i praznjenja od 10 % satu (150 MWh).

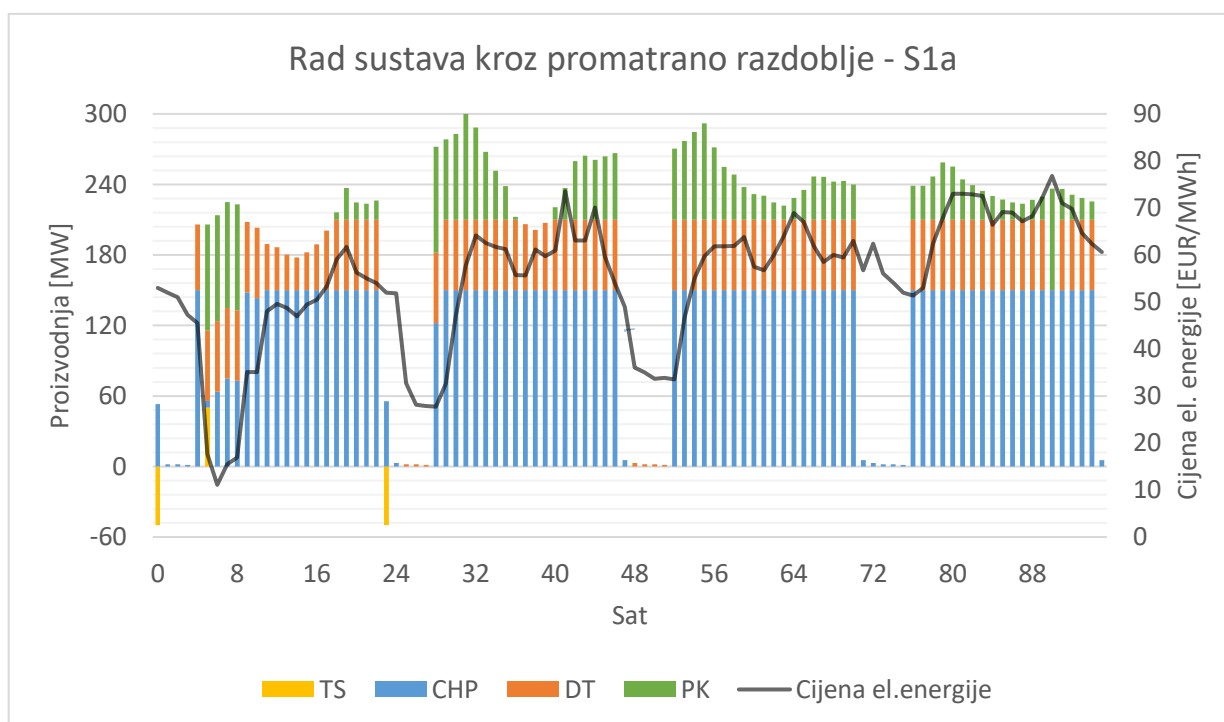
5. REZULTATI

U ovom poglavlju su predloženi rezultati provedenih simulacija po strategijama uz njihove usporedbe. Za svaku strategiju su se simulacije provele za razdoblje od četiri dana čije je toplinsko opterećenje i pripadajuća cijena električne energije prikazani u potpoglavlju 3.3.

5.1. Strategija vođenja prema cjenovnom pragovima

5.1.1. S1a - Postojeća cijena električne energije

Za prvi slučaj se simulacija provela prema referentnim podacima u kojima se javljaju više vrijednosti toplinskog opterećenja i srednje cijene električne energije. Na slici 14 su prikazani rezultati simulacije provedeni prema algoritmu baziranom na cjenovnim pragovima i toplinskim opterećenjem. CHP (plavo) se odnosi na kogeneracijsko postrojenje, DT (narančasto) na dizalicu topline, PK (zeleno) na plinski kotao, a TS (žuto) na toplinski spremnik. Pod toplinskim spremnikom se misli na iznos njegovog pražnjenja gdje je $TS > 0$ ili punjenja gdje je $TS < 0$. Zamjećuje se kako postavljeni uvjeti za njegovo pražnjenje i punjenje u ovoj strategiji nisu uspjeli pridonijeti njegovom učestalom korištenju.



Slika 14 Rad sustava strategije 1 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S1a

Budući da je iznos toplinskog opterećenja tijekom dana visok, u pogon se u većini sati puštaju sve tri vrste postrojenja. Međutim, njihov stupanj opterećenja se evidentno mijenja i to ovisno o cijenama električne energije. Tako se prije osmog sata pri najnižim iznosima cijena (slučaj prvi: $C_{el} < 31$ EUR/MWh) smanjuje proizvodnja toplinske energije iz kogeneracije jer je postavljena kruta veza između proizvodnje toplinske i električne energije te je algoritmom definirano da se u područjima niskih cijena proizvodnja postrojenja smanjuje zbog svoje neisplativosti. U tom razdoblju je dana prednost uključivanja dizalici topline. Točnije, za tu kombinaciju cijena i toplinskog opterećenja je redom određeno prvo uključivanje dizalice topline, zatim plinskog kotla pa toplinskog spremnika te na koncu kogeneracijskog postrojenja. U ostalim danima kod većeg toplinskog opterećenja su uglavnom u području cijena gdje je definiran redoslijed: 1. kogeneracija, 2. dizalica topline i na koncu plinski kotao. Jedino se iza 88. sata gdje se javlja vršna cijena električne energije veća od 74 EUR/MWh ne koristi dizalica topline jer je postavljena kao posljednji izbor zbog izrazito visokih pogonskih troškova. Spremnik topline se zbog specifično definirane ovisnosti o toplinskom opterećenju nije u području gdje je ono visoko mnogo upotrebljavao.

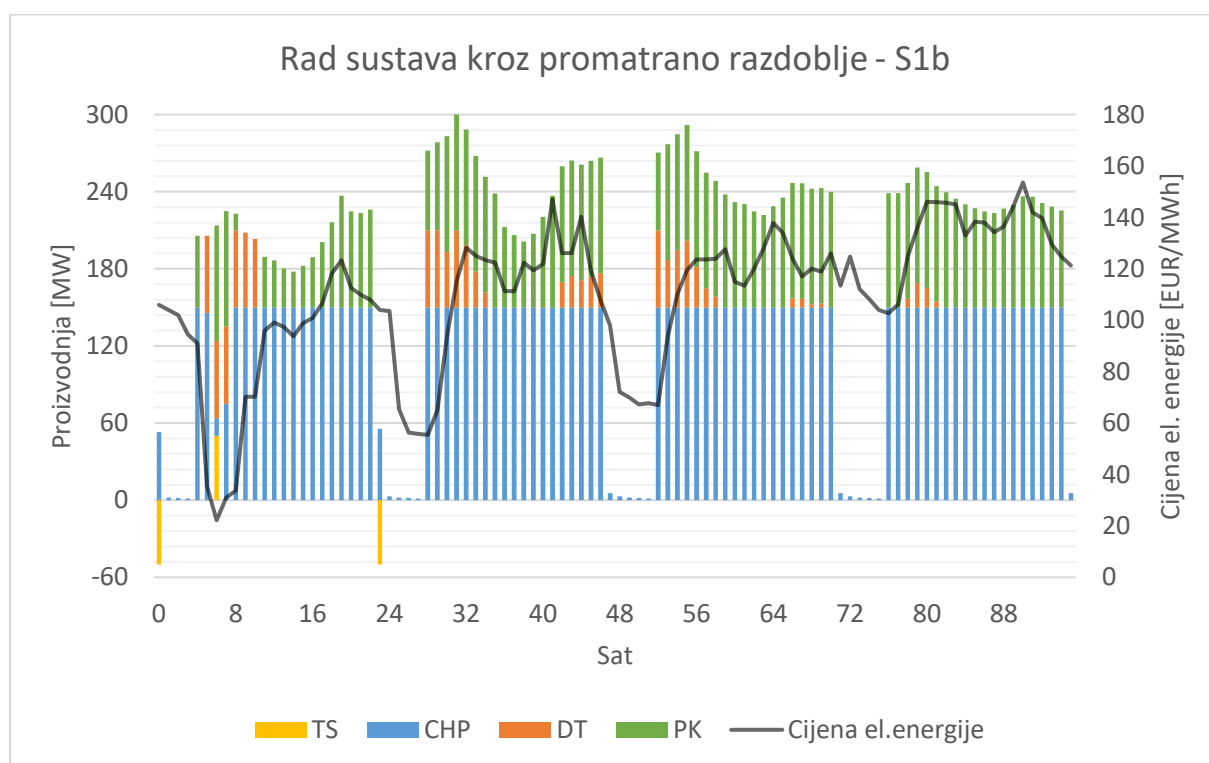
Rezultati vezani za troškove koji se javljaju u pogonu su prikazani u tablici 3. Ukupan trošak za promatrano razdoblje se dobiva oduzimanjem ukupnih troškova i zarade iz proizvodnje električne energije kogeneracijskog postrojenja te iznosi 187816,7 eura. Na temelju slike 14 se mogu donijeti zaključci o tome koje je postrojenje u pogonu najveći broj sati. To je kogeneracijsko čiji su troškovi goriva iz toga razloga najviši te iznose 551172,4 eura, naknada za ispušten CO₂ je jednaka 111223,1 eura, varijabilni troškovi pogona i održavanja imaju iznos od 53832,0 eura što daje ukupne troškove jednake 716227,5 eura. Međutim, zarada od proizvedene električne energije iznosi 710842,0 eura što je samo 0,76 % manje od troška. Nakon kogeneracije slijedi dizalica topline koja je bila u maksimalnom pogonu u većini sati tijekom dana. Njeni varijabilni troškovi iznose 7794,4 eura, oni za pogon 93106,0 eura, što daje ukupan trošak jednak 100900,4 eura. Na posljetku je plinski kotao koji je imao najmanje sati u pogonu te se na emisije CO₂ utrošilo 13217,8 eura, varijabilni troškovi iznose 2811,0 eura, a troškovi goriva 65501,8 eura. Sumirano to daje iznos od 81530,6 eura. Za sva tri postrojenja se uočava da je najviše utrošeno na pogonsku energiju (prirodni plin ili električnu).

Tablica 3 Troškovi za promatrano razdoblje - S1a

S1a troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	111223,1	0,0	13217,8	124441,0
	Varijabilni O&M	53832,0	7794,4	2811,0	64437,4
	Plin	551172,4	0,0	65501,8	616674,2
	Električna energija	0,0	93106,0	0,0	93106,0
Ukupni trošak [EUR]		716227,5	100900,4	81530,6	898658,5
CHP_el zarada [EUR]		710842,0	0,0	0,0	710841,9
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					187816,7

5.1.2. S1b - Dvostruko veća cijena električne energije

Razlika u odnosu na prethodnu strategiju je samo u povećanju iznosa cijena električne energije i to dvostruko. Rezultati simulacije su prikazani na slici 15.



Slika 15 Rad sustava strategije 1 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije od referentnih – S1b

U odnosu na prošlu simulaciju je uočljivo da pri vršnim opterećenjima nad narančastom bojom koja označava dizalicu topline dominira zelena koja označava plinski kotao. Razlog tome je

prelazak najvišeg praga koji je postavljen na 74 EUR/MWh i iznad kojeg se prvo uključuje kogeneracijsko postrojenje, zatim plinski kotao te dizalica topline tek na poslijetku ukoliko kogeneracija, kotao i toplinski spremnik ne mogu zadovoljiti toplinsko opterećenje. Dizalica topline se uključivala gdje su cijene električne energije pale ispod 74 EUR/MWh. U ostalim razdobljima su plinski kotao i kogeneracijsko postrojenje bili dostatni za namirenje potreba. Zbog visokog toplinskog opterećenja je kogeneracijsko postrojenje u maksimalnom pogonu u gotovo u svakom satu.

Rezultati vezani za troškove koji se javljaju u pogonu su prikazani u Tablica 4. Ukupan trošak iznosi - 486779,0 eura što zapravo znači da se radi o tolikom iznosu profita jer je proizvodnja električne energije iz kogeneracije premašila troškove rada sustava. Razlog tome je veća cijena po kojoj se proizvedena električna energija prodaje. Troškovi goriva za kogeneracijsko postrojenje iznose 561933,4 eura što je vrlo mala razlika u odnosu na prošli slučaj. Naknada za CO₂ je jednaka 113394,6 eura, a varijabilni troškovi pogona i održavanja 54883,0 eura što daje ukupne troškove od 730211,0 eura. Međutim, zarada iz proizvedene električne energije iznosi čak 14321170,0 eura što premašuje troškove. Nakon kogeneracije slijedi plinski kotao čiji troškovi zbog emisija CO₂ iznose 28854,7, troškovi goriva 142990,8 eura, a varijabilni troškovi 1961,9 eura, što daje ukupan trošak jednak 177981,9 eura. Na poslijetku je u ovom slučaju dizalica topline čiji troškovi pogonske energije iznose 35183,7 eura, a ostali varijabilni troškovi 1961,9 eura. Sumirano to daje iznos od 37145,6 eura. Za sva tri postrojenja se uočava da je i ovdje najviše utrošeno za pogonsku energiju (prirodni plin ili električnu).

Tablica 4 Troškovi za promatrano razdoblje - S1b

S1 troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	113394,6	0,0	28854,7	142249,3
	Varijabilni O&M	54883,0	1961,9	6136,4	62981,3
	Plin	561933,4	0,0	142990,8	704924,2
	El. Energ	0,0	35183,7	0,0	35183,7
Ukupni trošak [EUR]		730211,0	37145,6	177981,9	945338,5
CHP_el zarada [EUR]		14321170,0	0,0	0,0	1432117,0
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					-486779,0

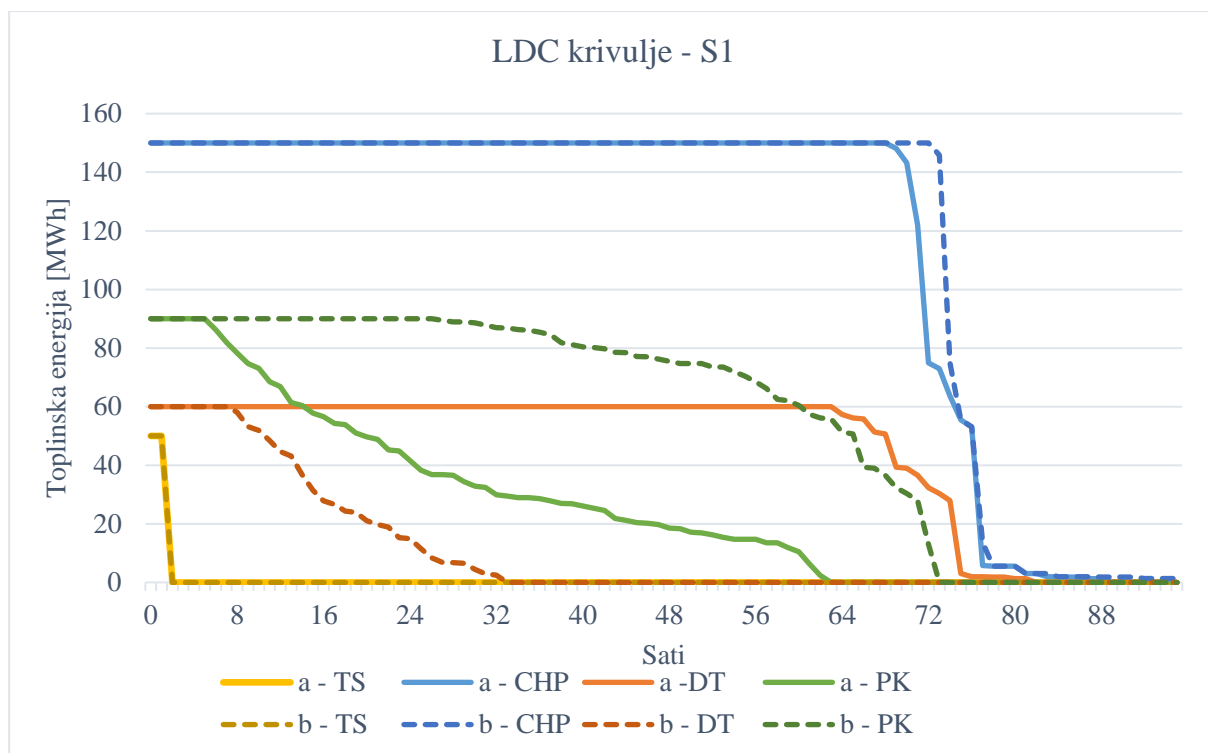
5.1.3. Usporedba S1a i S1b

Iz samog pogleda na dijagrame sa slika 14 i 15 se može primijetiti uočljiva razlika u broju radnih sati pojedinih postrojenja. Podrobnije se to može vidjeti u tablici 5 gdje se u stupcima pod *a* nalazi strategija s referentnim cijenama, a pod *b* ona s dvostruko većim iznosom. Kao što je bilo i navedeno, dizalica topline u prvoj strategiji ima mnogo više sati u pogonu koji iznose 82 u prvom i padaju na 33 jer se cijena električne energije dvostruko povećala. Broj pogonskih sati kogeneracije se također povećao kako bi se iskoristile visoke cijene za veću prodaju proizvedene električne energije. Pogon plinskog kotla je također češći pošto on nadomješta dizalicu topline čiji je rad izrazito nepovoljan u slučaju *b*. Iz tablice se uočava da je ukupno proizvedena toplinska energija jednaka u oba slučaja pošto mora biti jednaka toplinskom opterećenju. Proizvodnja električne i toplinske energije iz kogeneracije se također ne razlikuje značajno, ali su zato velike razlike u proizvedenoj toplini iz plinskog kotla i dizalice topline za oba slučaja.

Tablica 5 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S1a i S1b

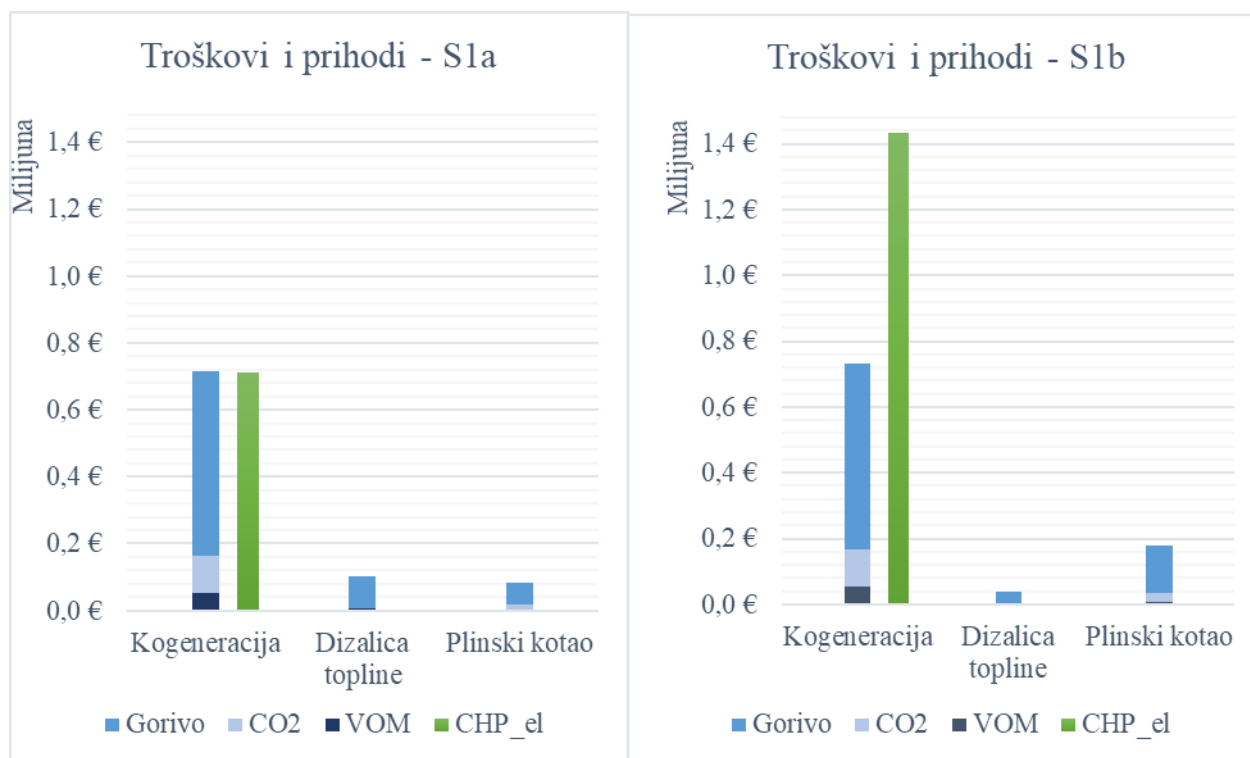
	Kogeneracija		Dizalica topline		Plinski kotao		Ukupno	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Broj radnih sati [h]	89	96	82	33	63	73	234	202
Proizvedena toplinska energija [MWh]	11122,3	11339,5	4330,2	1089,9	2555,5	5578,6	18008,0	18008,0
Proizvedena električna energija [MWh]	12234,6	12473,4	0,0	0,0	0,0	0,0	12234,6	12473,4

Na slici 16 su prikazane krivulje trajanja toplinskog opterećenja (*engl. Load Duration Curve - LDC*) za pojedino postrojenje i određeni slučaj. Pune linije se odnose na prvi referentni slučaj, a isprekidane na drugi s većim cijenama električne energije. Krivulje se dobivaju sortiranjem iznosa toplinskog opterećenja pojedinog izvora s ciljem dobivanja broja sati pod kojima je određeni izvor i s kojim određenim iznosom opterećenja u pogonu. Evidentne razlike su na temelju ranije spomenutih razloga uočljive u pogonu dizalice topline i plinskog kotla u raznim uvjetima cijena.



Slika 16 LDC krivulje – Strategija 1a i 1b

Što se tiče ukupnih troškova pojedinog slučaja, grafički prikaz napravljen na prethodno prikazanim podacima je na slici 17. Unesene su razne vrste troškova za svako pojedino postrojenje dok je za kogeneracijsko zelenom bojom dodana krivulja koja označava prihod od prodaje električne energije. Kao što je i ranije spomenuto, on je otprilike dvostruko veći od onog u slučaju *a*, dok su troškovi goriva dizalice topline smanjeni zbog manje radnih sati, a plinskog kotla iz suprotnih razloga povećani.



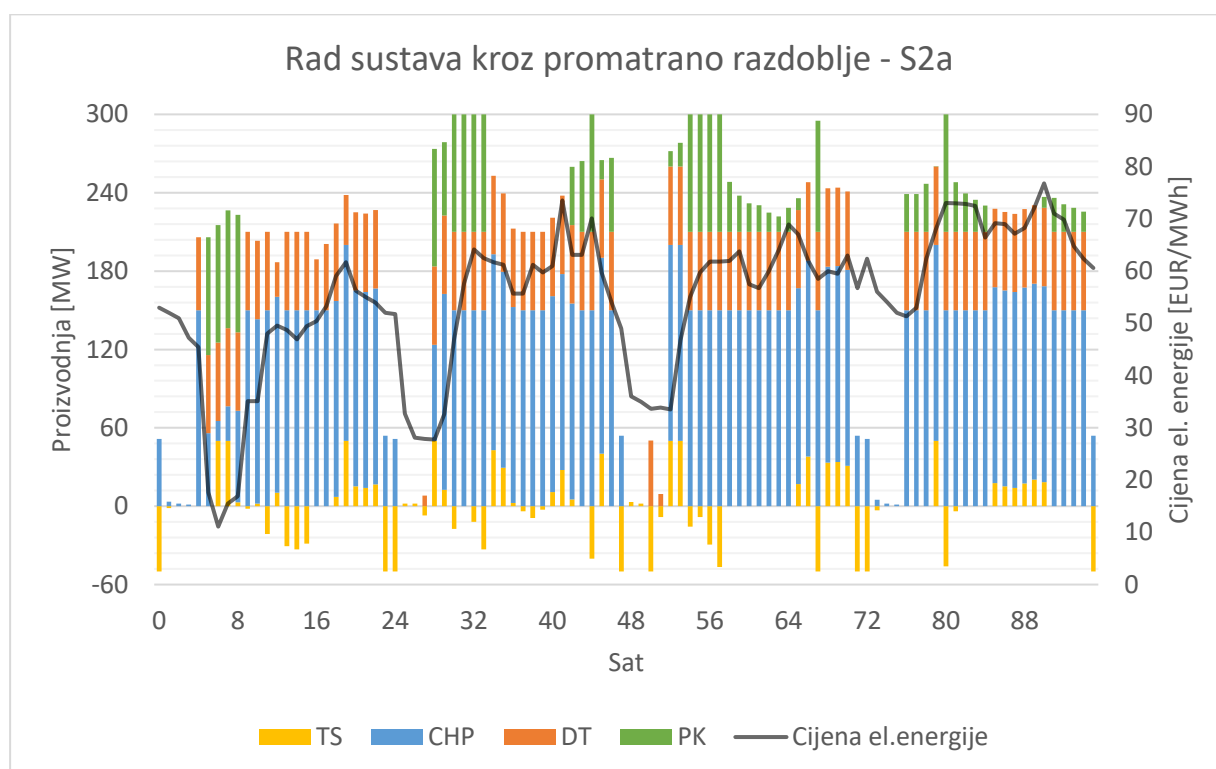
Slika 17 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje - S1a i S1b

5.2. Strategija 2 – Linearna optimizacija

Korištenje linearnog programiranja se provodi tako da računalni program izračuna optimalno rješenje postavljene funkcije cilja pri tome se držeći postavljenih ograničenja varijabli. Pretpostavljeno je da će ovaj pristup dati bolje rezultate od prošlog, što će biti prikazano u rezultatima.

5.2.1. S2a - Postojeća cijena električne energije

Rezultati ove simulacije su prikazani na slici 18. Ono što se može zamijetiti je aktivnije korištenje toplinskog spremnika u odnosu na prošlu strategiju. Naime, kod optimizacije se promatraju opterećenja i cijene kroz cijeli zadani period pa se, uzimajući u obzir i nadolazeći korak, postavlja pražnjenje/punjenje spremnika tako da cjelokupan iznos ciljne funkcije bude optimalan za promatrano razdoblje.



Slika 18 Rad sustava strategije 2 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S2a

Pri visokom iznosu toplinskog opterećenja tijekom dana se u pogon u većini sati puštaju sva tri instalirana postrojenja. Povoljno korištenje spremnika se može uočiti u periodu prije 8. sata gdje je cijena električne energije niska pa je isplativost korištenja kogeneracije manja. Zbog toga se koriste dizalice topline, plinski kotao te se u većoj mjeri prazni toplinski spremnik predajući toplinu mreži kako bi smanjio opterećenje kogeneracije. U periodima kada se niže

cijene javljaju za vrijeme minimalnog toplinskog opterećenja, uključuje se dizalica topline za punjenje spremnika, odnosno kogeneracija pri nešto višim cijenama i niskom opterećenju. Ovakvo ponašanje se ne može dogoditi u svakom takvom intervalu zbog toga što je razina u prethodnim satima na mjestima već postigla svoj maksimum punjenja pa varijabla koja se odnosi na punjenje poprima vrijednost nula i postrojenja se koriste samo za namirivanje toplinskog opterećenja. Nadalje, primjećuje se i da plinski kotao radi samo pri većim iznosima toplinskog opterećenja jer je pri nametnutim cijenama isplativije koristiti kogeneraciju i dizalicu topline. Tako primjerice oko 20. i 88. sata dolazi do pražnjenja spremnika uz nešto manje korištenje dizalice topline i bez uključivanja plinskog kotla.

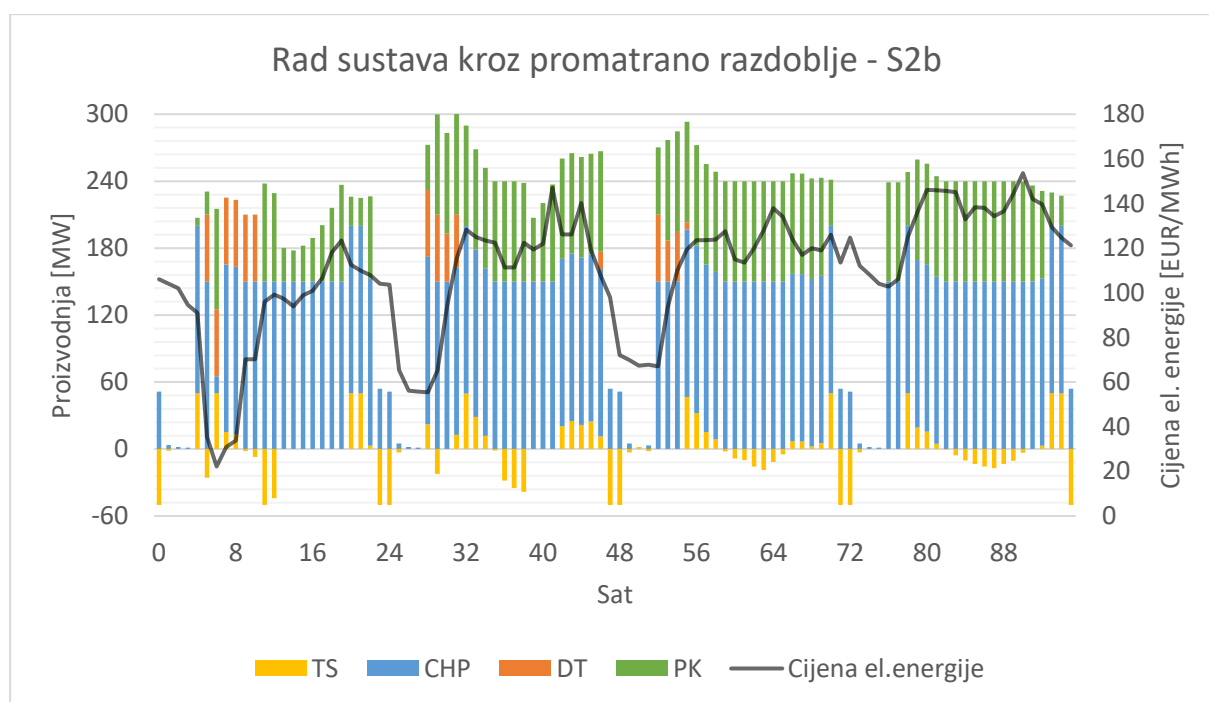
Iznosi troškova koji se javljaju u pogonu su prikazani u tablici 6. Ukupan trošak za promatrano razdoblje je manji od onog u *S1a* slučaju te iznosi 1715659,8 eura. Najveći udio u troškovima se odnosi na kogeneracijsko postrojenje čiji troškovi goriva iznose 558382,7 eura, naknada za ispušten CO₂ 112678,1 eura te varijabilni troškove pogona i održavanja 54536,2 eura što daje ukupne troškove od 712977,3 eura.. Međutim, u ovom slučaju zarada iz proizvedene električne energije poprima iznos veći od ukupnih troškova kogeneracije te je jednak 723924,5 eura. Nakon kogeneracije slijedi dizalica topline čiji troškovi iznose 8167,3 eura, a oni za pogon 97185,2 eura, što daje ukupan trošak jednak 105352,5 eura. Na kraju najmanje troškove zbog malo sati rada ima plinski gdje se na emisije CO₂ utrošilo 11127,1 eura, varijabilni troškovi iznose 2366,4 eura, a troškovi goriva 55141,2 eura. Sumirano to daje iznos od 68634,7 eura. Ukupno je najveći trošak onaj koji se odnosi na dobivanje pogonske energije (prirodni plin ili električna energija), zatim emisije te na posljeticu ostale varijabilne troškove pogona i održavanja.

Tablica 6 Troškovi za promatrano razdoblje – S2a

S2a troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	112678,1	0,0	11127,1	123805,3
	Varijabilni O&M	54536,2	8167,3	2366,4	65069,9
	Plin	558382,7	0,0	55141,2	613523,9
	Električna energija	0,0	97185,2	0,0	97185,2
Ukupni trošak [EUR]		712977,3	105352,5	68634,7	899584,3
CHP_el zarada [EUR]		723924,5	0,0	0,0	723924,5
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					175659,8

5.2.2. S2b – Dvostruko veća cijena električne energije

Povećanje iznosa cijene električne energije vidno utječe na ukupne rezultate što se tiče troškova, ali i radnih sati pojedinih postrojenja. Rezultati simulacije su prikazani na slici 16. Uočljivo da u vršnim opterećenjima dominira plinski kotao dok se dizalica topline zbog svojih visokih troškova pogona koristi minimalno. Zbog visokog toplinskog opterećenja je kogeneracijsko postrojenje u maksimalnom pogonu u gotovo u svakom satu. Toplinski spremnik se većinom puni energijom iz kogeneracije koja se proizvodi u područjima niskog opterećenja i visokih cijena električne energije. Njegovo pražnjenje se ostvaruje pri višim iznosima opterećenja kako se ne bi morala uključiti dizalica topline. Ona se uključuje samo pri vrlo niskim vrijednostima električne energije kao što su to oko 8., 32. i 56. sata.



Slika 19 Rad sustava strategije 2 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije – S2b

Iznosi troškova koji se javljaju u pogonu su prikazani u tablici 7. Ukupan trošak za promatrano razdoblje iznosi 949548,7 eura što je niže nego u S1b. Najveći udio u troškovima i ovdje poprima kogeneracijsko postrojenje čiji troškovi goriva iznose 580727,3 eura, naknada za ispušten CO₂ 117187,1 eura te varijabilni troškove pogona i održavanja 56718,6 eura što daje ukupne troškove od 754633,0 eura. Profit iz proizvedene električne energije premašuje iznos troškova kogeneracije, ali i svih postrojenja zajedno te iznosi 1469289,0 eura. Nakon kogeneracije slijedi dizalica topline čiji ukupni troškovi iznose 19340,6 eura, od čega su

varijabilni 1322,3 eura, a oni za pogonsku električnu energiju 18018,3 eura. Najmanje troškove zbog malo radnih sati ima plinski kotao gdje se na emisije CO₂ utrošilo 28464,4 eura, varijabilni troškovi iznose 6053,4 eura, a troškovi goriva 141057,1 eura. Zbrojeno to daje iznos od 175575,0 eura.

Tablica 7 Troškovi za promatrano razdoblje – S2b

S2b troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	117187,1	0,0	28464,4	145651,6
	Varijabilni O&M	56718,6	1322,3	6053,4	64094,34
	Plin	580727,3	0,0	141057,1	721784,5
	Električna energija	0,0	18018,3	0,0	18018,28
Ukupni trošak [EUR]		754633,0	19340,6	175575,0	949548,7
CHP_el zarada [EUR]		1469289,0	0,0	0,0	1469289,0
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					-519741,0

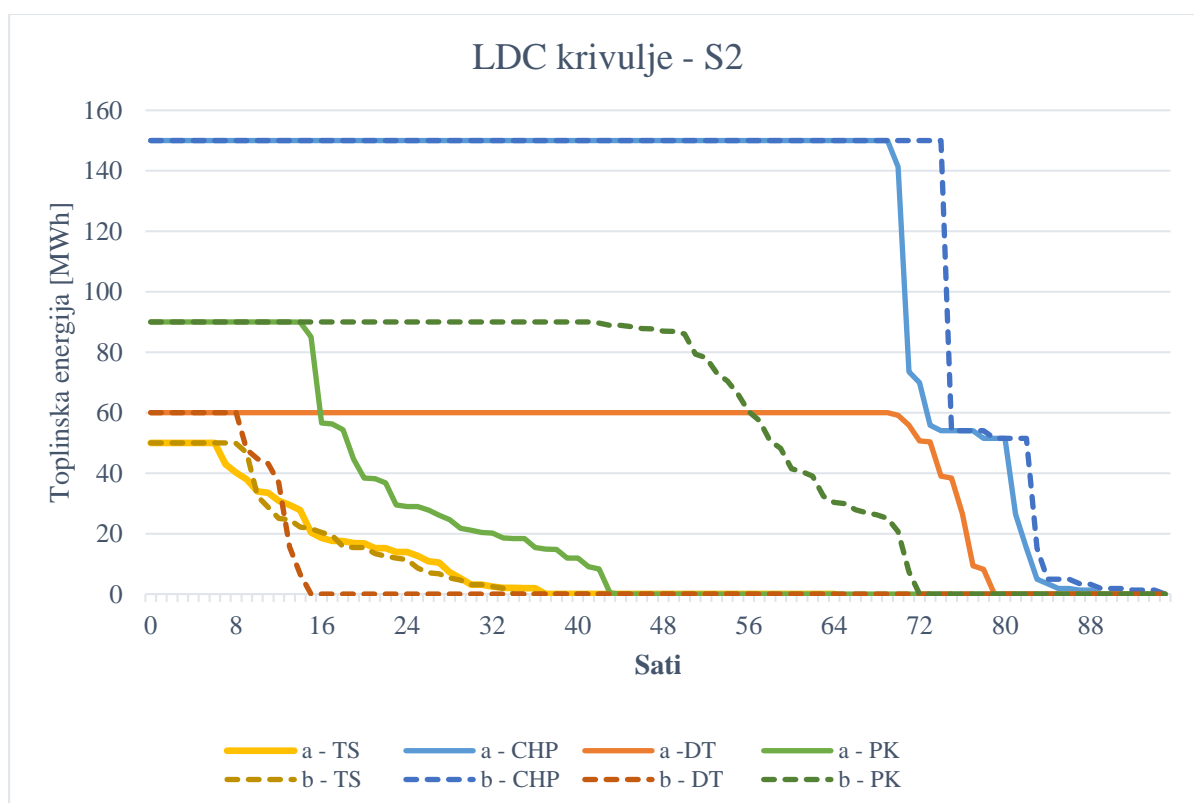
5.2.3. Usporedba slučajeva S2a i S2b

Razlika u broju pogonskih sati i proizvodnje pojedinih postrojenja je prikazana u tablici 8. Najveća razlika je vidljiva u radu dizalice topline koja u prvoj strategiji ima više sati u pogonu koji iznose 79 i padaju na 15 sati pri većoj cijeni električne energije. Pogon kogeneracije se također povećao s 89 na 95 kako bi se iskoristile visoke cijene za veću prodaju proizvedene električne energije. Broj radnih sati plinskog kotla je također veći jer zamjenjuje troškovno nepovoljan rad dizalice topline. U S2a slučaju je iznos radnih sati jednak 44, a za S2b se povećava na 72. Iz tablice se uočava da je ukupno proizvedena toplinska energija jednaka u oba slučaja pošto mora biti jednaka toplinskom opterećenju. Proizvodnja električne i toplinske energije iz kogeneracije se također u ovoj strategiji ne razlikuje jako značajno, ali su zato razlike u proizvedenoj toplini iz plinskog kotla i dizalice topline uočljive upravo zbog različitog vremena u pogonu.

Tablica 8 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S2a i S2b

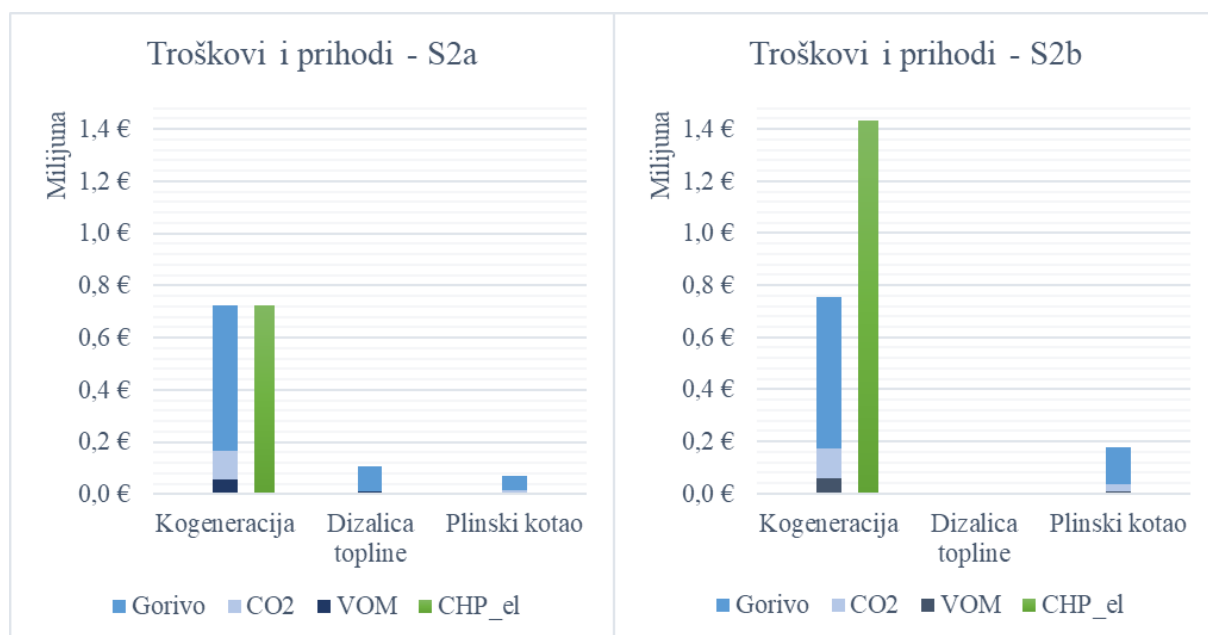
	Kogeneracija		Dizalica topline		Plinski kotao		Ukupno	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Broj radnih sati [h]	89	95	79	15	44	72	212	182
Proizvedena toplinska energija [MWh]	11267,8	11718,7	5437,4	734,6	2151,2	5503,1	17956,5	17956,5
Proizvedena električna energija [MWh]	12234,6	12890,6	0,0	0,0	0,0	0,0	12234,6	12890,6

Na slici 20 su prikazane krivulje trajanja toplinskog opterećenja za pojedino postrojenje. Pune linije se odnose na S2a slučaj, a isprekidane na S2b s većim cijenama električne energije. Razlike su na temelju ranije spomenutih razloga uočljive u pogonu dizalice topline i plinskog kotla u raznim uvjetima cijena dok su one kod primjene toplinskog spremnika i kogeneracije nešto manje.



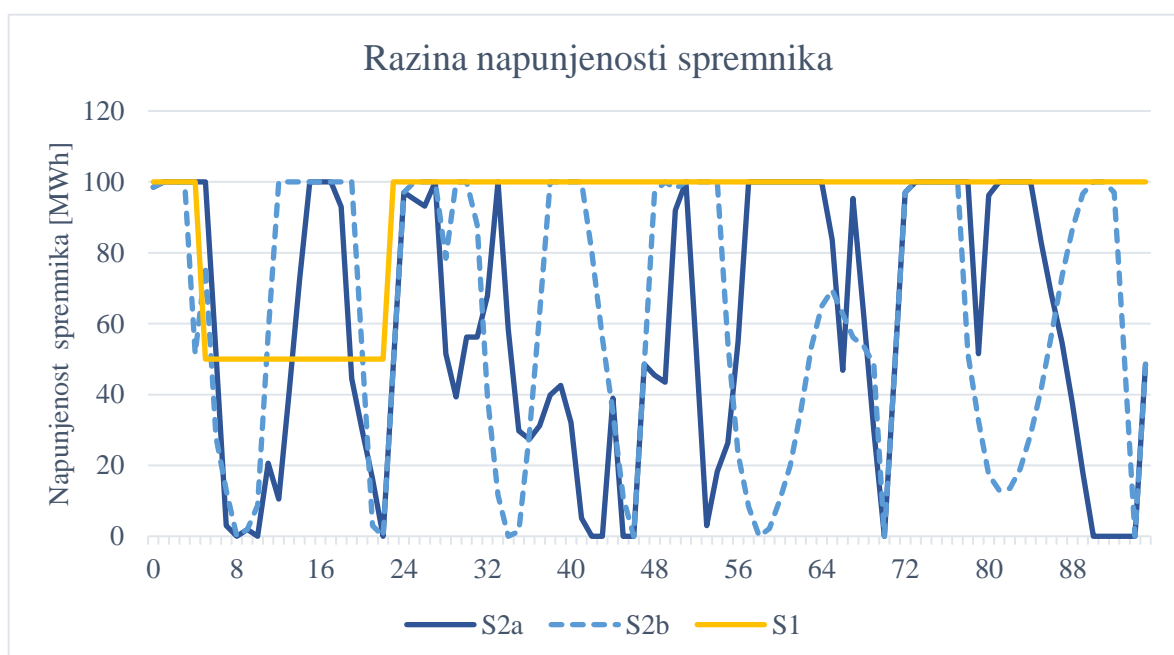
Na slici 21 je predočen grafički prikaz izrađen na temelju prethodno dobivenih rezultata. Ovdje se jasnije uočava razlika u troškovima odnosno prihodima razmatranih slučajeva gdje je zeleni

stupac koji predstavlja prihod od prodaje električne energije iz kogeneracijskog postrojenja zbog većih cijena dvostruko veći u slučaju b od onog u a gdje su niže cijene električne energije.



Slika 21 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje – S2a i S2b

Dodatno je još na slici 22 prikaz kretanja napunjenosti spremnika u promatranom vremenskom periodu za prethodno navedene dvije strategije. Može se uočiti kako je u strategiji 1 mogućnost korištenja spremnika vrlo slabo iskorištena što i dovodi do većih troškova u sustavu. Kod strategije 2 razina poprima različite vrijednosti diktirane prema cjenovno optimalnom vođenju.



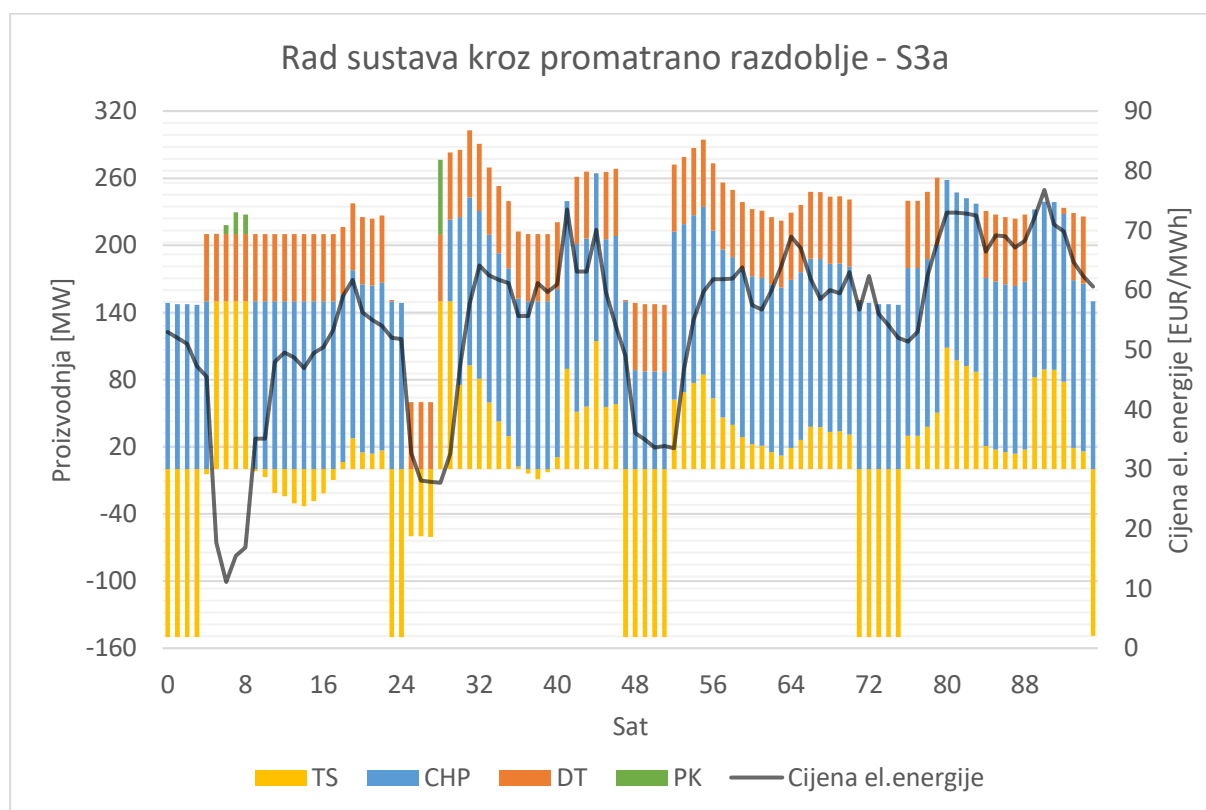
Slika 22 Napunjenost spremnika prema strategijama 1 i 2

5.3. Strategija 3 – linearna optimizacija s dodanim spremnikom koji imitira mrežu daljinskog grijanja

Ovaj slučaj se u odnosu na prethodni razlikuje po veličini spremnika koja je ovdje 15 puta veća te je maksimalan iznos punjenja i pražnjenja u jednom satu veći i iznosi 150 MWh. Kod ovako velikog spremnika se rijetko dostižu granice minimalne i maksimalne napunjenosti te se ono može optimalno odvijati bez sputavanja ograničenja.

5.3.1. S3a - Postojeća cijena električne energije

Rezultati ove simulacije su prikazani na slici 23.



Slika 23 Rad sustava strategije 3 za promatrano razdoblje od četiri dana s stvarnim cijenama električne energije – S3a

Uočava se puno žute boje koja se odnosi na punjenje ili pražnjenje spremnika što ukazuje na maksimalno korištenje mogućnosti skladištenja energije. U periodu oko 8. sata vrlo niska cijena električne energije kod mogućnosti korištenja spremnika ne pogoduje uključivanju kogeneracijskog postrojenja pa se za namirivanje opterećenja uz dizalicu topline koristi toplinski spremnik koji se uz pomoć kogeneracije punio u prethodnim satima. U ostalim slučajevima se niža cijena električne energije pojavljuje u noćnim satima s nižim toplinskim opterećenjem pa se toplinski spremnik puni i to većinom iz dizalica topline pri niskim cijenama električne energije ili iz kogeneracije.

kogeneracije oko 72. sata gdje je ta cijena nešto viša nego u prethodnim slučajevima. Pohranjena energija se iskorištava u svim razdobljima s visokim vršnim opterećenjem. Upotreba plinskih kotlova je ovdje vrlo minimalna te se javlja unutar svega četiri sata.

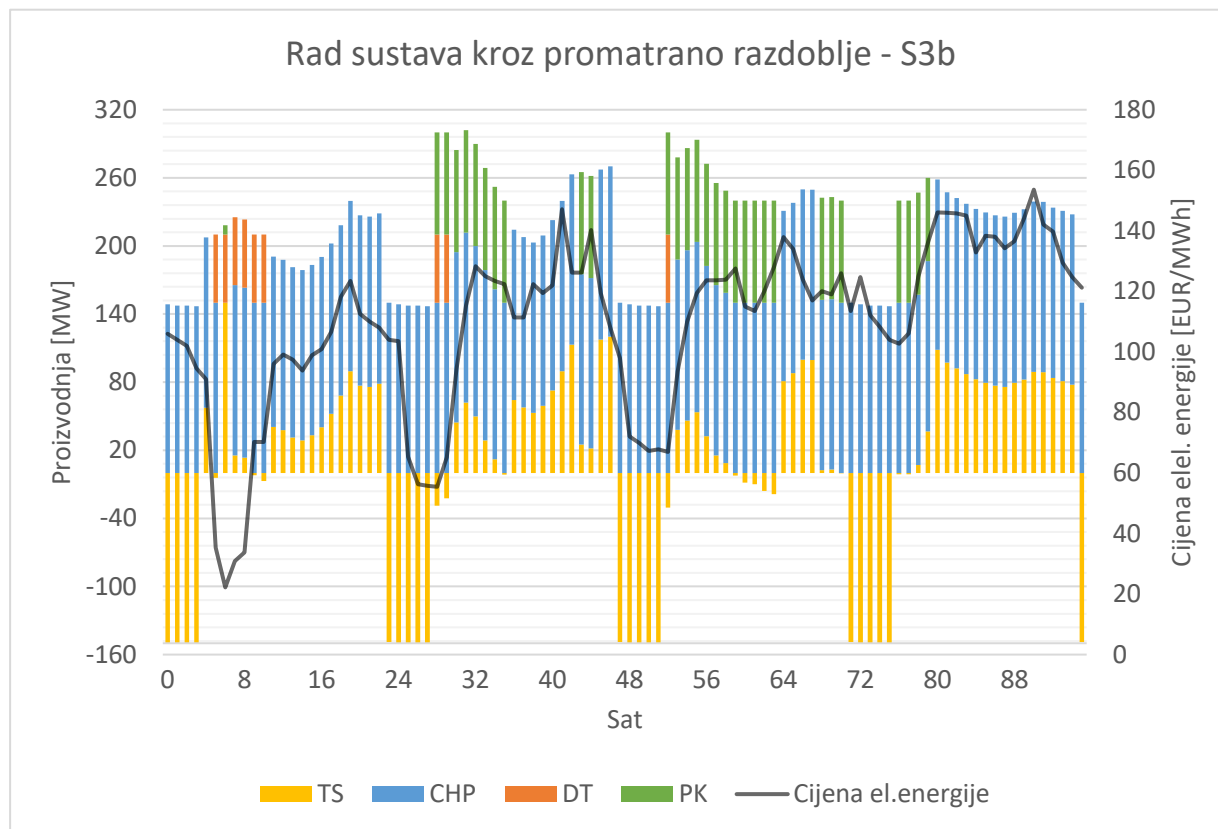
Iznosi troškova koji se javljaju u pogonu su prikazani u tablici 9. Ukupan trošak (troškovi-zarada) za promatrano razdoblje je manji od onog ostvarenog u slučaju *S1a* i *S1b* te iznosi 105905,1 eura. Najveći udio u troškovima i u ovom slučaju pripada kogeneracijskom postrojenju čiji troškovi goriva iznose 636895,8 eura, naknada za ispušten CO₂ 128521,6 eura te varijabilni troškove pogona i održavanja 62204,5 eura što daje ukupne troškove od 827621,9 eura. Zarada iz proizvedene električne energije poprima nešto manji iznos od ukupnih troškova kogeneracije te je jednak 820198,2 eura. Sljedeća je dizalica topline čiji ukopni troškovi iznose 94911,07 eura od čega su varijabilni 7899,1 eura, a oni za pogon 87012,0 eura. Najmanje troškove zbog vrlo malo sati rada ima plinski kotao gdje se na emisije CO₂ utrošilo tek 578,8 eura, varijabilni troškovi iznose 123,1 eura, a troškovi goriva 2868,4 eura. Sumirano se dobiva iznos od 3570,4 eura.

Tablica 9 Troškovi za promatrano razdoblje – S3a

S3a troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	128521,6	0,0	578,8	155565,1
	Varijabilni O&M	62204,5	7899,1	123,1	72614,4
	Plin	636895,8	0,0	2868,4	770911,4
	Električna energija	0,0	87012,0	0,0	10266,8
Ukupni trošak [EUR]		827621,9	94911,07	3570,4	926103,3
CHP_el zarada [EUR]		820198,2	0,0	0,0	820198,2
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					105905,1

5.3.2. Slučaj S3b

Povećanje iznosa cijene električne energije i u ovom slučaju bitno utječe na ukupne rezultate. Rezultati simulacije su prikazani na slici 24.



Slika 24 Rad sustava strategije 3 za promatrano razdoblje od četiri dana s dvostruko većim cijenama električne energije – S3b

Slično kao i u prethodnim strategijama u slučajevima s visokom cijenom električne energije je korištenje dizalice topline vrlo rijetko. Javlja se tek pri najnižim iznosima oko 8. sata te srednjim iznosima cijene s visokim toplinskim opterećenju oko 30. i 55. sata. Korištenje plinskih kotlova je učestalije, no ono je rjeđe nego u b slučaju prethodne dvije strategije. Razlog tome je što kogeneracijsko postrojenje radi gotovo u svakom satu pod maksimalnim opterećenjem gdje u satima niskih toplinskih opterećenja sustava puni toplinski spremnik pa se u doba viših toplinskih opterećenja energija u velikoj mjeri dovodi iz toplinskog spremnika pa je potrebna manja proizvodnja topline iz kotlova.

Ukupan trošak za promatrano razdoblje iznosi 1009358 eura. Budući da je proizvodnja kogeneracijskog postrojenja vrlo velika, visoki su i prihodi od proizvodnje električne energije koji iznose 1718599,0 eura. Kada se ova dva broja oduzmu se dobije prihod od 709241,0 eura.

Ukupni trošak kogeneracijskog postrojenja iznosi 915117,4 eura od čega na emisije CO₂ otpada 142108,8 eura, na gorivo 704227,9 eura, a na ostale varijabilne troškove 68780,6 eura. Nakon kogeneracije slijedi plinski kotao čiji ukupni troškovi iznose 83001,5 eura, od čega su troškovi emisija jednaki 13456,3 eura, goriva tj. prirodnog plina 66683,5 eura, a ostali varijabilni 2861,7 eura. Najmanje troškove zbog malo radnih sati ima dizalica topline s ukupnim iznosom od 10266,8 eura od čega na trošak električne energije otpada 10266,8, a na ostale varijabilna troškove pogona i održavanja 972,0 eura. To je prikazano u tablici 10.

Tablica 10 Troškovi za promatrano razdoblje – S3b

S3b troškovi		Kogeneracija	Dizalica topline	Plinski kotao	Ukupno
TROŠKOVI [EUR]	CO ₂	142108,8	0,0	13456,3	155565,1
	Varijabilni O&M	68780,6	972,0	2861,7	72614,4
	Plin	704227,9	0,0	66683,5	770911,4
	Električna energija	0,0	10266,8	0,0	10266,8
Ukupni trošak [EUR]		915117,4	11238,8	83001,5	1009358,0
CHP_el zarada [EUR]		1718599,0	0,0	0,0	1718599,0
Ukupno (trošak – zarada) [EUR]					-709241,0

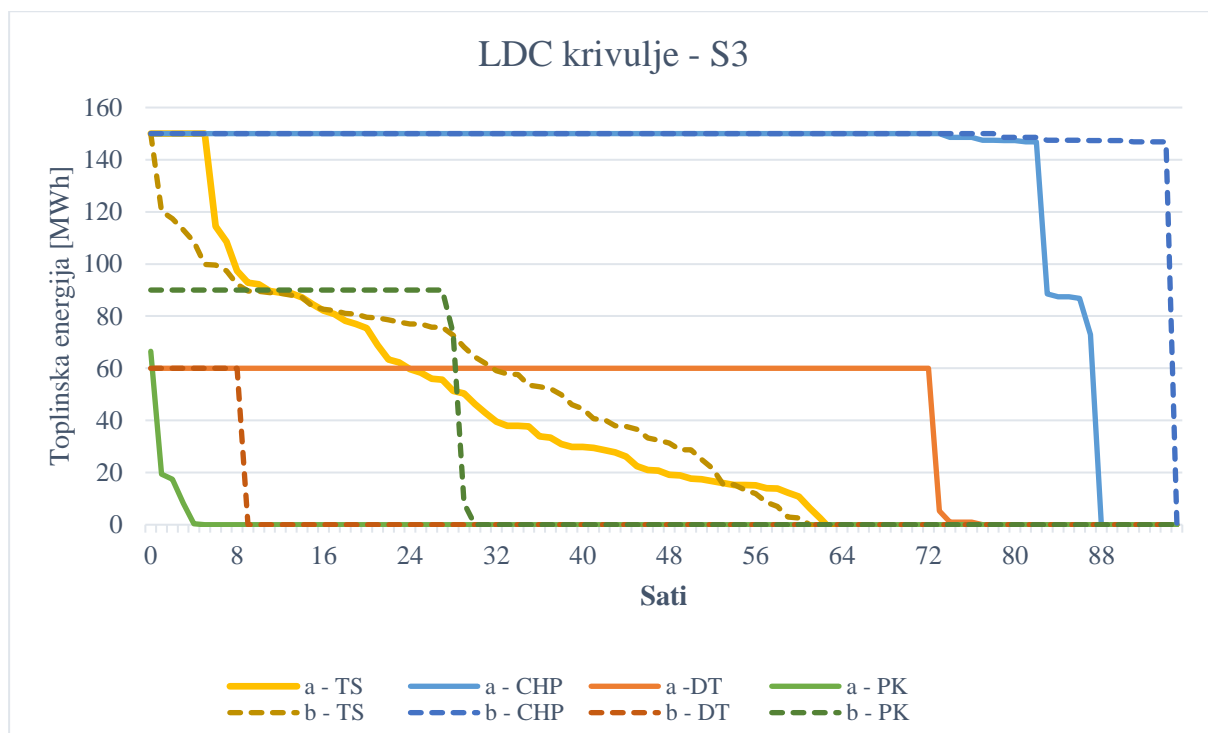
5.3.3. Usporedba S3a i S3b

U tablici 11 je prikazan broj radnih sati i proizvedena energije iz pojedinog postrojenja. Uočljivo je ono što se moglo zaključiti i iz dijagrama proizvodnje po satima, a to je da je u *b* slučaju proizvedeno više električne energije iz kogeneracije koja je i više sati u pogonu. Rad dizalice topline je u *b* slučaju čak za 68 manji od onog u *a*, a za plinski kotao je razlika između *a* i *b* slučaja 25 sati. Ukupno proizvedena toplinska energija je jednaka. Manja je od ukupnog toplinskog opterećenja za promatrano razdoblje koje iznosi 17958 MWh jer se dodatan dio iskoristio iz toplinskog spremnika koji je imao određenu početnu napunjenost jednaku polovici njegove zapremine.

Tablica 11 Usporedba radnih sati i proizvedene energije S3a i S3b

	Kogeneracija		Dizalica topline		Plinski kotao		Ukupno	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Broj radnih sati [h]	88	95	77	9	5	30	170	134
Proizvedena toplinska energija [MWh]	12852,6	14210,9	4388,4	540,0	111,9	2601,6	17352,4	17352,4
Proizvedena električna energija [MWh]	14137,4	15632,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14137,4	15632,0

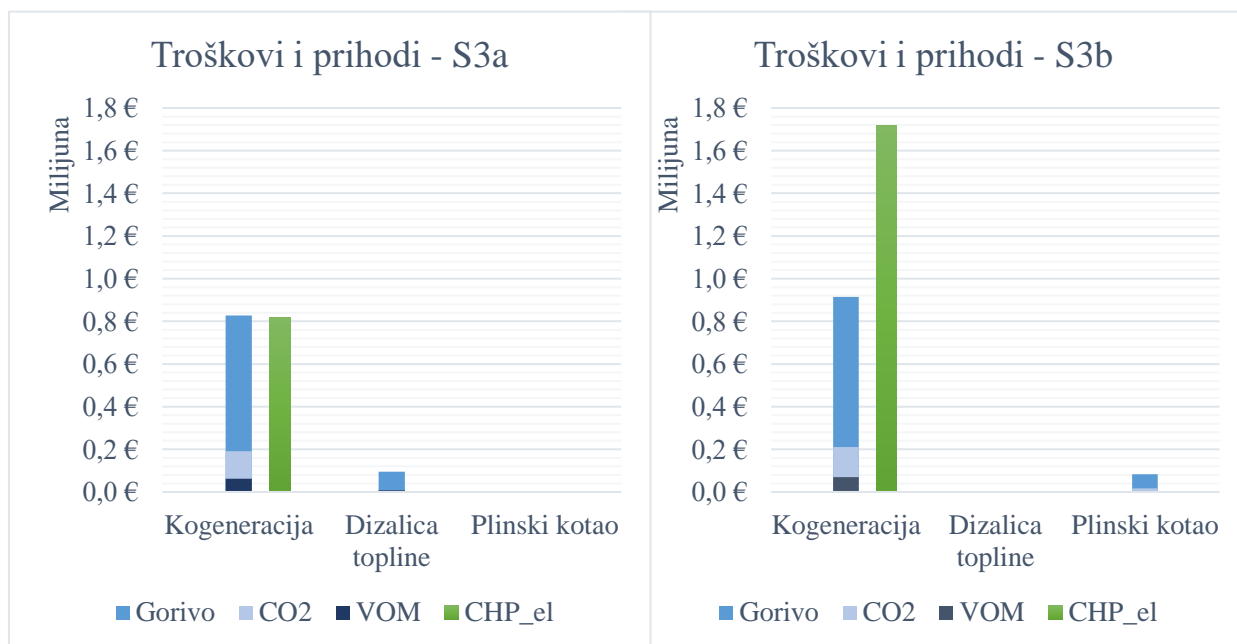
Na slici 25 su prikazane krivulje trajanja toplinskog opterećenja za pojedino postrojenje. Pune linije se odnose na *S2a* slučaj, a isprekidane na *S1b* s većim cijenama električne energije. Razlike su na temelju ranije spomenutih razloga uočljive u pogonu dizalice topline i plinskog kotla u raznim uvjetima cijena dok su one kod primjene toplinskog spremnika i kogeneracije nešto manje.



Slika 25 LDC krivulje – Strategija 3a i 3b

Na slici 26 se nalazi grafički prikaz izrađen na temelju prethodno prikazanih rezultata. Ovdje se kao i kod prošlih strategija jasnije uočava razlika u troškovima odnosno prihodima razmatranih slučajeva. Zeleni stupac koji predstavlja prihod od prodaje električne energije iz

kogeneracijskog postrojenja je zbog većih cijena dvostruko veći u slučaju *b* od onog u *a* gdje su niže cijene električne energije.



Slika 26 Troškovi i prihodi za promatrano razdoblje – S3a i S3b

5.4. Usporedba osnovnih rezultata pojedinih strategija i slučajeva

Usporedba troškova (ili prihoda ako je negativna vrijednost) i količina emisije CO₂ za pojedine slučajeve su prikazani u tablici 12. Na temelju rezultata iz prošlih potpoglavlja i ovih zbirnih prikazanih u navedenoj tablici može se utvrditi kako je profitabilnost sustava veća s kao prvo korištenjem boljeg optimizacijskog programiranja te drugo korištenjem većeg toplinskog spremnika. U slučaju referentnih cijena električne energije, strategija s optimizacijom je u odnosu na onu definiranu cjenovnim pragovima bolja za 6,5 % u smislu smanjenja troškova dok se kod strategije 3, gdje se zajedno s optimizacijom koristio i veliki spremnik, troškovi umanjani za 43,6 %. U slučaju *b* gdje se uzimala dvostruko veća cijena električne energije, negativna vrijednost označava da se zapravo radi o profitu koji je također najveći u posljednjoj strategiji i to za 45,7 % veći od prve. Što se tiče emisija CO₂, razlike su nešto manje. Proizašlo je da se emitira više emisija kod strategije 3 i to se može pripisati činjenici da se kogeneracijsko postrojenje češće puštalo u pogon pri maksimalnom opterećenju kako bi se proizvelo što više električne energije. U strategiji 2 to nije tako izraženo zato jer je postavljano ograničenje veličine spremnika pa kogeneracija ne može proizvoditi više energije iznad namirivanja toplinskog opterećenja ukoliko je spremnik pun. Kod treće strategije je instaliran vrlo veliki spremnik koji nema to ograničenje pa postrojenje može u većini sati raditi pod maksimalnim opterećenjem. Kada bi se stavio dodatan zahtjev nad minimalnu proizvodnju CO₂, rezultati bi zasigurno bili drugačiji.

Tablica 12 Ukupan trošak i emisije CO₂ po strategijama i slučajevima

	S1a	S2a	S3a	S1b	S2b	S3b
Trošak [EUR]	187816,6	175659,8	105905,1	- 486778,8	- 519740,6	- 709241,4
% razlika u odnosu na S1a/b	0,0 %	-6,5 %	-43,6 %	0,0 %	6,8 %	45,7 %
CO ₂ [t]	4977,6	4952,2	5164,0	5690,0	5826,1	6222,6
% razlika u odnosu na S1a/b	0,0 %	-0,5 %	3,7 %	0,0 %	2,4 %	9,4 %

6. ZAKLJUČAK

Sve veća instalacija obnovljivih izvora energije kao što su vjetroturbine i solarne elektrane rezultira smanjenjem eksploatacije fosilnih goriva i CO₂ emisija, ali zbog svoje varijabilne proizvodnje donosi izazove za cijeli elektroenergetski i toplinarski sustav. Postojeće proizvodne jedinice koje koriste fosilna goriva se u dugoročnim scenarijima više neće koristiti, ali su u ovom tranzicijskom razdoblju još vrlo zastupljene pa moraju povećati svoju fleksibilnost kako bi i dalje ostale konkurentne na tržištu. Sustav daljinskog grijanja u kojem se često koriste kogeneracijska postrojenja ima nekoliko mogućnosti za povećanje fleksibilnosti i tako optimirati rad cijelog sustava. Jedan od tih načina je korištenje toplinskih spremnika koji su već godinama u širokoj primjeni. Novije rješenje koje se bazira na sličnom principu pohrane toplinske energije je korištenje mreže daljinskog grijanja kao dinamičkog toplinskog spremnika koji se unaprijed pregrijava pri većoj proizvodnji topline.

U sklopu ovog rada su se provele simulacije različitih strategija vođenja čiji je cilj bio usporediti potencijal ušteda u ekonomskom pogledu, ali i u smislu emisija CO₂. Također se ispitalo kakav učinak imaju varijabilne cijene električne energije na pogon sustava. Temeljem analiziranih rezultata se može ustanoviti da razvijena strategija 1 smisleno formirana na temelju različitih cjenovnih pragova proizvodnje toplinske energije daje nešto lošije rezultate od optimizacije. Takvi rezultati su posljedica slabog iskorištavanja toplinskog spremnika za kojeg je ustanovljeno da ima značajnu ulogu u fleksibilnosti sustava. Prednost koju daje korištenje velikih toplinskih spremnika, kojeg može predstavljati i mreža daljinskog grijanja, je dokazana temeljem rezultata strategije 3 gdje se u razmatranje uzeo veliki spremnik topline. Cjenovno se ta opcija pokazala optimalnom te se smanjio broj sati rada postrojenja u području cijena gdje su njihovi troškovi proizvodnje toplinske energije visoki. Ukoliko bi se u ekonomsku analizu uključili i fiksni troškovi te investicijski, opcija u kojoj se koristi mreža daljinskog grijanja kao toplinski spremnik bi se pokazala povoljnijom u odnosu na ostale dvije iz razloga što nema potrebe za troškovima nabave i instalacije posebnog toplinskog spremnika. Uz uključivanje ostalih obnovljivih izvora energije u sustav daljinskog grijanja u većoj mjeri u kombinaciji s konvencionalnim toplinskim spremnikom i distribucijskom mrežom kao spremnikom topline, troškovi pogona, a i emisije bi se mogli smanjiti. Uz to bi se kogeneracijskim postrojenjima omogućio fleksibilniji rad. Dio snage bi se mogao ostaviti za uključivanje u pružanje pomoćnih usluga, a u periodima visokih cijena električne energije i niskom toplinskim opterećenjem bi postrojenje moglo raditi u punom pogonu jer bi se višak toplinske energije pohranjivao.

Provedene simulacije su potvrdile prednosti koje nudi korištenje mreže daljinskog grijanja kao toplinskog spremnika. Ovo rješenje bi moglo biti jedno od onih koje nudi predstojeća četvrta generacija sustava daljinskog grijanja. Njegov razvoj je kontinuiran te razvojem novih tehnologija, povećanjem učinkovitost i smanjenjem temperatura, nužno smanjenje emisija CO₂ postaje sve više ostvarivo.

7. LITERATURA

- [1] https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en [Pristup: travanj 2020].
- [2] K. Kavvadias, J. Jiménez-Navarro i G. Thomassen, Decarbonating the EU heating sector: Integration of the power and heating sector, JRC Technical Reports, European Commission, 2019.
- [3] <https://keepwarmeurope.eu/countries-in-focus/croatia/hrvatska/> [Pristup: travanj 2020].
- [4] S. M. D., Master thesis: Absorption chillers: their feasibility in district heating,, Lisabon, 2015.
- [5] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund i B. Vad Mathiesen, 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy, 2014.
- [6] R. Krklec, TOPLINSKA ENERGIJA I OIE - Planovi i barijere, 2015.
- [7] »Analize i podloge za izradu Strategije energetskeg razvoja Republike Hrvatske: Bijela knjiga,« EIHP, Zagreb, 2019.
- [8] Enerpedia,
http://enerpedia.net/index.php/ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE#Kogeneracija
[Pristup: travanj 2020]
- [9] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, NN 100/15, 123/16, 131/17, Narodne novine, Zagreb, 2018.
- [10] A. N. Andersen, Market optimization of district heating and cooling plants (DHCP), 2019.
- [11] Heating technologies in DH, RELaTED project, 2018.
- [12] A. David, B. Vad Mathiesen, H. Averfalk, S. Werner i H. Lund, Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems, energies, 2017.
- [13] M. Milić, Izbor vršnih jedinica fleksibilne toplane, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2019.
- [14] Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation, Danish Energy Agency and Energinet,, 2020.
- [15] H. Averfalk, P. Ingvarsson, U. Persson, M. Gong i S. Werner, Large heat pumps in Swedish district heating systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2017 .

- [16] D. M. Sneum, Sandberg, E. R. Soysal, K. Skytte i O. J. Olesen, WP2 Framework conditions, Flexibility in the district heating-electricity interface, 2016.
- [17] Wärtsilä, Dynamic District Heating: A technical guide for a flexible CHP plant, 2019.
- [18] D. Lončar, Vođenje energetske sustava, Zagreb.
- [19] Energiforsk, <https://energiforsk.se/en/programme/thermal-energy-storage/flexibility-options-from-district-heating-illustrations-1/> [Pristup: travanj 2020].
- [20] H. Gadd i S. Werner, Thermal energy storage systems for district heating and cooling, Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications, 2015, str. 467-478.
- [21] D. Basciotti, F. Judex, O. Pol i R.-R. Schmidt, Sensible heat storage in district heating networks: a novel control strategy using the network as storage.
- [22] A. Vandermeulen, B. van der Heijde i L. Helsen, Controlling district heating and cooling networks to unlock flexibility: A review, *Energy*, 2018.
- [23] HERA, GODIŠNJE IZVJEŠĆE ZA 2017. GODINU, 2018.
- [24] M. Pavičević, T. Novosel, T. Pukšec i N. Duić, Hourly optimization and sizing of district heating systems considering building refurbishment – Case study for the city of Zagreb, *Energy*, 2017.
- [25] <https://www.bsp-southpool.com/home.html>, [Pristup: travanj 2020].
- [26] D. F. Dominković, R. G. Junker, K. B. Lindeberg i H. Madsen, Implementing flexibility into energy planning models: Soft-linking of a high-level energy planning model and a short-term operational model, *Applied Energy*, 2020.

PRILOZI

I. CD-R disc