

# Strategije vođenja mikro mreže industrijske zone

---

Šeperović, Ervin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:096032>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ervin Šeperović**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Ervin Šeperović

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru, na pruženoj pomoći, usmjeravanju i savjetima pri izradi završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na podršci, povjerenju i razumijevanju tijekom studiranja.

Ervin Šeperović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 -- 04 / 23 -- 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ervin Šeperović** JMBAG: **0035221488**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Strategije vođenja mikro mreže industrijske zone**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Industrial park micro grid control strategies**

Opis zadatka:

Industrijski potrošači potaknuti višestrukim povećanjem cijena energenata razmatraju korištenje alternativnih energetskih izvora, koji bi omogućili zamjenu ili dopunu postojećih. Pored prekrivanja krovova gospodarskih zgrada fotonaponskim modulima procjenjuje se i opravdanost korištenja i ostalih izvora energije poput biomase, bioplina, dizalica topline ili geotermalne energije.

U okviru zadatka potrebno je:

1. Za industrijsku zonu u kojoj su smješteni pogoni prehrambeno prerađivačke industrije, hladnjača, pivovara, tvornica kartonske ambalaže, tvornica betonskih proizvoda te *data center* definirati dnevne, tjedne i sezonske profile električnog, toplinskog i rashladnog opterećenja;
2. Razviti Matlab/Simulink® model za simulaciju pogona mikromreže kojim će se obuhvatiti: fotonaponske module, bioplinsko postrojenje, dizalice topline i sustave za pohranu energije;
3. Prilagoditi primjer raspoloživim podacima godišnjeg sunčevog zračenja i očekivane energetske potrošnje na lokaciji u srednjoj Dalmaciji;
4. Simulacijom usporediti različite konfiguracije kao i strategije vođenja mikromreže s obzirom na ekonomičnost pogona, udio obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije, te utjecaj na održavanje i životni vijek komponenata sustava.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. MIKROMREŽE .....	2
2.1. Otočni režim rada .....	3
2.2. Strategije vođenja mikromreže.....	3
3. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE – OIE.....	5
3.1. OIE u Svijetu .....	6
3.2. OIE u Hrvatskoj .....	7
3.3. Postrojenja na OIE .....	8
3.3.1. Fotonaponski (PV) moduli .....	8
3.3.2. Dizalice topline .....	9
3.3.3. Postrojenja na bioplin.....	10
3.3.4. Sustavi za pohranu energije.....	11
4. INDUSTRIJSKA ZONA .....	13
4.1. Data centar.....	13
4.2. Prehrambeno-prerađivačka industrija .....	15
4.3. Tvornica betonskih proizvoda .....	16
4.4. Tvornica kartonske ambalaže.....	17
4.5. Pivovara.....	19
4.6. Hladnjača.....	20
4.7. Potreba industrijske zone .....	21
5. OPTIMIZACIJA.....	25
5.1. MATLAB .....	25
5.2. Linearno programiranje.....	26
5.3. Uvjeti simulacije .....	26
5.3.1. Tjedan u kolovozu.....	27
5.3.2. Tjedan u veljači .....	28
5.3.3. Proizvodnja bioplinskog postrojenja.....	29
6. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE OPTMIZACIJE .....	30
6.1. Električna energija.....	31
6.2. Toplinska energija .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43
PRILOG .....	45

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Shema mikromreže bazirana na obnovljivim izvorima energije [4].....	2
Slika 2. Obuhvat funkcija vođenja mikromrežom [5].....	4
Slika 3. Obnovljivi izvori energije [7] .....	5
Slika 4. Trend kumulativnog kapaciteta snage šest različitih tehnologija od 2010. do 2027 [10] .....	6
Slika 5. Struktura elektrana na OIE do 2019 [12]. .....	7
Slika 6. Shema solarne elektrane daelim-electric.com [15] .....	8
Slika 7. Princip rada dizalice topline [16] .....	9
Slika 8. Shema rada postrojenja na bioplin [17] .....	10
Slika 9. Shema sustava za pohranu električne energije u baterijama [18] .....	11
Slika 10. Akumulacijski spremnici Centrometal CAS [19] .....	12
Slika 11. Ilustracija data centra [20].....	13
Slika 12. Prikaz prosječnog PUE za podatkovni centar [21] .....	14
Slika 13. Raspored potrošnje električne energije data centra tijekom godine [22].....	15
Slika 14. Prikaz procesa prerade sirutke od svježeg sira.....	15
Slika 15. Potrošnja energije prehrambeno-prerađivačke tvornice tijekom godine [22].....	16
Slika 16. Raspored potrošnje energije tvornice betona tijekom godine [22] .....	17
Slika 17. Tijek proizvodnje kartona .....	18
Slika 18. Energetski konzum za tvornicu kartonske ambalaže kroz godinu [22] .....	18
Slika 19. Shema procesa proizvodnje piva [25].....	19
Slika 20. Energetska potreba za pogon pivovare tijekom svih 12 mjeseci u godini [22] .....	20
Slika 21. Mjesečna energetska potrošnja hladnjače [22] .....	21
Slika 22. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, električna energija .....	22
Slika 23. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, električna energija.....	22
Slika 24. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, toplinska energija.....	23
Slika 25. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, toplinska energija .....	23
Slika 26. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, rashladna energija.....	24
Slika 27. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, rashladna energija .....	24
Slika 28. Linprog funkcija [29] .....	26
Slika 29. Cijena električne mreže za tjedan u veljači i kolovozu.....	27
Slika 30. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih modula za tjedan u kolovozu.....	28
Slika 31. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih modula za tjedan u veljači .....	28
Slika 32. Cijene za proizvodnju energije tijekom kolovoza.....	31
Slika 33. Tokovi proizvodnje za tjedan u kolovozu.....	32
Slika 34. Tokovi proizvodnje za tjedan u kolovozu bez baterije .....	32
Slika 35. Viškovi nastali iz fotonaponskih elektrana .....	33
Slika 36. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u kolovozu .....	33
Slika 37. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u kolovozu s gubitcima .....	34
Slika 38. Prikaz optimizacije proizvodnje i opterećenja ind. zone .....	34
Slika 39. Cijene za proizvodnju energije tijekom tjedna u veljači .....	35
Slika 40. Tokovi proizvodnje za tjedan u veljači .....	35
Slika 41. Tokovi proizvodnje za tjedan u veljači bez baterije .....	36
Slika 42. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u veljači .....	36
Slika 43. Viškovi energije iz bioplinskog postrojenja.....	37
Slika 44. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u veljači s gubitcima.....	37
Slika 45. Prikaz optimizacije proizvodnje i opterećenja ind. zone za tjedan u veljači .....	37
Slika 46. Proizvodnja i potreba toplinske energije za kolovoz .....	39
Slika 47. Kapacitet toplinskog spremnika za kolovoz .....	39

---

Slika 48. Proizvodnja i potreba toplinske energije za veljaču.....	40
Slika 49. Kapacitet toplinskog spremnika za veljaču.....	40
Slika 50. Utjecaj na proizvodnju i opterećenje bez toplinskog spremnika .....	41



**POPIS OZNAKA**

## Oznaka

$f$	vektor koeficijenata linearne funkcije cilja koju treba minimizirati	
$A$	matrica koeficijenata ograničenja linearne nejednakosti	
$b$	vektor vrijednosti ograničenja linearne nejednakosti	
$A_{eq}$	matrica koeficijenata ograničenja linearne jednakosti	
$b_{eq}$	vektor vrijednosti ograničenja linearne jednakosti	
$lb$	vektor donjih granica varijabli u funkciji cilja	
$ub$	vektor gornjih granica varijabli u funkciji cilja	
$E_e$	prosječna dnevna radijacija	$\frac{kWh}{m^2}$
$A_{pv}$	površina fotonaponskog modula	$m^2$
$\eta$	efikasnost PV modula	
$E_{sol}$	Solarna energija po danu	kWh
$T_h$	- trošak na satnoj razini,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{pv,h}$	- cijena energije iz fotonaponske elektrane,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$P_{pv,h}$	-prosječna snaga fotonaponske elektrane u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{bio,h}$	- cijena energije iz bioplinskog postrojenja,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$P_{bio,h}$	-prosječna snaga bioplinskog postrojenja u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{mre,h}$	- cijena energije iz mreže,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$P_{mre,h}$	-prosječna snaga mreže u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{batt,h}$	- cijena energije iz baterije,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$P_{batt,h}$	-prosječna snaga baterije u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$E_{batt,h}$	- trenutna napunjenost baterije,	kWh

**SAŽETAK**

U radu je provedena analiza pokrivanja energetske potrebe industrijske zone u kojoj su smješteni data centar, hladnjača, tvornica betonskih proizvoda, tvornica kartonskih proizvoda, pivovara i prehrambeno-prerađivačka tvornica. Zbog povećanja cijene energenata razmotreno je korištenje energije iz obnovljivih izvora energije, i to fotonaponske elektrane i iz bioplinskog postrojenja. Razvijen je optimizacijski model i primijenjen u programskom paketu MATLAB za simulaciju pogona mikromreže kojom se energetske potrebe industrijske zone pokrivaju korištenjem, fotonaponskih modula, bioplinskog postrojenja, dizalica topline, sustava za pohranu električne i toplinske energije i razmjene s elektroenergetskim sustavom. Simulacijom su predložene optimalne strategije vođenja pogona mikromreže po pitanju ekonomičnosti pogona i prema udjelu obnovljivih izvora energije za dva ekstremna slučaja. Jedan je za tjedan u kolovoz kada s razmjerno visokom proizvodnjom električne energije iz fotonaponske elektrane kao i visokim ukupnim energetske potrebama industrijske zone, a drugi slučaj je za zimski tjedan sa značajno najmanjom proizvodnjom električne energije iz fotonaponske elektrane i najmanjom opskrbom industrijske zone.

Ključne riječi: optimizacija, mikromreže, obnovljivi izvori energije, MATLAB

---

**SUMMARY**

The work analyses the energy needs of the industrial zone in which data centre, cold store, concrete products factory, cardboard products factory, brewery and food processing factory are located. Due to the increase in energy prices, the use of energy from renewable energy sources was considered, namely the photovoltaic power plant and the biogas plant. An optimization model was developed and applied in the MATLAB software package for simulation of microgrid operation that covers the energy needs of the industrial zone using photovoltaic modules, biogas plant, heat pumps, electricity and heat storage systems and exchanges with the electricity system. The simulation proposed optimal strategies for microgrid operation in terms of operational economy and the share of renewable energy sources for two extreme cases. One is for a week in August when, with relatively high production of electricity from the photovoltaic power plant as well as high total energy needs of the industrial zone, the other is for a winter week with significantly the smallest production of electricity from the photovoltaic power plant and the smallest supply of the industrial zone.

Key words: optimization, microgrids, renewable energy sources, MATLAB

## 1. UVOD

Opskrba Europe energentima u 2022. godini pretrpjela je značajne promjene zbog ponajprije geopolitičkih razloga. Uvoz prirodnog plina s europskog istoka, ključnog za grijanje, industrijske procese i proizvodnje električne energije supstituiran je uvozom ukapljenog plina sa zapada i Bliskog istoka što je sve uzrokovalo višestruko povećanje veleprodajnih cijena električne energije i plina. Europske su vlade počele provoditi niz mjera za ublažavanje utjecaja viših troškova na potrošače i poduzeća.

Mjera koja nas zanima s inženjerskog stajališta jest uvođenje zelenih energetske tehnologije. Zamjenom fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije, smanjile bi se ne samo nabavne cijene energije, nego i emisije štetnih tvari u okolišu kao i budući rizici klimatskih promjena. Može se reći da aktualna energetska kriza predstavlja „vjetar u leđa“ zelenoj energetske tranziciji.

Upravo iz tih razloga industrijski potrošači motivirani su za prelazak na alternativne energetske izvore. Uz najpopularnije fotonaponske modele, razmatra se i korištenje dizalice toplina, geotermalne energije i energenata kao što su biomasa i bioplin.

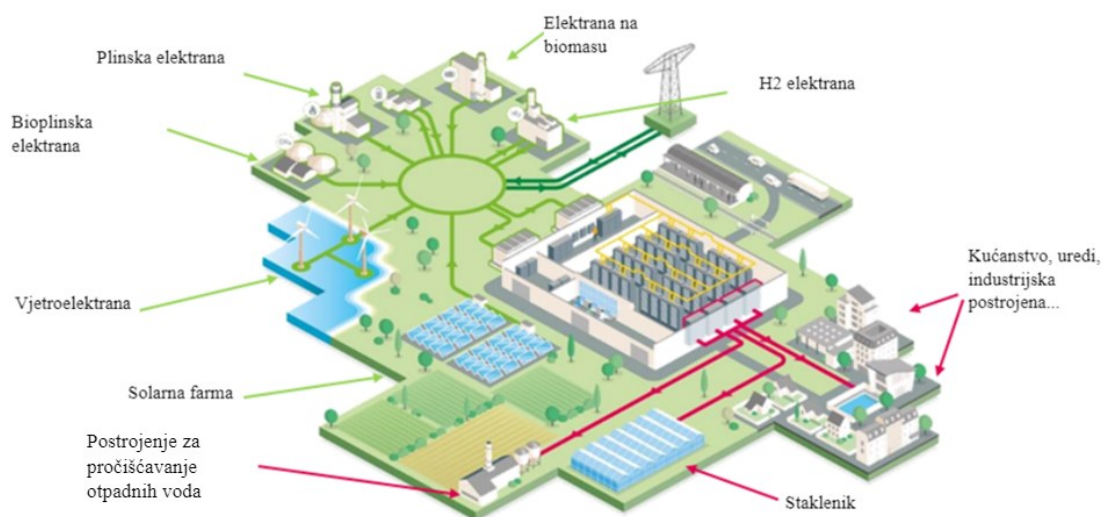
Ovaj završni rad na primjeru zamišljene industrijske mikromreže, ukazuje na mogućnost optimalnog vođenja energetske sustava u uvjetima varijabilne proizvodnje lokalnih obnovljivih izvora kao i varijabilnih tržišnih cijena električne energije.

U radu je izveden matematički model za simulaciju pogona mikromreže koja se sastoji od solarnih panela, bioplinskih postrojenja, dizalice topline i sustava za pohranu energije. Simulacijom su uspoređene različite strategije i načini vođenja mikromreže u ekonomskom pogledu, zatim u pogledu različitog udjela obnovljivih izvora energije koji se koriste za proizvodnju električne energije. Rezultati koji su dobiveni simulacijom prikazani su dijagramski i tablično.

## 2. MIKROMREŽE

Mikromreža industrijske zone je decentralizirani i lokalizirani energetska sustav koji kombinira višestruke izvore proizvodnje energije, poput sunca, vjetra ili plina (prirodnog ili bioplina), sa sustavima za skladištenje energije, koji omogućavaju uravnoteženje ponude i potražnje. Projektirana je za pouzdanu, financijski prihvatljivu i učinkovitu isporuku različitih oblika energije industrijskoj zoni, uz smanjenje ovisnosti o elektroenergetskoj mreži. Može se koristiti u raznim okruženjima, uključujući stambena naselja, sveučilišne kampuse, vojne baze i industrijske objekte.

Ključna značajka mikromreže je mogućnost rada u “otočnom režimu rada“, što znači da se može isključiti iz glavne električne mreže i nastaviti funkcionirati neovisno. To joj omogućuje opskrbu električnom energijom tijekom ispada mreže ili drugih iznenadnih, odnosno hitnih situacija. Mikromreže među ostalim nude i druge prednosti kao što su mogućnost smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima praćeno smanjenjem emisija, povećanje energetske sigurnosti i pouzdanosti te poboljšanje stabilnosti mreže uz povećanu integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije.



Slika 1. Shema mikromreže bazirana na obnovljivim izvorima energije [4]

## 2.1. Otočni režim rada

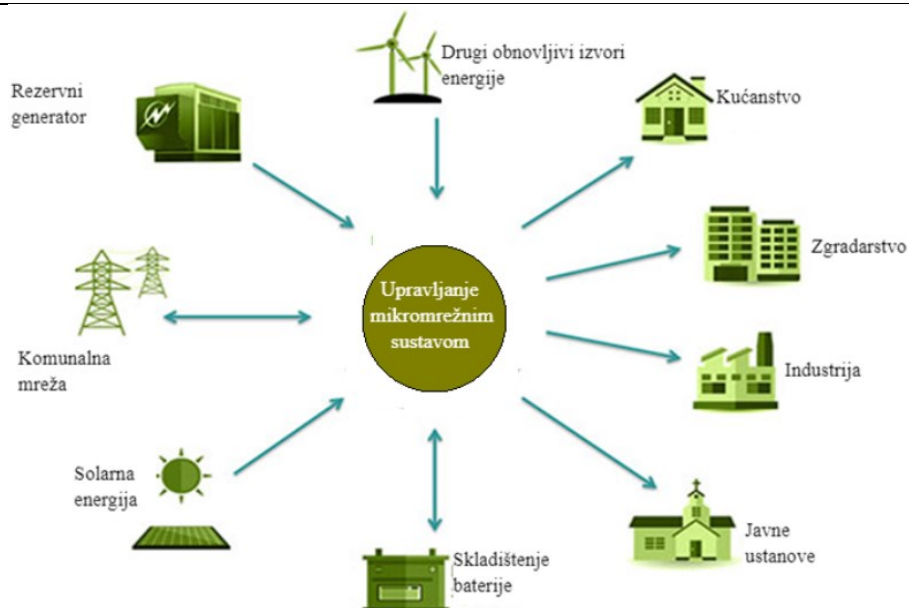
Otočni režim rada koristi se u izoliranim energetskim sustavima. Donedavno se energija dobivala iz manjih termoelektrana s dizel motorima. Danas je uobičajena izgradnja otočnih sustava s opskrbom energije iz obnovljivih izvora energije u kombinaciji s oblikom pohrane (baterije za električnu energiju i toplinski spremnik za toplinsku energiju). Proizvodnja energije iz OIE predstavlja izazov pri usklađivanju dobave i potražnje, stoga je skladištenje energije važna karika pri rješavanju problema ovakvog karaktera te omogućuje puno veću fleksibilnost sustava.

## 2.2. Strategije vođenja mikromreže

Jedan od ključnih izazova u projektiranju i radu mikromreže industrijskog parka je regulacija tokova energije unutar mikromreže. Ovo je osobito važno kada je mikromreža povezana s tradicionalnom električnom mrežom, budući da treba omogućiti razmjenu tokova između dva sustava bez prekida napajanja industrijskog parka. Strategije vođenja mikromreže industrijskih parkova osnove su za održavanje stabilnog i učinkovitog rada sustava [6].

Postoji nekoliko različitih strategija vođenja koje se mogu koristiti za upravljanje tokovima energije unutar mikromreže industrijske zone. Jedna ključna strategija vođenja mikromreže je odgovor na potražnju, što uključuje prilagodbu opterećenja sustava kao odgovor na promjene u dostupnosti OIE. Na primjer, tijekom razdoblja visoke solarne ili vjetrene proizvodnje, mikromreže industrijskih parkova mogu smanjiti svoje oslanjanje na fosilna goriva prebacivanjem opterećenja na OIE.

Mikromreže industrijskih parkova koriste baterije i toplinske spremnike za pohranu viška energije proizvedene iz obnovljivih izvora za kasniju uporabu. Učinkovitim upravljanjem punjenja i pražnjenja ovih baterija, mikromreža može optimizirati korištenje pohranjene energije kako bi se smanjili troškovi i poboljšala pouzdanost sustava.



Slika 2. Obuhvat funkcija vođenja mikromrežom [5]

Jedan tehnički pristup je korištenje središnjeg regulatora koji je odgovoran za nadzor protoka energije unutar mikromreže. Ovaj regulator može koristiti različite algoritme za optimiziranje protoka energije i osiguravanje rada mikromreže na učinkovit i pouzdan način.

Drugi pristup je korištenje distribuirane regulacije, gdje je svaka komponenta mikromreže odgovorna za nadzor vlastitog protoka energije. To može biti složenije za implementaciju, ali omogućava veću fleksibilnost i otpornost na prekinde napajanja [6].

Uz ove pristupe, koriste se i napredne tehnike upravljanja kao što je primjerice prediktivna regulacija s modelom procesa (MPC), a mogu se upotrebljavati za optimiziranje rada mikromreže industrijskog parka u stvarnom vremenu. MPC primjenjuje matematičke modele sustava za predviđanje budućeg ponašanja i optimiziranja kontrolnih odluka na temelju tih informacija. To može poboljšati stabilnost i učinkovitost mikromreže, a isto tako i omogućiti integraciju više distribuiranih izvora energije.

### 3. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE – OIE

Obnovljiva energija odnosi se na izvore energije koji se prirodno obnavljaju i dostupni su u izobilju, za razliku od neobnovljivih izvora kao što su ugljen, nafta i prirodni plin. Ovi izvori uključuju solarnu energiju, energiju vjetra, hidroenergiju, geotermalnu energiju, energiju biomase te energiju plime i oseke.



Slika 3. Obnovljivi izvori energije [7]

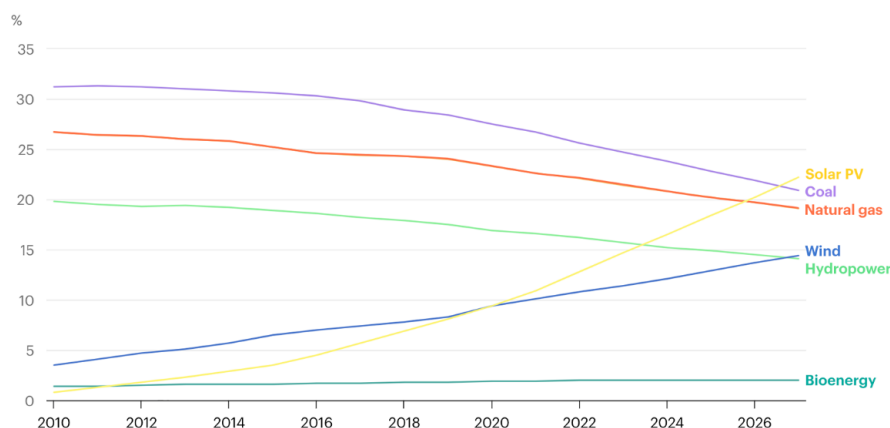
Potrošnja energije u svijetu ubrzano raste, što dovodi do povećanja emisija stakleničkih plinova i sve veće brige za okoliš. Korištenje obnovljivih izvora energije može pomoći u ublažavanju negativnih utjecaja potrošnje energije, budući da ne ispuštaju štetne spojeve u okoliš. Osim toga, OIE mogu osigurati energetske sigurnost s obzirom na to da ih ima u izobilju i široko su dostupni. Oni također mogu potaknuti lokalni gospodarski razvoj stvaranjem radnih mjesta u sektoru obnovljive energije. Međutim, implementacija OIE nije bez izazova. Visoki početni troškovi ulaganja u potrebe za novijim tehnologijama skladištenja i distribucije mogu nekim zemljama otežati pristup OIE.



### 3.1. OIE u Svijetu

Smanjena opskrba fosilnim gorivima naglasila je prednosti domaće obnovljive električne energije proizvedene u energetskej sigurnosti, što je navelo mnoge zemlje da ojačaju politike koje podržavaju OIE.

Ukupni rast kapaciteta u cijelom svijetu trebao bi se gotovo udvostručiti u sljedećih pet godina, prestižući ugljen kao najveći izvor proizvodnje električne energije, usput i pomažući održati na životu mogućnost ograničenja globalnog zatopljenja na 1,5 °C. Očekuje se da će globalni kapacitet obnovljive energije porasti za 2400 (GW) u razdoblju od 2022. do 2027. godine, što je iznos jednak cjelokupnom današnjem energetskej kapacitetu Kine, prema Renewables 2022., posljednjem izdanju godišnjeg izvješća IEA-e [10].



Slika 4. Trend kumulativnog kapaciteta snage šest različitih tehnologija od 2010. do 2027 [10]

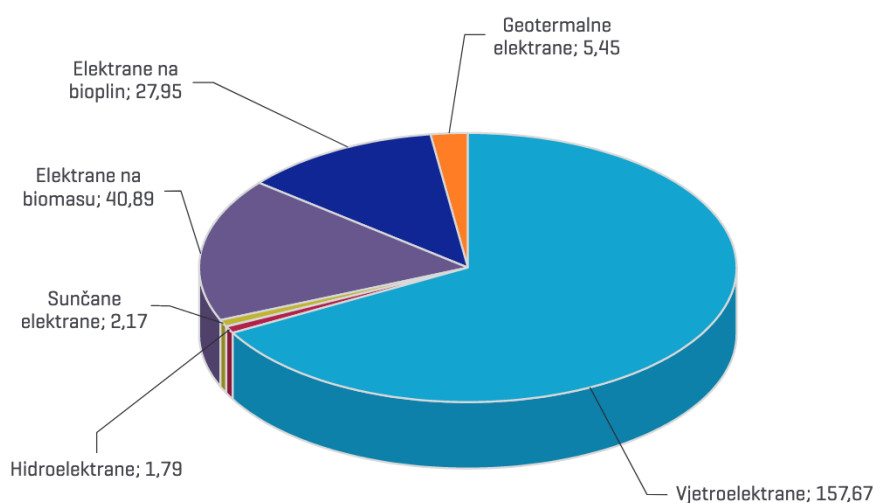
Za to posljednje godišnje izvješće izvršni direktor IEA-e, Fatih Birol kazao je da „obnovljivi izvori energije već su se brzo širili, ali ih je globalna energetska kriza gurnula u izvanrednu novu fazu još bržeg rasta dok zemlje pokušavaju iskoristiti prednosti svoje energetske sigurnosti. Svijet će u sljedećih 5 godina dodati onoliko obnovljive energije koliko je to učinio u prethodnih 20 godina“. Dodao je i da je ovo konkretan primjer „kako trenutna energetska kriza može biti povijesna prekretnica prema čistijem i sigurnijem energetskej sustavu.“ [10].

### 3.2. OIE u Hrvatskoj

Republika Hrvatska, kao članica Europske unije, obvezala se na prihvaćanje europskog klimatsko-energetskog paketa koji podrazumijeva i Direktivu 2009/28/EZ o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora. Prihvaćanjem direktive, Hrvatska je preuzela obvezu povećanja uporabe energije iz obnovljivih izvora, pri čemu je u 2020. godini udio energije iz obnovljivih izvora u bruto neposrednoj potrošnji trebao iznositi najmanje 20%, promatrano na razini EU. Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost sufinancira nabavu sustava za korištenje OIE uglavnom kroz programe energetske obnove (sustavi za korištenje OIE su opravdan trošak u programima obnove obiteljskih, višestambenih i nestambenih zgrada), ali i kao poseban program namijenjen kućanstvima i drugim korisnicima [11].

Strategija energetskog razvoja Hrvatske do 2030., s pogledom na 2050. godinu, predviđa znatno veći udio proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, veću energetska učinkovitost i smanjenje emisije stakleničkih plinova. U razdoblju do 2030. planirano je povećanje udjela obnovljivih izvora u odnosu na potrošnju na barem 32% s potencijalnim povećanjem do 36,4%, dok bi do 2050. taj udio trebao iznositi 65%.

Premda je i Hrvatska članica EU i ona trpi posljedice energetske krize zbog rata u Ukrajini. Zbog takve situacije i visokih cijena energenata koji dolaze iz Rusije, primorana je raditi na povećanju korištenja OIE, kako bi smanjila ovisnost o uvozu prirodnog plina i istovremeno ispunila svoje ciljeve smanjenja emisije CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O. Hrvatska se nalazi na Jadranskoj obali i bogata je prirodnim resursima, kao što su energija vjetra, sunca i vode.



Slika 5. Struktura elektrana na OIE do 2019 [12].

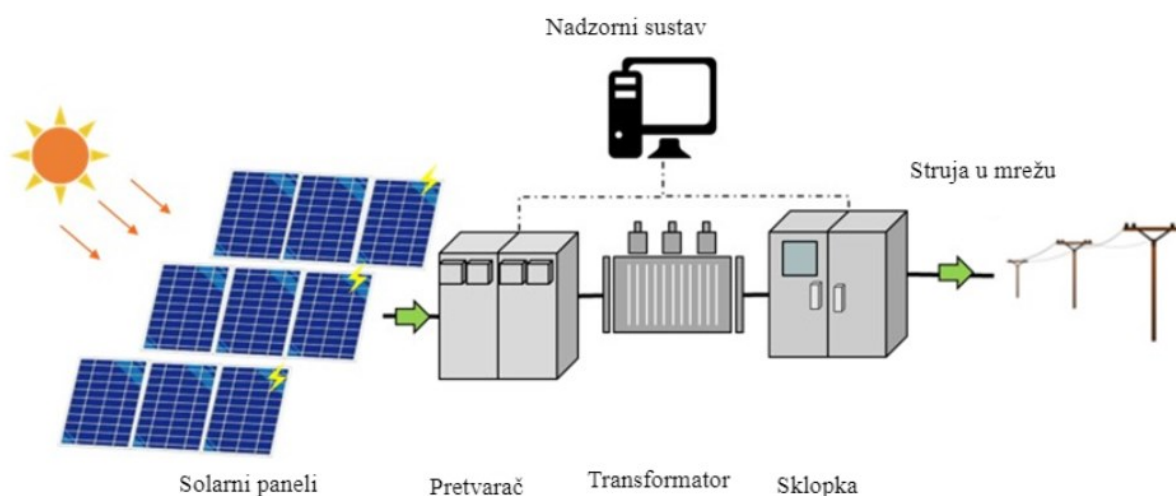
### 3.3. Postrojenja na OIE

#### 3.3.1. Fotonaponski (PV) moduli

Fotonaponski moduli bitne su komponente u proizvodnji solarne energije. Moduli se sastoje od fotonaponskih ćelija koje su spojene u seriju kako bi tvorile niz. Ćelije su sastavljene od poluvodičkih materijala, poput silicija, koji mogu transformirati sunčevu svjetlost u električnu energiju. PV moduli proizvode električnu energiju, koja se može iskoristiti za različite primjene, od napajanja domova i tvrtki do opskrbe električnom energijom u udaljenim područjima gdje tradicionalne električne mreže nisu dostupne. Također se koriste u velikim solarnim i integriranim farmama koje dovode električnu energiju u mrežu kako bi zadovoljile sve veće potrebe za energijom.

Učinkovitost fotonaponskih modula kreće se 15% - 25%. Energija koja se ne transformira u električnu energiju pretvara se u toplinsku koja se može iskoristiti putem solarnih termalnih kolektora. Fotonaponske ćelije griju se te povećanjem njihove temperature smanjuje se efikasnost PV modula.

Jedna od glavnih prednosti PV modula je njihova sposobnost proizvodnje čiste energije. Solarna energija ne emitira štetne stakleničke plinove, što je čini privlačnom zamjenom za fosilna goriva. Osim toga, ne zahtijevaju nikakvo gorivo za rad, npr. termoelektre, što ih čini dugoročno isplativim. PV moduli ipak imaju neka ograničenja. Glavni izazov je ovisnost o vremenskim uvjetima. Proizvodnja solarne energije može se smanjiti za vrijeme oblačnih dana, a tijekom zimskih mjeseci moduli su također manje učinkoviti, budući da dani kraće traju.



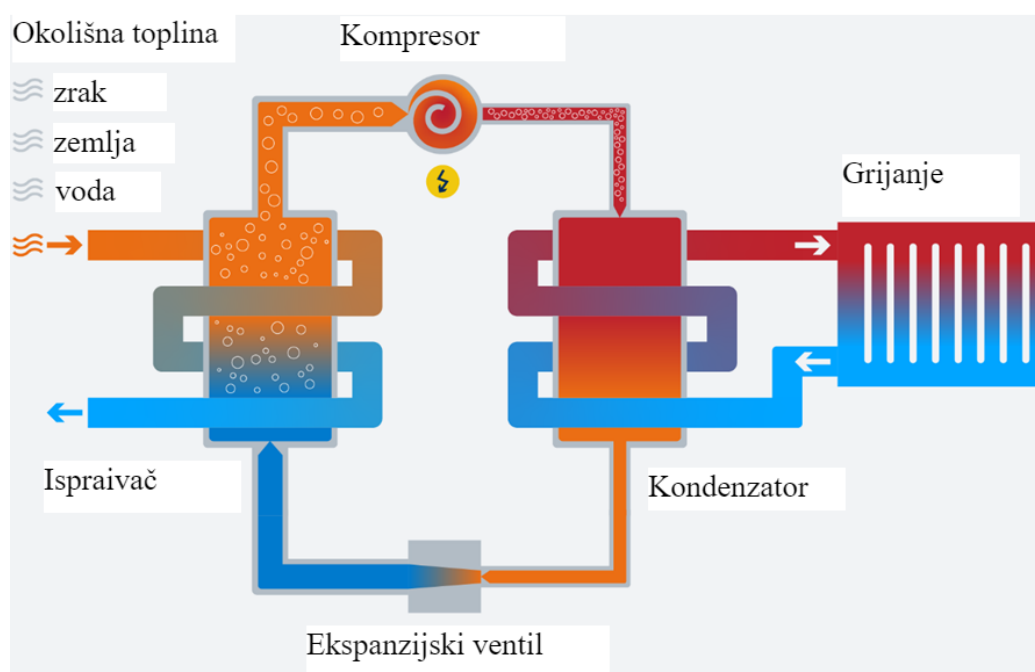
Slika 6. Shema solarne elektrane daelim-electric.com [15]

### 3.3.2. Dizalice topline

Dizalice topline vrsta su sustava grijanja i hlađenja koji koriste električnu energiju, proizvedenu iz OIE ili iz postrojenja na fosilna goriva, za prijenos topline s hladnijeg na topliji spremnik. One su energetski učinkovita alternativa tradicionalnim sustavima grijanja i hlađenja koji se oslanjaju na fosilna goriva.

Princip rada je takav da oni izvlače toplinu iz zraka ili tla izvan zgrade i prenose je unutar kako bi osigurale grijanje tijekom hladnih mjeseci. Ljeti je proces obrnut, toplinska pumpa odvodi toplinu iz zgrade i ispušta je van kako bi osigurala hlađenje. Koriste manje energije od tradicionalnih sustava grijanja i hlađenja jer toplinu prenose umjesto da je stvaraju izgaranjem. Toplinski izvori dizalica toplina uglavnom su zrak, voda i tlo. Takvi izvori moraju osigurati potrebnu količinu topline za bilo koje doba dana, a uložena energija za prijenos topline od izvora do isparivača mora se održavati što nižom. Isto tako i troškovi priključenja dizalice topline na izvor moraju biti što niži.

Dizalice topline ne zahtijevaju puno održavanja i imaju dug vijek trajanja, što ih dugoročno čini isplativima. One se mogu jednostavno integrirati u postojeći sustav grijanja i hlađenja zgrade, čineći tranziciju na OIE pojednostavljenom.



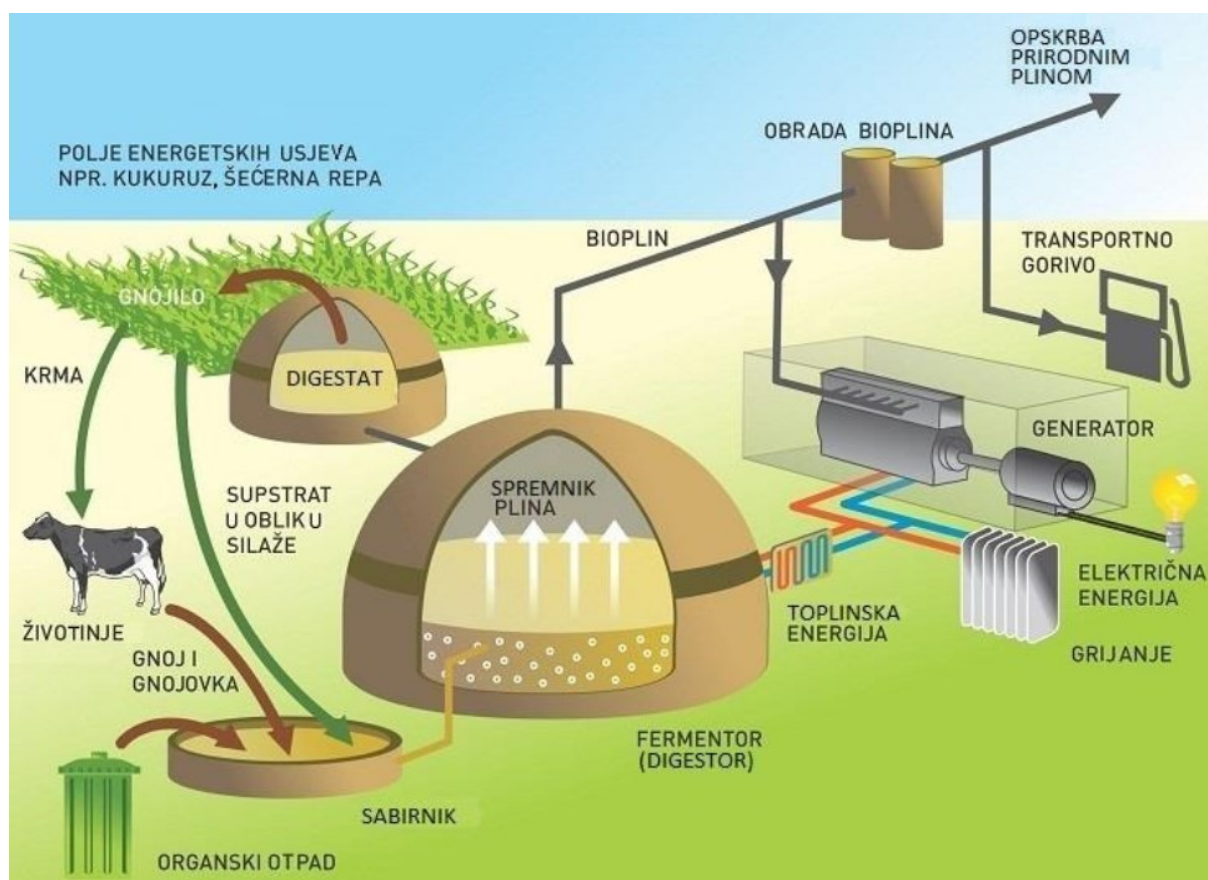
Slika 7. Princip rada dizalice topline [16]

### 3.3.3. Postrojenja na bioplin

Postrojenja na bioplin vrsta su postrojenja koja koriste organski otpad, kao što su ostaci hrane, životinjskog gnoja i kanalizacije, za proizvodnju električne energije, toplinu za grijanje prostorija i na kraju kao gorivo za automobile.

Otpad koji je poslan na odlagalište razgrađuje se anaerobnim digestorima, koji proizvode mješavinu metana i ugljičnog dioksida.

Bioplinska postrojenja adekvatna su za lokalne zajednice kojima mogu osigurati pouzdan izvor energije. Proizvodnjom električne energije iz organskog otpada koji nastaje lokalno, smanjena je potreba za transportom otpada na velike udaljenosti koji može biti neisplativ. Isto tako, ta su postrojenja ujedno i rješenje za smanjenje nagomilanog organske komponente komunalnog otpada.



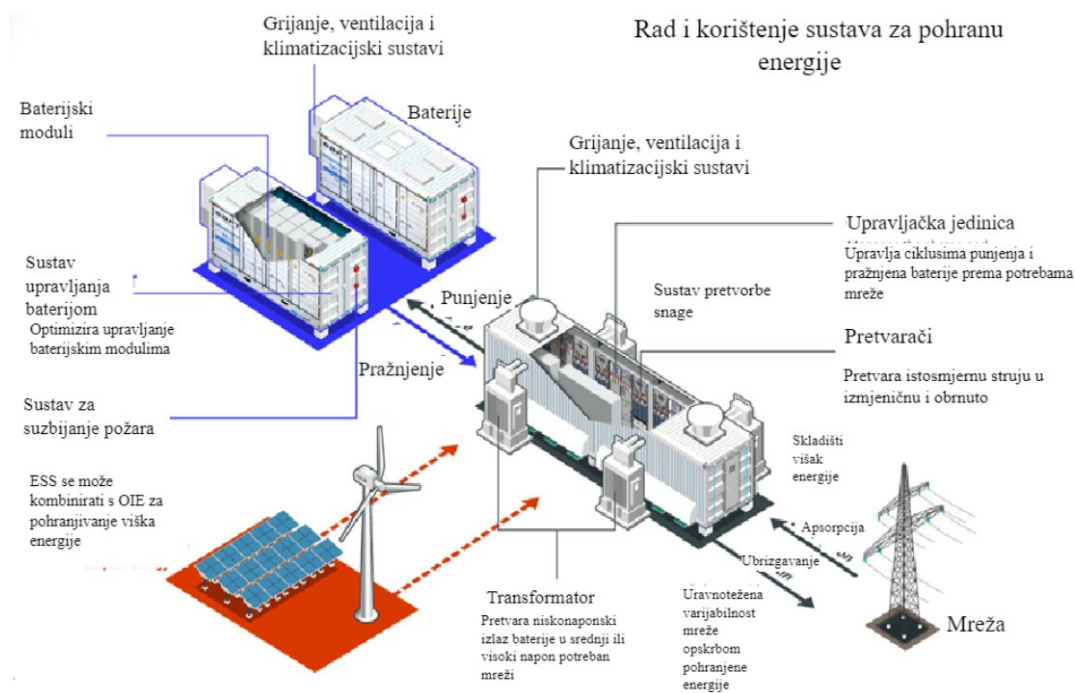
Slika 8. Shema rada postrojenja na bioplin [17]

### 3.3.4. Sustavi za pohranu energije

Skladištenje energije je glavna karika u iskorištavanju punog potencijala obnovljivih izvora energije. Za vrijeme niske potražnje, ona energija koja se nije iskoristila se skladišti kako bi se smanjila neravnoteža između potražnje i proizvodnje. Skladištena energija koristi se kasnije za vrijeme velike potražnje ili nestanka struje. Postoji nekoliko vrsta sustava za pohranu energije, uključujući litij-ionske baterije, skladištenje energije zamašnjakom, toplinsko skladištenje i pohranu komprimiranog zraka.

Sustavi za pohranu energije također imaju potencijal povećati učinkovitost i smanjiti troškove sustava obnovljive energije. Pohranjivanjem viška energije mogu pomoći u ublažavanju fluktuacija u proizvodnji energije i smanjiti potrebu za gradnjom vršnih postrojenja, kao npr. postrojenja na prirodni plin.

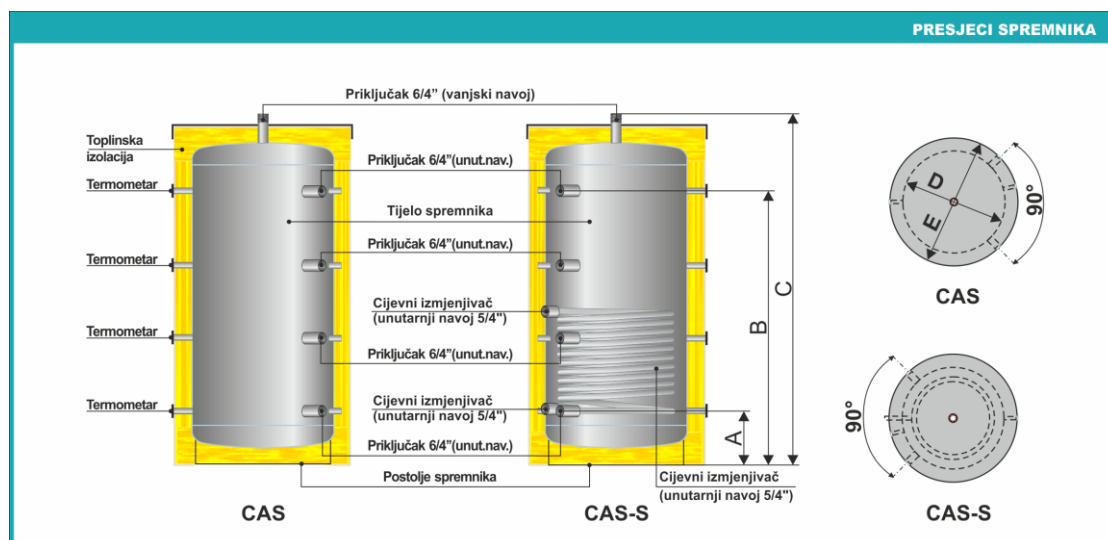
Unatoč svim prednostima, za gradnju sustava za pohranu energije potrebni su veliki investicijski troškovi, skupo je održavanje, a tehnologija je još uvijek relativno nova, što znači da ima mjesta za poboljšanje. Međutim, s napretkom tehnologije i sve većom potrebom za održivim energetske rješenjima, očekuje se da će razvoj sustava za pohranu energije rasti.



Slika 9. Shema sustava za pohranu električne energije u baterijama [18]

Prednosti toplinskog spremnika:

- Proizvodnja električne energije i toplinske energije u kogeneraciji postaje manje međuovisna.
- Mogućnost prebacivanja proizvodnje električne energije u pogodnija razdoblja dana.
- Financijska ušteda u slučaju promjenjive cijene električne energije.
- Ujednačavanje opterećenja postrojenja – izbjegavanje uključivanja manje efikasnih blokova – financijski benefiti i u uvjetima stalne cijene električne energije.
- Fleksibilnije postrojenje – brži odziv na promjene konzuma.
- Povećanje maksimalne snage plinske turbine u vrućim klimama dana [14].



Slika 10. Akumulacijski spremnici Centrometal CAS [19]



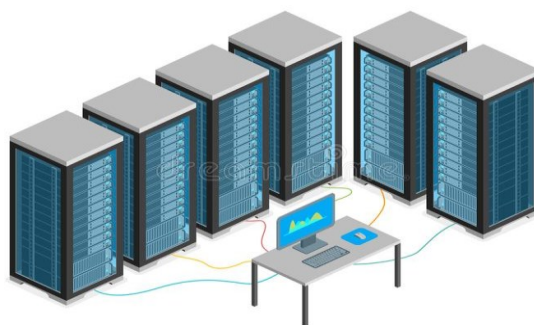
## 4. INDUSTRIJSKA ZONA

Industrija je veliki potrošač energije koji zauzima značajni dio svjetske potrošnje energije. U promatranjoj industrijskoj zoni, koja je smještena u srednjoj Dalmaciji, uključeni su podatkovni (*data*) centar, tvornica kartonske ambalaže, tvornica betonskih proizvoda, pivovara, prehrambeno-prerađivačka tvornica i hladnjača. Budući da energetske potrebe kao što su električna, toplinska i rashladna, variraju ovisno o vrsti postrojenja, veličini pogona i razini automatizacije, bitno je naći strategiju za optimalni model upravljanja energetskom opskrbom industrijskog parka kako bi se iskoristio potencijal obnovljivih izvora energije. U sljedećim poglavljima bit će prikazani profili potrošnje i potrebe svih postrojenja industrijske zone.

### 4.1. Data centar

*Data* centar ili podatkovni centar ima važnu ulogu u današnjem svijetu. Nastankom interneta i njegovim širenjem došlo je do potrebe za velikim data centrima. To je ustvari velika, sigurna i dobro opremljena prostorija, dizajnirana za pohranjivanje, obradu, upravljanje i distribuciju velikih količina podataka.

Dizajn, konstrukcija, lokacija i rad podatkovnih centara ključni su za performanse i pouzdanost usluga koje pružaju. Velike organizacije ulažu značajne resurse kako bi bile sigurne da su njihovi data centri efikasni i ekonomični kako bi zadovoljili sve veće potrebe za njihovu upotrebu.



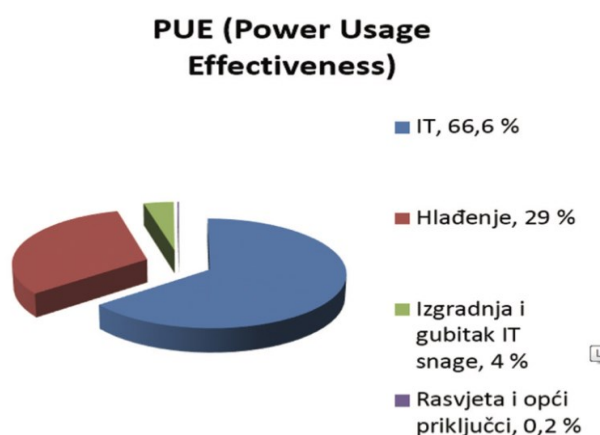
Slika 11. Ilustracija data centra [20]

Važno je da *data* centri rade 24 sata svaki dan, bez prestanka. Ako podatkovni centar ima zastoje, to može dovesti do nekoliko neželjenih posljedica. Može doći do gubitka podataka koji nisu sigurnosno kopirani, prekida rada nekih aplikacija i nedostupnosti usluga. Podatkovni centar njegovim zastojem može postati ranjiv za provale i napade na podatkovnu mrežu.



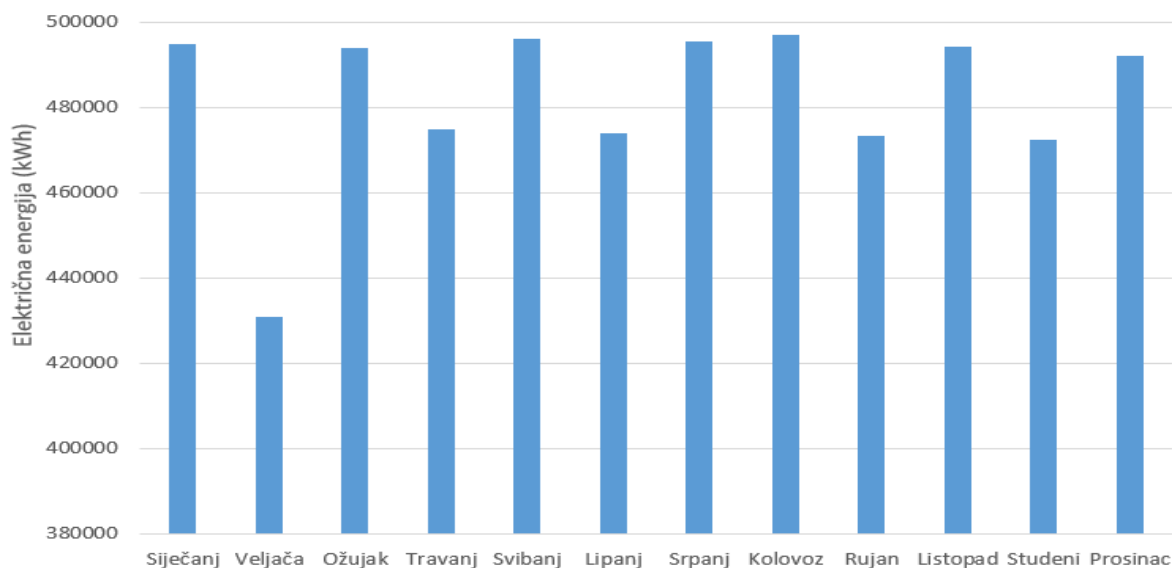
Upravo zbog svih tih razloga *data* centar jedan je od najvećih potrošača električne energije te je zbog toga iznimno važno izabrati odgovarajuće obnovljive izvore energije koji bi efikasno zadovoljili potrebe data centra, a i ujedno smanjili emisiju CO<sub>2</sub>.

Na temelju LBNL-ovih podataka (*Power Usage Effectiveness*), 33,4% ukupne energije koristi se za hlađenje podatkovnog centra, a ostatak, od 66,6 % za rad opreme.



Slika 12. Prikaz prosječnog PUE za podatkovni centar [21]

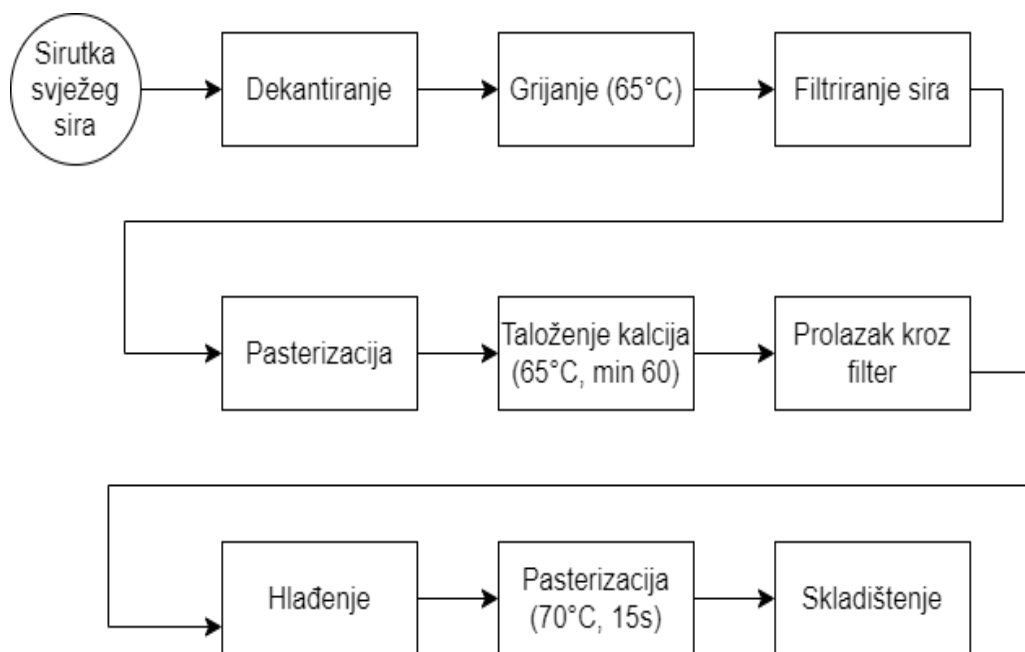
Pretpostavka je da podatkovni centar hipotetske industrijske zone ima jednoliko opterećenje tijekom dana cijele godine. Kako je područje srednje Dalmacije bogato izvorima energije Sunca, potreba električne energije ovakvog *data* centra može se podmiriti s fotonaponskim modulima. Rashladnu energiju moguće je podmiriti dizalicama topline. Budući da je za rad dizalice topline potrebna električna energija, sva energija koja je dovedena podatkovnom centru pretpostavlja se da je električna energija dobivena PV modulima. Podaci o godišnjoj energetskej potrebi podatkovnog centra prikazani su dijagramom na slici 13.



Slika 13. Raspored potrošnje električne energije data centra tijekom godine [22]

## 4.2. Prehrambeno-prerađivačka industrija

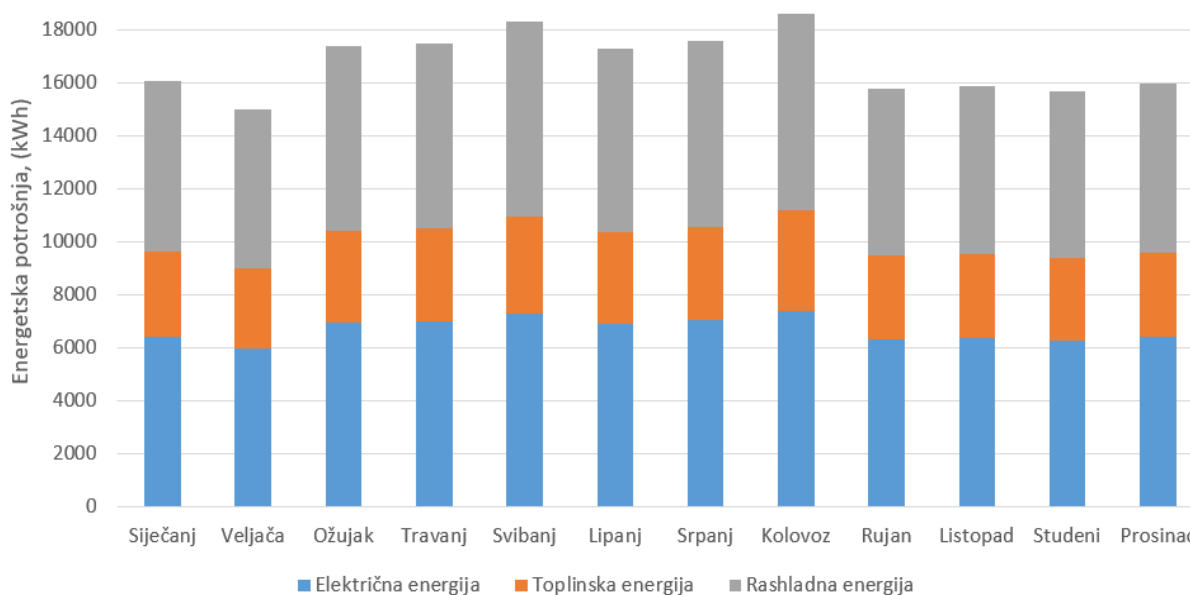
Industrija prerade hrane odnosi se na proces pretvaranja sirovih sastojaka u hranu i piće koji su spremni za ljudsku prehranu. Industrija obuhvaća široki raspon procesa, uključujući poljoprivredu, žetvu, skladištenje, transport, preradu, pakiranje i distribuciju prehrambenih proizvoda.



Slika 14. Prikaz procesa prerade sirutke od svježeg sira

Potrošnja energije u prehrambenoj industriji prvenstveno se koristi za grijanje, hlađenje i električnu energiju. Toplinska energija se najčešće koristi za zagrijavanje vode i pare za obradu i kuhanje prehrambenih proizvoda. Rashladna energija koristi se za rashladne i klimatizacijske sustave u kojima kvarljivi proizvodi zahtijevaju kontroliranu okolinu. Električna energija koristi se za rasvjetu, napajanje raznih strojeva za obradu hrane te za napajanje računala i ostale upravljačke opreme.

U tvornicama za preradu hrane troši se i do 75% energije na sustave za hlađenje i grijanje. Potrošnja energije u prehrambeno-prerađivačkim industrijama ima značajan utjecaj na okoliš, stoga je važan prijelaz na korištenje OIE.



Slika 15. Potrošnja energije prehrambeno-prerađivačke tvornice tijekom godine [22]

### 4.3. Tvornica betonskih proizvoda

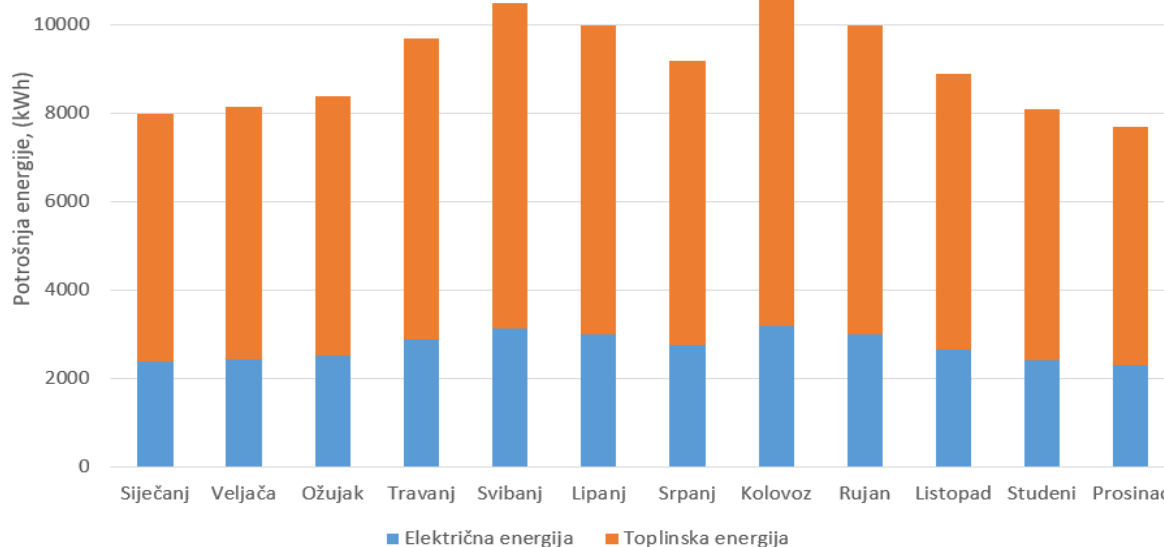
Tvornica betona je objekt u kojem se beton proizvodi za građevinske potrebe. Sirovine kao što su cement, pijesak ili šljunak i voda se miješaju i važu na kontrolirani način kako bi se proizveo beton željene čvrstoće i sastava. Gotov proizvod, beton, se kasnije koristi za izgradnju infrastrukture.

Mljevenje sirovina kao što je vapnenac, glina ili željezna ruda u fini prah te miješanje tih sastojaka u velikim strojevima zahtijeva ogromnu količinu električne energije. Toplinska energija troši se na zagrijavanje vode, koja se koristi u proizvodnji betona, jer povećanjem

temperature poboljšavaju se svojstva betona. Također su potrebne značajne količine električne i toplinske energije za zagrijavanje sirovina, čak do temperatura od 1300 °C.

Prema dostupnim podacima za proizvodnju jedne tone betona potrebno je 3.4 GJ toplinske energije i 110 kWh električne energije [23]. Za odabranu tvornicu pretpostavljamo da je godišnja proizvodnja 40 tona betona.

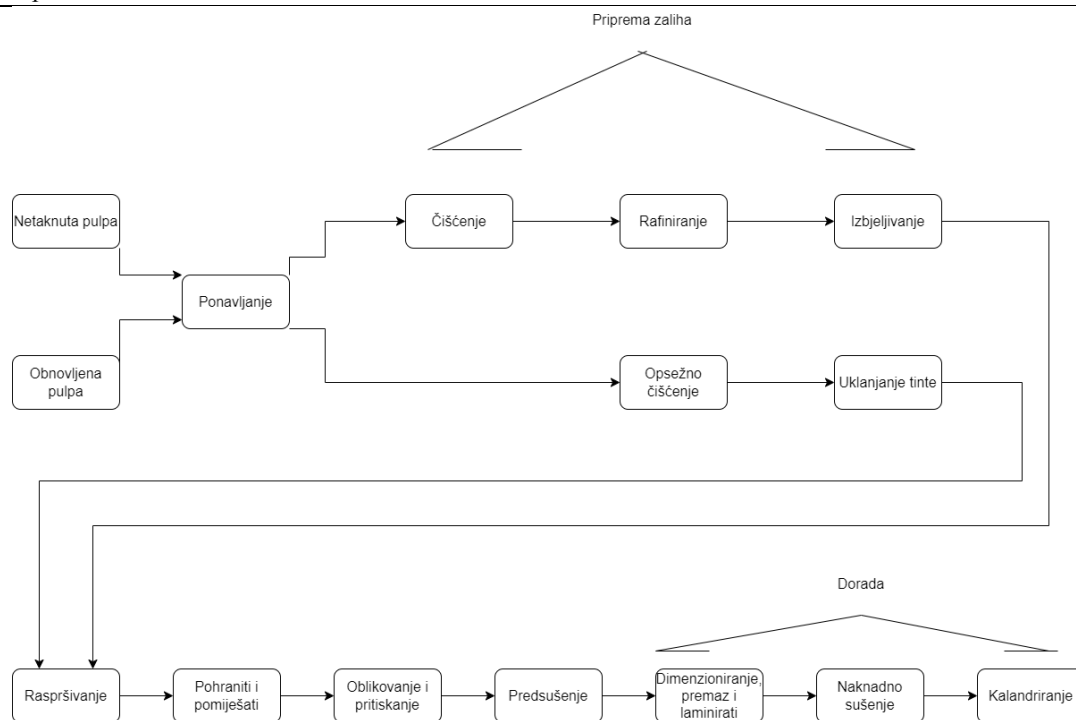
Dijagramom na slici 16. prikazane su potrebe za električnom i toplinskom energijom tijekom godine.



Slika 16. Raspored potrošnje energije tvornice betona tijekom godine [22]

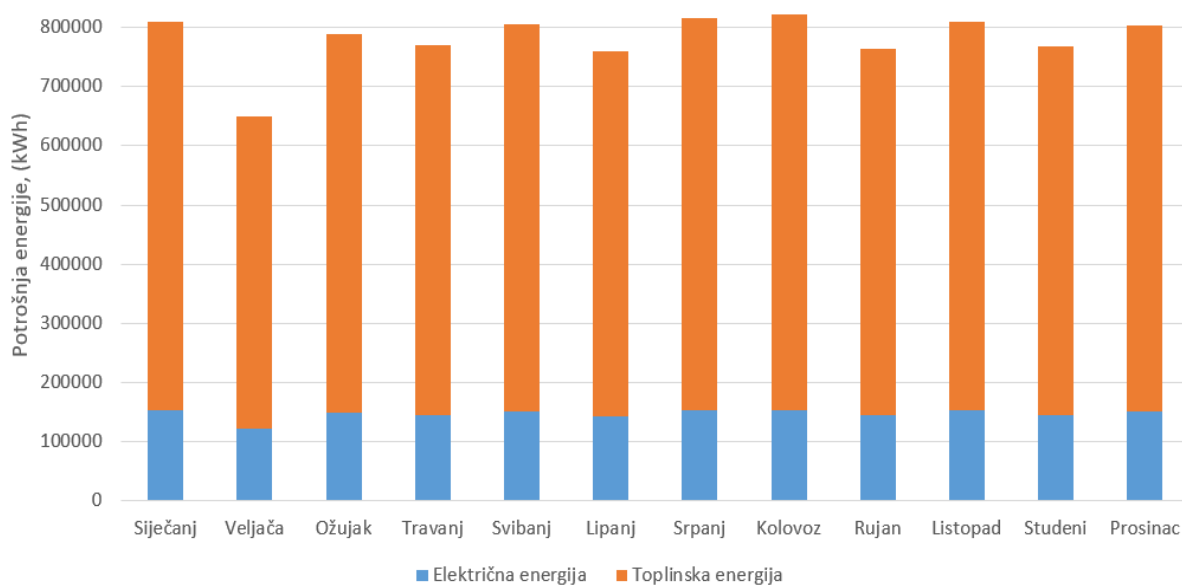
#### 4.4. Tvornica kartonske ambalaže

Tvornica kartona je objekt za proizvodnju kartona i raznih kartonskih ambalaža. Proizvodnja kartonske ambalaže zahtijeva ogromne količine energije uglavnom u formi pare i struje. Para se koristi za zagrijavanje vode za izradu papira i stvaranje procesne topline za sušenje papira. Električna energija koristi se u proizvodnom procesu za napajanje strojeva i opreme.



Slika 17. Tijek proizvodnje kartona

Za industrijsku zonu pretpostavljena je tvornica kartonske ambalaže koja godišnje proizvede 20 000 tona kartona. Prema danim podacima za proizvodnju jedne tone kartonske ambalaže potrebno je 91.85 kWh električne energije i 1619 MJ toplinske energije [24]. Podaci o potrošnji električne i toplinske energije tijekom godine prikazani su u dijagramu na slici 18.

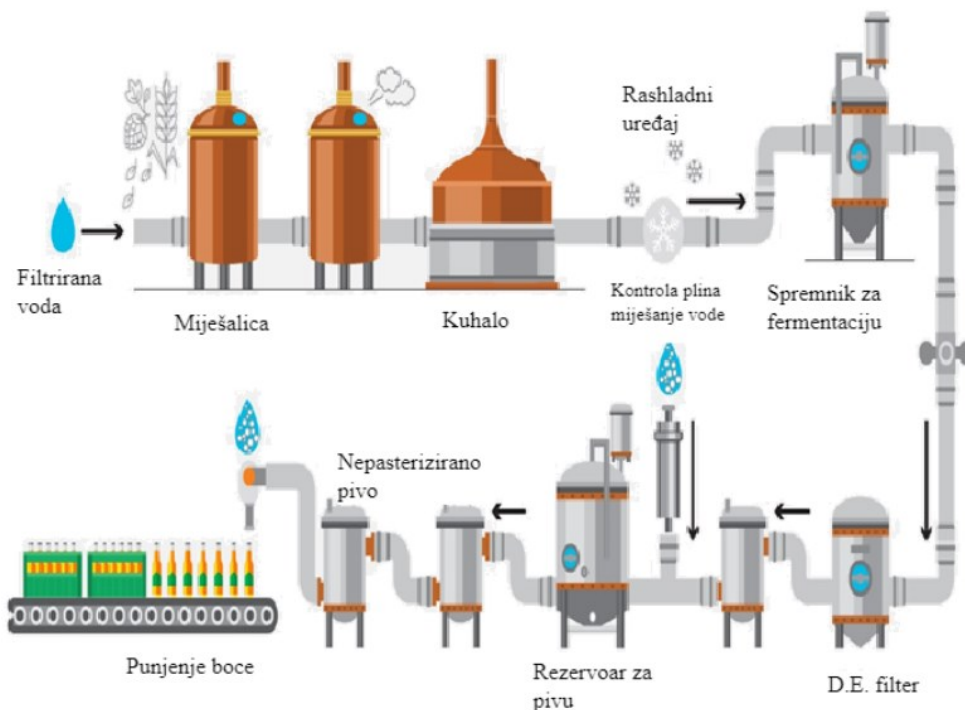


Slika 18. Energetski konzum za tvornicu kartonske ambalaže kroz godinu [22]

## 4.5. Pivovara

Tvornica piva je objekt u kojem se pivo proizvodi u velikim količinama. Proces proizvodnje uglavnom uključuje kuhanje, fermentaciju i odležavanje piva. Specifični proces može ovisiti o vrsti piva koja se proizvode, ali obično uključuje mljevenje slada, njegovo kuhanje s hmeljem, a zatim hlađenje i fermentaciju smjese za proizvodnju alkohola.

Pivo uobičajeno odležava kako bi razvilo svoje okuse te se pakira u odgovarajuće ambalaže za transport.

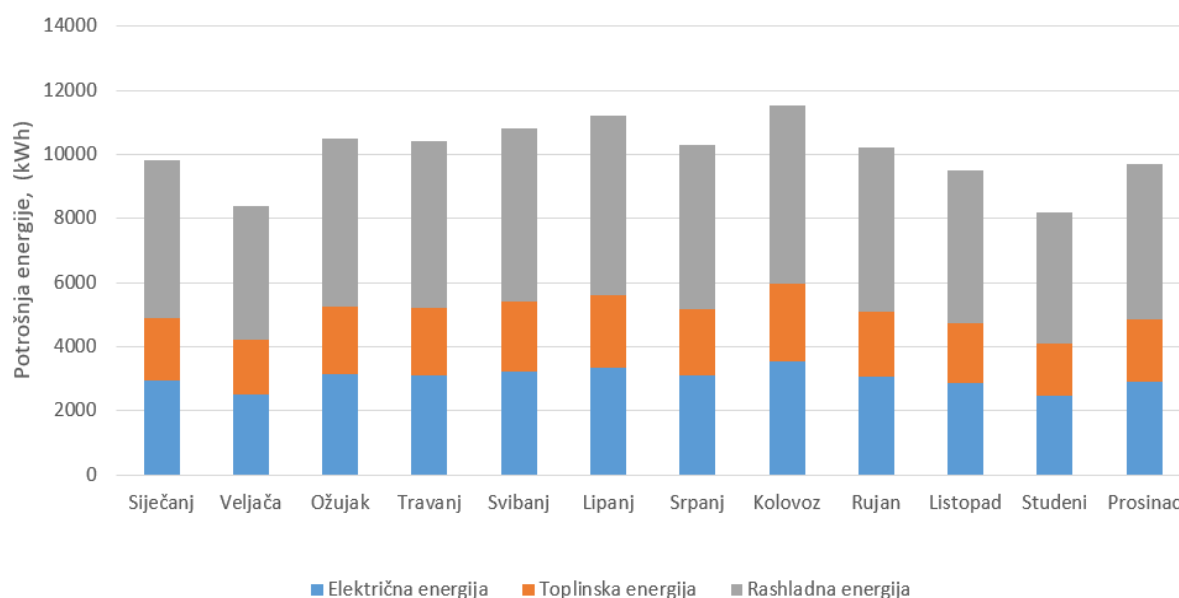


Slika 19. Shema procesa proizvodnje piva [25]

Količina rashladne, električne i toplinske energije potrebne za proizvodnju jedne litre piva ovisi o nizu čimbenika, a to su primjerice vrsta piva, zatim efikasnost strojeva za proizvodnju. Za proizvodnju piva potrebne su značajne količine energije za zagrijavanje vode, ali i za hlađenje sladovine. Potrebna je i kontrola temperature za spremanje gotovog piva pri odgovarajućim temperaturama. Isto tako, za pokretanje i napajanje svih tih strojeva potrebna je značajna količina električne energije. Proces proizvodnje je prikazan na slici 19.

Za zadanu industrijsku zonu uzeta je pivovara koja godišnje napravi 350 000 litara piva. Poznato je da je za jednu litru piva potrebno 0.43 kWh energije [26]. Potrošnja električne energije, kao što je hlađenje, ventilacija i komprimirani zrak, čini oko 70% ukupnih troškova

energije. Nadalje, toplinska upotreba, kao što je bioplin potreban za proizvodnju tople vode i pare, koji se zatim koristi u proizvodnji piva i općenito grijanju zgrada, čini preostalih 30 posto troškova energije. Sezonska potreba za rashladnom, električnom i toplinskom energijom prikazana je na slici 20.

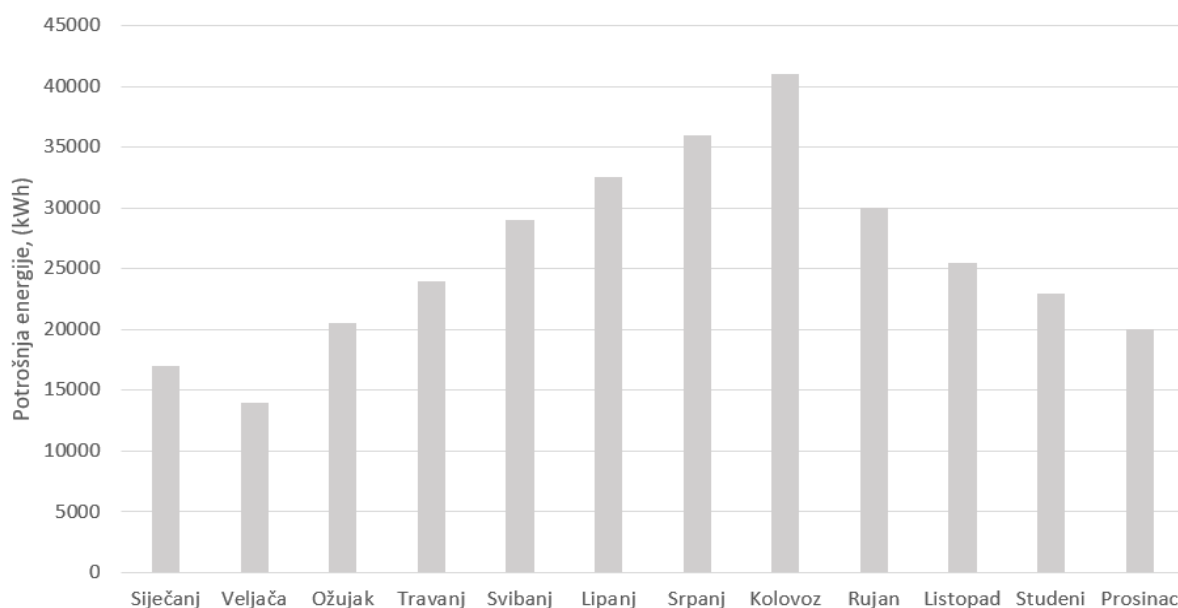


Slika 20. Energetska potreba za pogon pivovare tijekom svih 12 mjeseci u godini [22]

## 4.6. Hladnjača

Hladnjače se uglavnom koriste za skladištenje zamrznutih proizvoda, kao što su meso, morski plodovi, povrće i pekarski proizvodi, kako bi se očuvala njihova svježina i kvaliteta. Energetske potrebe i potrošnja ovise o nekoliko faktora, a to su veličina zamrzivača, temperatura na kojoj funkcionira, učestalost otvaranja i zatvaranja vrata te razina izolacije.

Za postizanje neke rashladne energije uglavnom se koriste kompresori pogonjeni elektromotorima ili današnja sve veća upotreba dizalica topline. Sustav hlađenja na bazi kompresora, koristi kompresor za komprimiranje i cirkuliranje rashladnog sredstva kroz zatvoreni sustav. Dok dizalica topline izvlači toplinu iz hladnjače i oslobađa je vani. Dizalice topline su učinkovitije od tradicionalnih rashladnih sustava na bazi kompresora jer troše manje električne energije za prijenos topline nego za komprimiranje rashladnog sredstva.



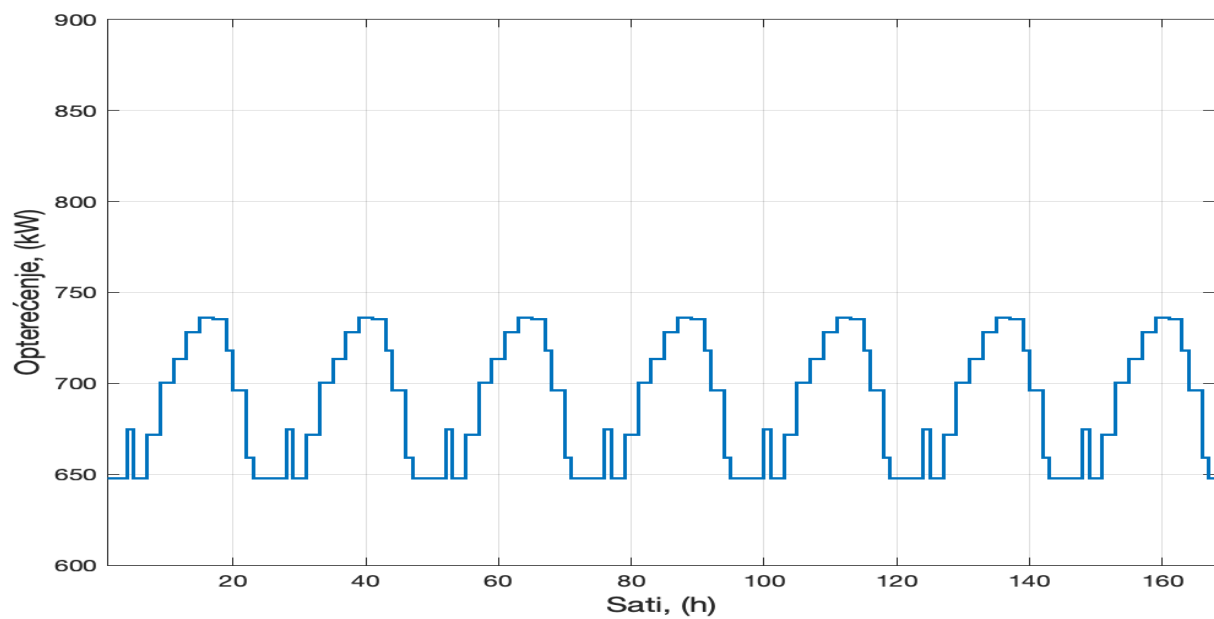
Slika 21. Mjesečna energetska potrošnja hladnjače [22]

#### 4.7. Potreba industrijske zone

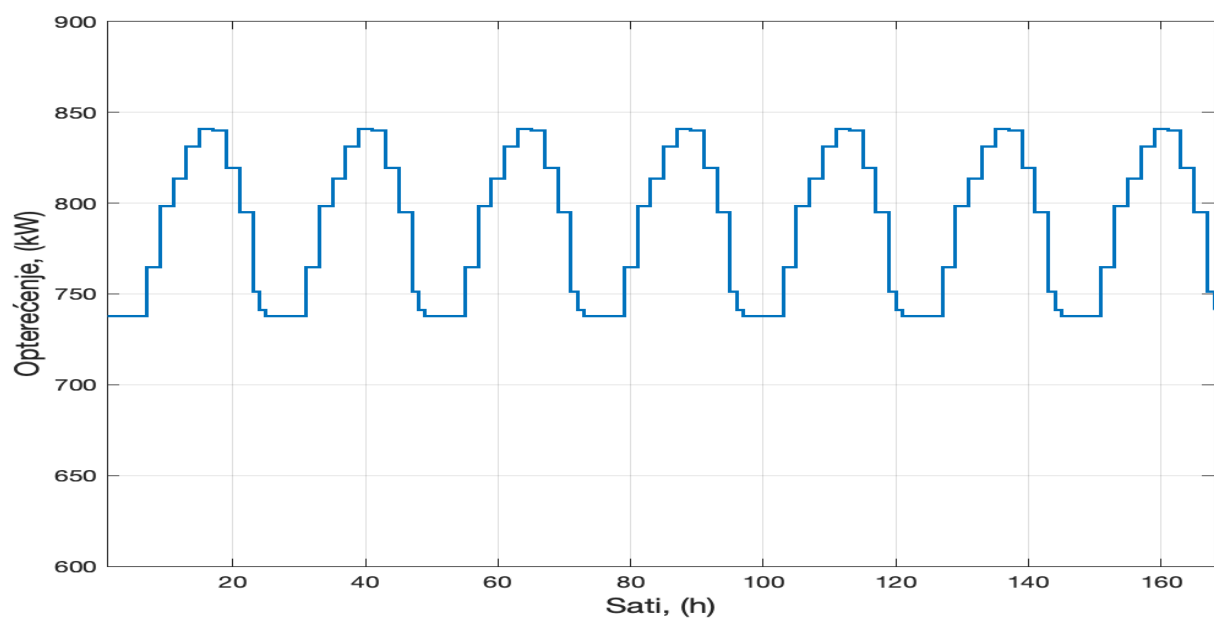
Nakon što su određene krivulje potrošnje električne, toplinske i rashladne energije za potrebe navedenih postrojenja unutar industrijske zone, to možemo svesti na cijelu industrijsku zonu.

Najveći potrošač električne energije je *data* centar zbog konstantnog opterećenja, a najmanji potrošač je pivovara, s malom proizvodnjom piva, koja od ukupne potrebe za električnom energijom u industrijskoj zoni čini svega 0.42% dok *data* centar čini 75%. Krivulje potrošnje električne energije industrijske zone prikazane su na slikama 22 i 23.



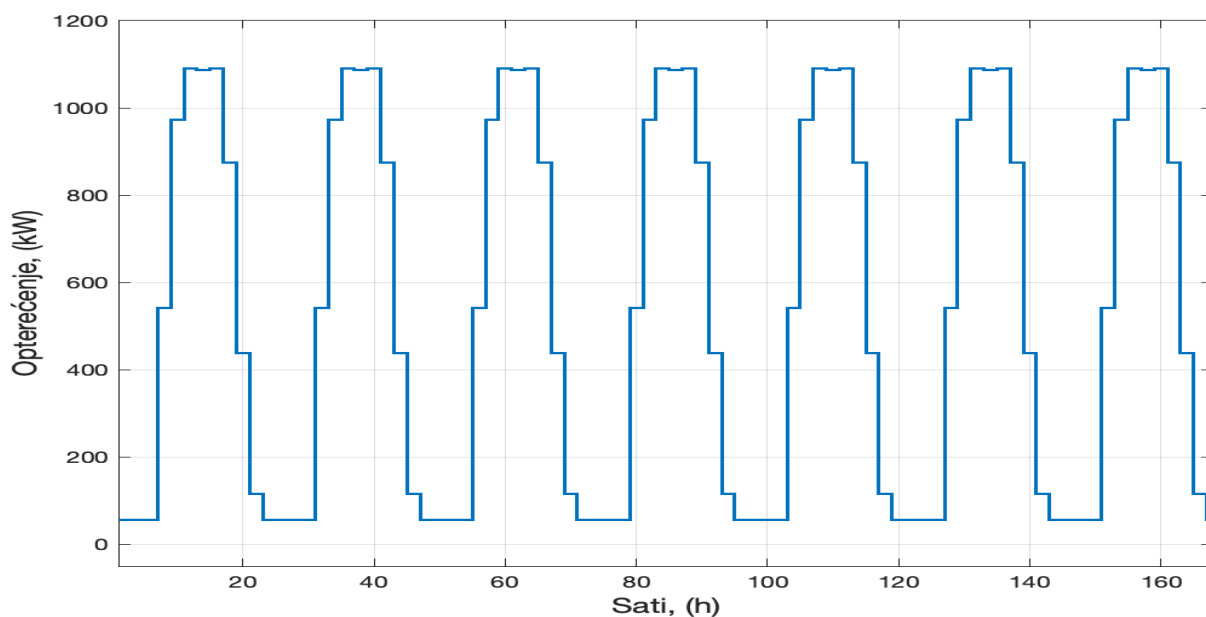


Slika 22. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, električna energija

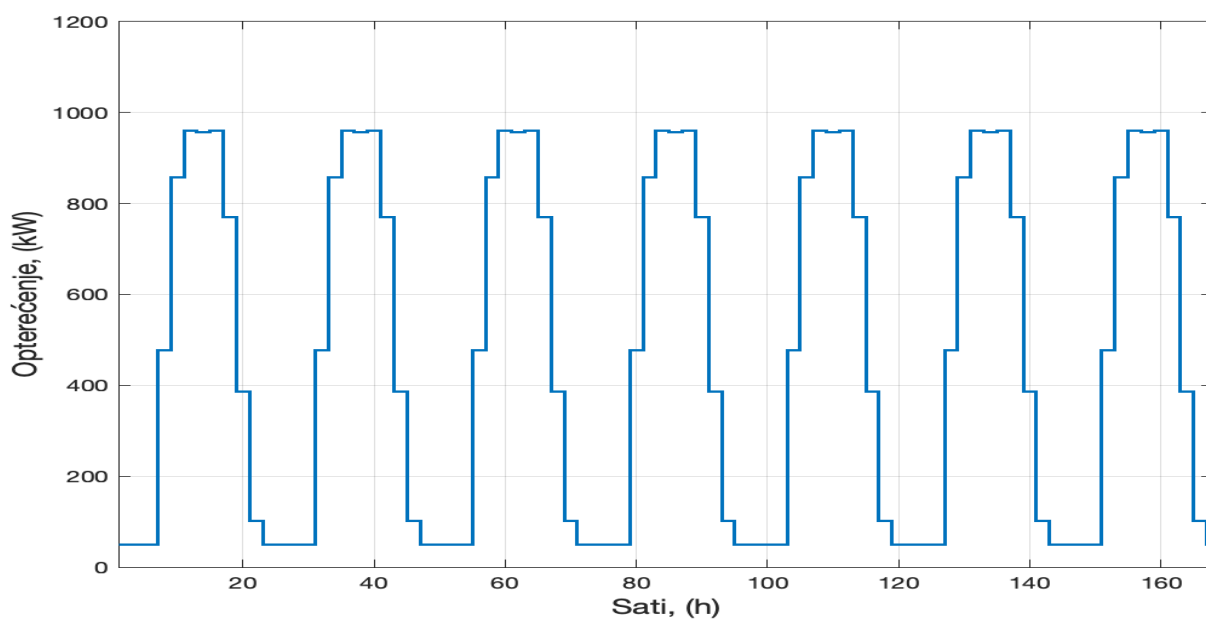


Slika 23. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, električna energija

Najmanju potrošnju toplinskom energijom ima pivovara koja od ukupne potrebe za tom energijom u industrijskoj zoni čini svega 0.3%, a dok je najveći potrošač tvornica kartonske ambalaže jer je potrebna ogromna količina pare za proizvodnju kartona i ona čini ogromnih 98%. Krivulje potrošnje toplinske energije industrijske zone za kolovoz i veljaču prikazane su na slikama 24. i 25.

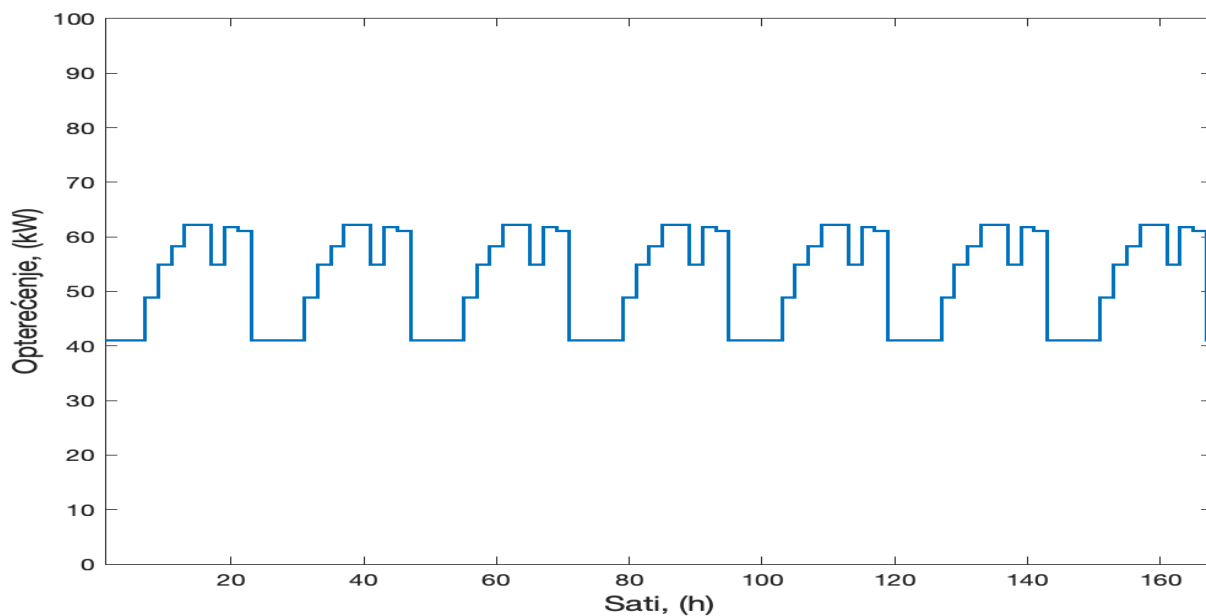


Slika 24. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, toplinska energija

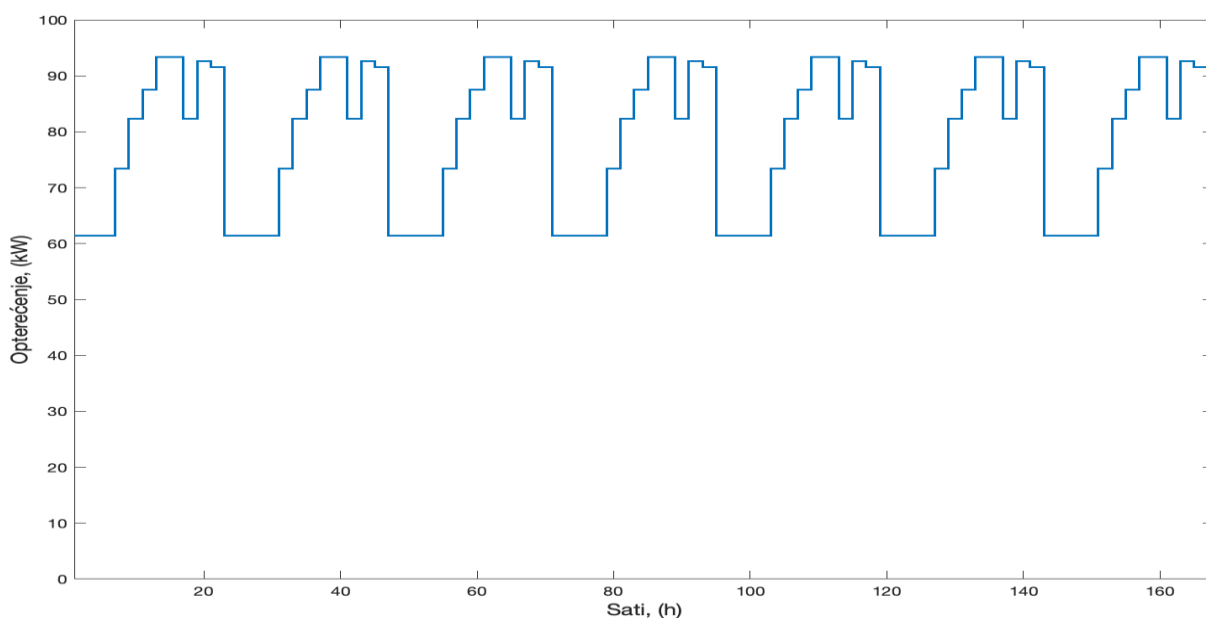


Slika 25. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, toplinska energija

Najveći korisnik rashladne energije u industrijskoj zoni je hladnjača i čini 69% ukupne potrebe rashladne energije industrijske zone.



Slika 26. Opterećenje industrijske zone u tjednu veljače, rashladna energija



Slika 27. Opterećenje industrijske zone u tjednu kolovoza, rashladna energija

## 5. OPTIMIZACIJA

Optimizacija je postupak koji omogućava pronalaženje najboljeg rješenja problema, uz zadane ciljeve i ograničenja. Odnosno, to je otkrivanje najučinkovitijeg načina za ostvarivanje određenog cilja uz ograničena sredstva. Postoje različite tehnike i načini optimizacije kao što su simulacije.

Gledano s inženjerskog stajališta u području energetike, važno je nalaženje optimalne proizvodnje električne i toplinske energije s obzirom na ekonomično i financijsko stajalište. Isto tako, u današnje je vrijeme važan udio obnovljivih izvora energije te utjecaj održavanja i životni vijek komponenata sustava. Drugim riječima, bitno je da se potrebe zadovolje po najnižoj mogućoj cijeni, ujedno da je efikasno i ekološki prihvatljivo, a ako se pojavi kakav višak energije da ga se izveze ili pohrani. Važno je i potrošiti optimalnu količinu sirovine za proizvodnju komponenata energetske postrojenja, ali i odrediti njihove optimalne dimenzije kako bi životni vijek bio „taman“.

### 5.1. MATLAB

MATLAB(MATrix LABoratory) je programski jezik visoke razine i predstavlja interaktivnu okolinu za numeričku obradu matrica te za vizualizaciju i programiranje. Pridaje veliku važnost u poljima inženjerstva, znanosti i matematici, za simuliranje, modeliranje, razvijanje algoritama i analizu podataka. MATLAB ima snažan alat za optimizaciju koji pruža širok raspon optimizacijskih algoritama za rješavanje raznih vrsta problema optimizacije:

- *linprog* za rješavanje problema linearnog programiranja
- *quadprog* za rješavanje problema kvadratnog programiranja
- *fmincon* za rješavanje problema nelinearnog programiranja s ograničenjima
- *fminunc* za rješavanje problema neograničenog nelinearnog programiranja
- *lsqnonlin* za rješavanje nelinearnih problema najmanjih kvadrata.

## 5.2. Linearno programiranje

Linearno programiranje je metoda koja pronalazi najbolja moguća rješenja u nekom matematičkom modelu čiji su uvjeti linearnog karaktera.

Funkcija *linprog* u MATLAB-u koristi se za rješavanje problema linearnog programiranja te je prikazana na slici 28.

$$\min_x f^T x \text{ such that } \begin{cases} A \cdot x \leq b, \\ Aeq \cdot x = beq, \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases}$$

Slika 28. Linprog funkcija [29]

Sintaksa *linprog* funkcije je:

*f* - vektor koeficijenata linearne funkcije cilja koju treba minimizirati

*A* - matrica koeficijenata ograničenja linearne nejednakosti

*b* - vektor vrijednosti ograničenja linearne nejednakosti

*Aeq* - matrica koeficijenata ograničenja linearne jednakosti

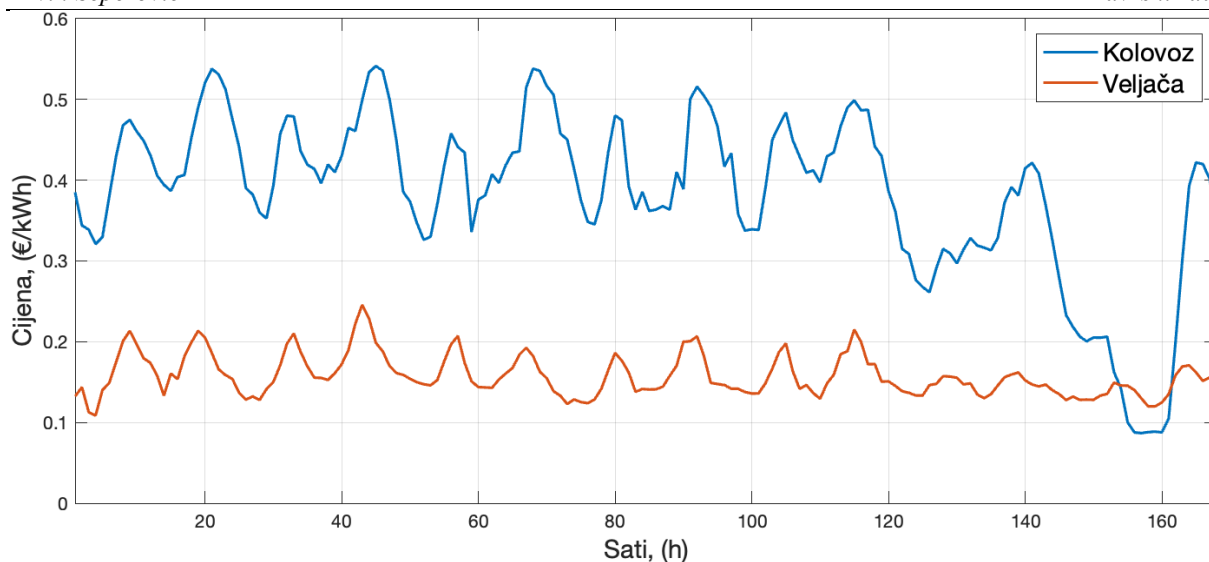
*beq* - vektor vrijednosti ograničenja linearne jednakosti

*lb* - vektor donjih granica varijabli u funkciji cilja

*ub* - vektor gornjih granica varijabli u funkciji cilja

## 5.3. Uvjeti simulacije

Simuliran je odnosno optimiran pogon mikromreže u industrijskoj zoni za jedan tjedan u kolovozu kada je povećana potreba za električnom, toplinskom i rashladnom energijom i jedan tjedan u veljači kada je potreba smanjena. S drugog stajališta gledano, kada fotonaponski sustavi u kolovozu proizvedu najveću količinu električne energije te za veljaču kada je proizvodnja električne energije relativno mala zbog slabije insolacije a u pravilu je više naoblake u zimskom razdoblju.



Slika 29. Cijena električne mreže za tjedan u veljači i kolovozu

Prema slici 29. vidimo da je prosječna cijena električne energije iz mreže puno manja u veljači jer je manja potražnja, dok je za vrijeme sezone u kolovozu puno veća potražnja za električnom energijom što je i u skladu s osnovnim načelima ekonomije, a to je ponuda i potražnja. Cijena energije iz mreže je uzeta prema podacima CROPEX-a za tjedan u kolovozu (01.08.2022. – 07.08.2022.) i za tjedan u veljači (06.02.2023 – 12.02.2023.).

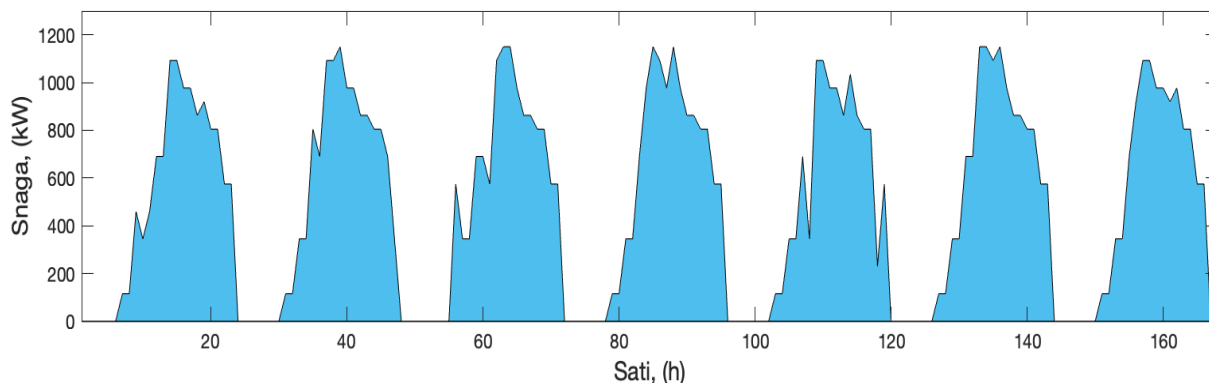
### 5.3.1. Tjedan u kolovozu

Za fotonaponsku elektranu pretpostavljena je površina krovova od 30 000 m<sup>2</sup> instalirane snage 1432 kWp. Korišteni su polikristalni solarni paneli, čija efikasnost varira od 15% do 23%. Fotonaponski paneli fiksirani su pod kutom od 33° istok-zapad. Prema prošlim vremenskim podacima prosječna sunčeva radijacija u srednjoj Dalmaciji tijekom kolovoza iznosi 5,6 kWh/m<sup>2</sup>/dan.

$$E_e \cdot A_{pv} \cdot \eta = E_{sol}$$

$E_e$ - prosječna dnevna radijacija	$\frac{kWh}{m^2}$
$A_{pv}$ - površina fotonaponskog modula	$m^2$
$\eta$ - efikasnost PV modula	
$E_{sol}$ - Solarna energija po danu	kWh

Radi sigurnosti uzeta je efikasnost od 15% te po gornjoj formuli fotonaponsko polje može proizvesti oko 11,85 MWh po danu.

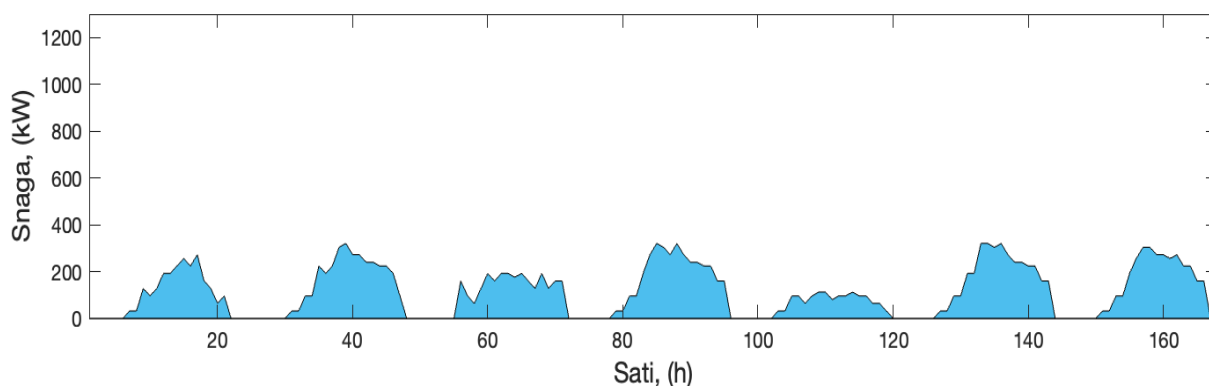


Slika 30. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih modula za tjedan u kolovozu

Na slici 30. prikazana je tjedna proizvodnja energije u kolovozu. Vršno opterećenje je u trećem danu i iznosi 1150 kW. Budući da je riječ o ljetnom vremenu, dobivene su velike količine energije. Vidimo da u razdoblju između svakog dana nemamo proizvodnju električne energije jer za vrijeme noći solarne elektrane ne proizvode električnu energiju.

### 5.3.2. Tjedan u veljači

Koristeći se istom formulom kao što je za tjedan u kolovozu, uz pretpostavku da koristimo 30 000 m<sup>2</sup> površine solarne farme, gdje efikasnost PV modula iznosi 15% i prosječno dnevno zračenje od 3,4 kWh/m<sup>2</sup>/dan, solarna farma proizvodi 2,7 MWh po danu.



Slika 31. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih modula za tjedan u veljači

Budući da je riječ o zimskom periodu, proizvodnja električne energije je puno manja i prema slici vidimo da je vršno opterećenje svega 320 kW.

### **5.3.3. Proizvodnja bioplinskog postrojenja**

Bioplinsko postrojenje smješteno u industrijskoj zoni pod punim opterećenjem može dati 750 kW električne snage i 1000 kW toplinske snage. Kroz period od godinu dana takvo postrojenje može proizvesti 6150 MWh električne energije i 8200 MWh toplinske energije.

Bioplinsko postrojenje ne može prekidati proizvodnju po noći osim ako nema mogućnosti skladištenja proizvedenog bioplina. U pravilu proizvodnja električne energije i toplinske energije može se smanjiti za 30-ak % na nekoliko sati, pri tome se bioplin iz digestora skladišti pod „ceradom“.

Kako nisu realistične česte promjene snage, iako zbog kontinuirane proizvodnje bioplina koji se tek ograničeno može pohraniti. Također nisu ni realne noćne obustave niti nagle promjene snage od 0 do maksimalnog iznosa unutar jednog sata. Stoga maksimalnu snagu možemo smanjiti na 750 kW i u to ograničiti minimalnu proizvodnju na 500 kW. Trošak proizvodnje iz bioplinskog postrojenja je prema zadnjim saznanjima na razini 280 EUR/MWh i zbog toga većina vlasnika izlazi iz sustava poticaja i izvozi energiju pri tržišnim cijenama [31].



## 6. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE OPTIMIZACIJE

Na temelju profila potrošnje električne, toplinske i rashladne energije industrijske zone te zadanih uvjeta simulacija i odabir optimizacijskog alata, izrađuje se optimalni model u programskom jeziku MATLAB.

Predmetni model jest funkcija za koju je potrebno pronaći minimum ( $\min f(x)$ ), odnosno funkcija cilja je ujedno i funkcija troška. Funkcija troška definira se kao zbroj troškova energetske opskrbe svakog od izvora energije u jedinici vremena. Funkcija troška se može zapisati u matematičkoj notaciji:

$$T_h = c_{pv,h} \cdot P_{pv,h} + c_{bio,h} \cdot P_{bio,h} + c_{mre,h} \cdot P_{mre,h} + c_{batt,h} \cdot P_{batt,h}$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

$T_h$ - trošak na satnoj razini,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{pv,h}$ - cijena energije iz fotonaponske elektrane,	$\frac{€}{kWh}$
$P_{pv,h}$ -prosječna snaga fotonaponske elektrane u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{bio,h}$ - cijena energije iz bioplinskog postrojenja,	$\frac{€}{kWh}$
$P_{bio,h}$ -prosječna snaga bioplinskog postrojenja u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{mre,h}$ - cijena energije iz mreže,	$\frac{€}{kWh}$
$P_{mre,h}$ -prosječna snaga mreže u satu,	$\frac{kWh}{h}$
$c_{batt,h}$ - cijena energije iz baterije,	$\frac{€}{kWh}$
$P_{batt,h}$ -prosječna snaga baterije u satu,	$\frac{kWh}{h}$

Trenutno stanje napunjenosti baterije definira se u odnosu na stanje naounjenosti u prethodnom trenutku i stanju punjenja/praznjenja. Jednadžba koja opisuje stanje napunjenosti baterije je:

$$E_{batt,(h+1)} = E_{batt,h} - P_{batt,h}$$

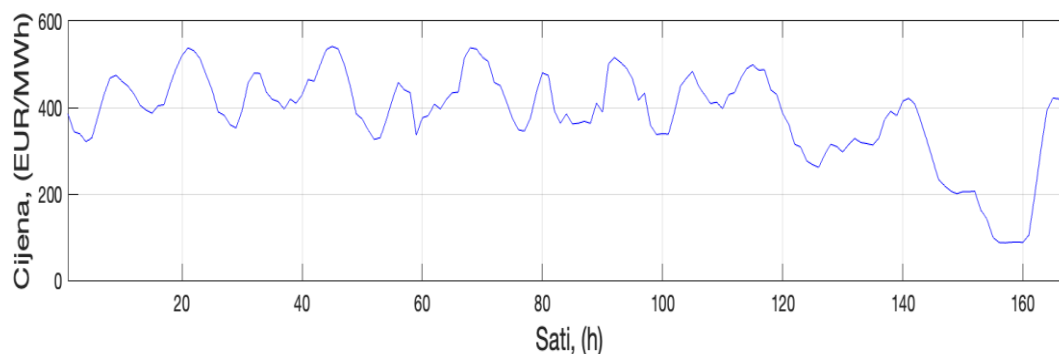
$E_{batt,h}$ - trenutna napunjenost baterije,	kWh
---	-----

## 6.1. Električna energija

Spektar prosječne snage postrojenja za tjedan u kolovozu i veljači u satu definiran je granicama  $lb \leq x \leq ub$ . Kod solarne elektrane 0 kW – maksimalna snaga elektrane u satu, raspon bioplinskog postrojenja je 500 kW – 750 kW te baterije -500 kW – 500 kW. Punjenje je definirano kao pražnjenje negativne vrijednosti. Početna napunjenost baterije, kapaciteta od 1500 kWh, je na oko 70% vrijednosti kapaciteta baterije.

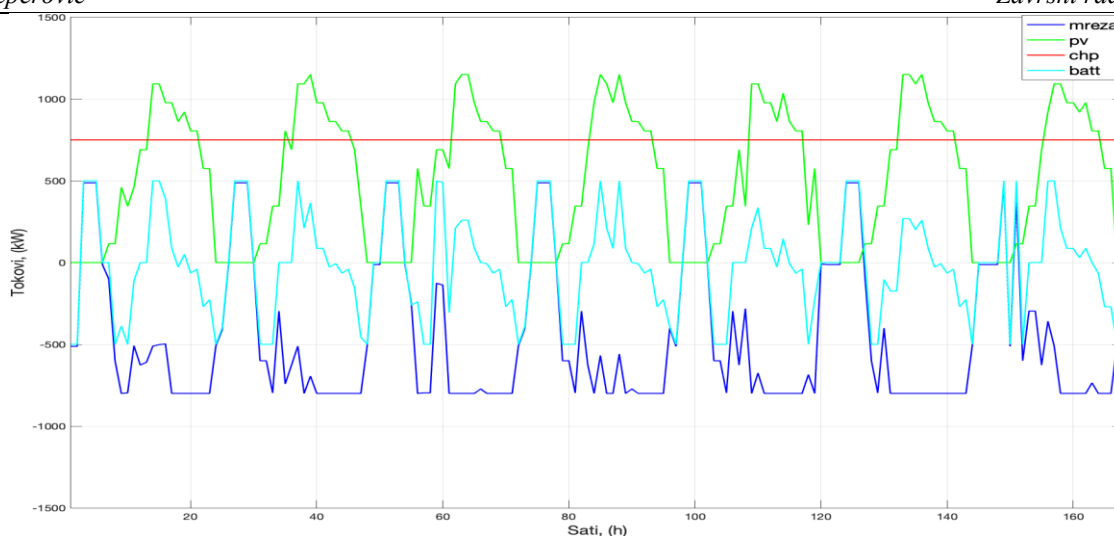
Mreža nema strogo definiranu maksimalnu vrijednost. Formalno je to zakupljena snaga priključka, ali radi simulacije zadan je raspon -800 kW – 800 kW koji omogućava i predaju viškova. Isto kao i kod baterije, uvoz iz mreže smatran je pozitivnom vrijednošću dok negativna vrijednost znači da izvozimo energiju.

U tjednu kolovoza, kada imamo velike količine električne energije proizvedene iz solarne elektrane koje su dostatne za potrebe industrijske zone tijekom dana, višak koji se stvorio skladišti se u sustavima za pohranu energije, kao što su baterije, ili se izvoze u mreži pri aktualnoj cijeni, ukoliko je to isplativo.



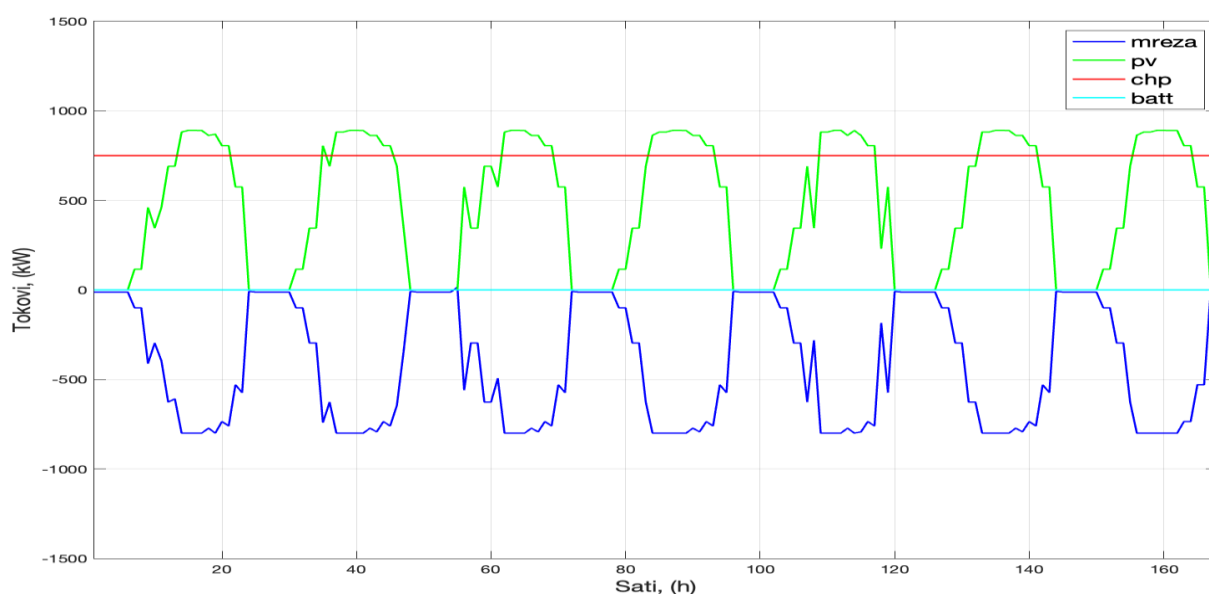
Slika 32. Cijene za proizvodnju energije tijekom kolovoza

Na slici 32. prikazane su tržišne cijene pri kojima će se uvoziti iz mreže i izvoziti u mrežu za tjedan u kolovozu.



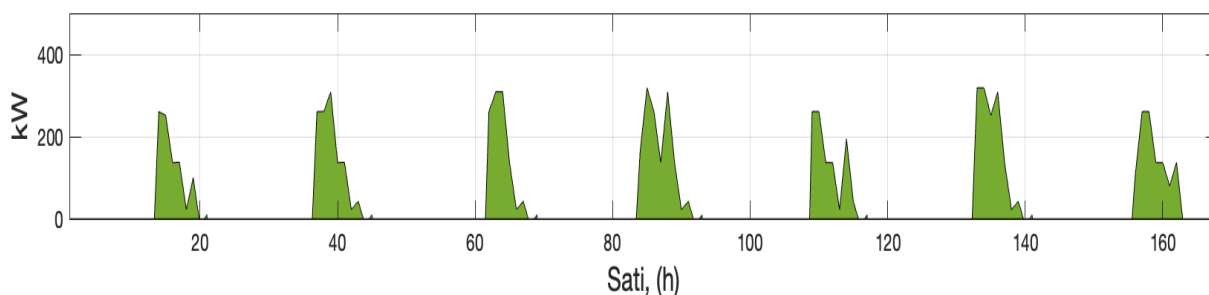
Slika 33. Tokovi proizvodnje za tjedan u kolovozu

Slika 33 prikazuje različite tokove snage iz solarnih elektrana i iz CHP postrojenja, kao i razmjenu s mrežom. Krivulja baterije prikazuje da se, kada je razdoblje visoke proizvodnje električne energije iz PV elektrana, javljaju viškovi koji pune bateriju. Tijekom razdoblja kada nemamo viškove energije, potrebe se pokrivaju iz baterija koje su se prethodno punile tijekom razdoblja s velikom proizvodnjom električne energije. Budući da data centar ima jednoliko opterećenje, što znači ujedno i potrebu za električnom energijom tijekom noći, ona se opskrbljuje iz bioplinskog postrojenja. Bioplinsko postrojenje radi pri konstantnoj maksimalnoj snazi od 750 kW te tjedno proizvodi oko 126 MWh električne energije. Zbog korištenja baterija imamo puno veći uvoz iz mreže pri manjoj cijeni, koji trenutno opskrbljujemo ili skladištimo u baterije, kako bismo kasnije izvezili u mrežu pri većoj tržišnoj cijeni.



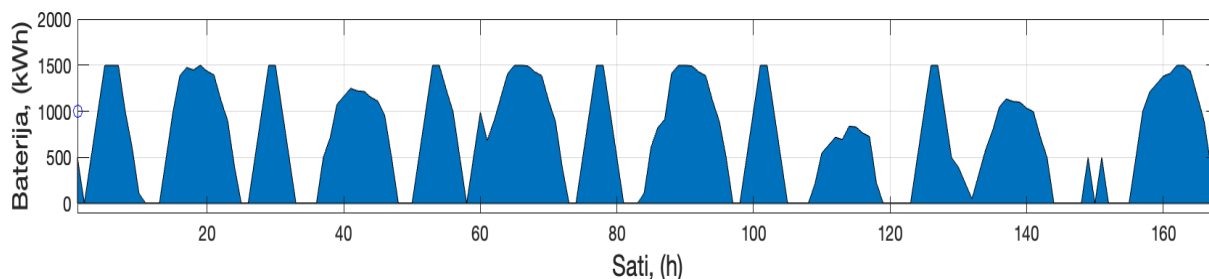
Slika 34. Tokovi proizvodnje za tjedan u kolovozu bez baterije

Ako nemamo mogućnost skladištenja energije kao što je i prikazano na slici 34, praktički nemamo ni uvoz iz mreže, jer se industrijske potrebe pokrivaju preko dana fotonaponskom elektranom i preko noći bioplinskim postrojenjem. Uočavamo da je, za razliku od slike na kojoj imamo utjecaj baterije, proizvodnja energije iz PV elektrana manja, zbog toga što tu razliku ne možemo skladištiti. Upravo taj višak prikazan je na slici 35. Ukoliko povećamo s -800 kW na -1500 kW mogućnost izvoza u mrežu onda nemamo viškova. Ujedno nam je i prihod veći.



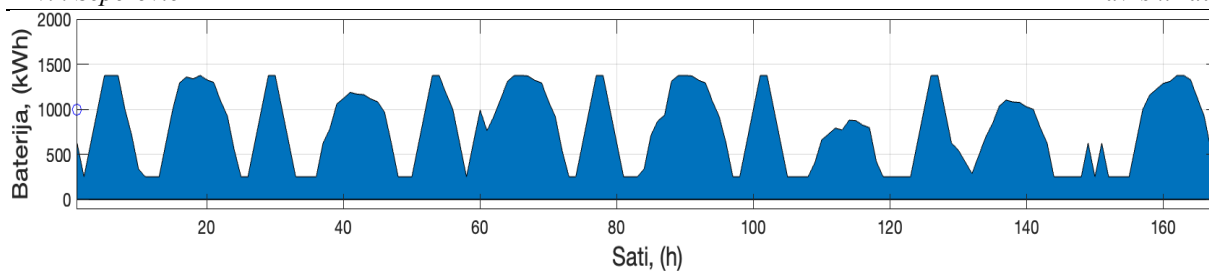
Slika 35. Viškovi nastali iz fotonaponskih elektrana

Napunjenost baterije prikazana je na slici 36. Uočavamo česte oscilacije punjenja i pražnjenja baterije tijekom tjedna. U nekim trenucima nemamo potpunu napunjenost najvjerojatnije zbog manje proizvodnje energije ili su se viškovi proizvedene energije izvozili u mrežu.



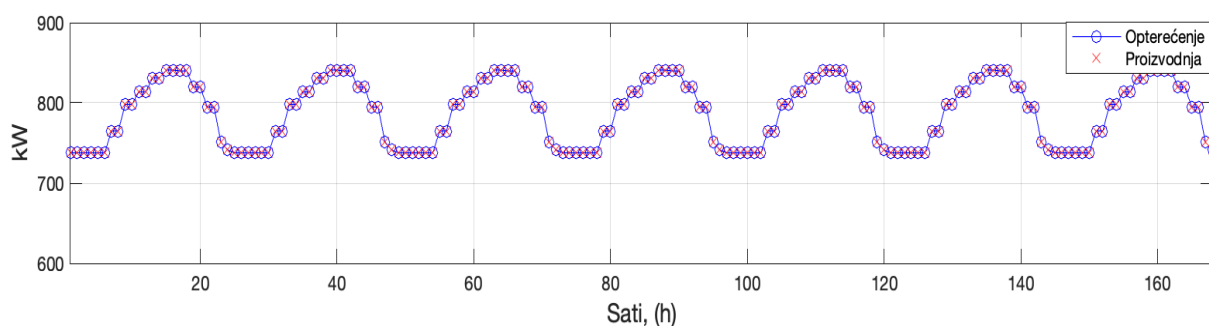
Slika 36. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u kolovozu

Treba voditi računa da baterija ima svoje gubitke, kao i svoju efikasnost. Do sad je razmatrana baterija bez gubitka. Pretpostavimo da snage punjenja i pražnjenja u ovom slučaju imaju efikasnost od 75%. Premda to ne utječe u velikim razmjerima na cijeli sustav proizvodnje i opskrbe. Ipak je vidljivo na slici 37 da kapacitet baterije nije napunjen do maksimalne vrijednosti 1500 kWh niti da je ispražnjen do minimalne vrijednosti 0 kWh.



Slika 37. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u kolovozu s gubitcima

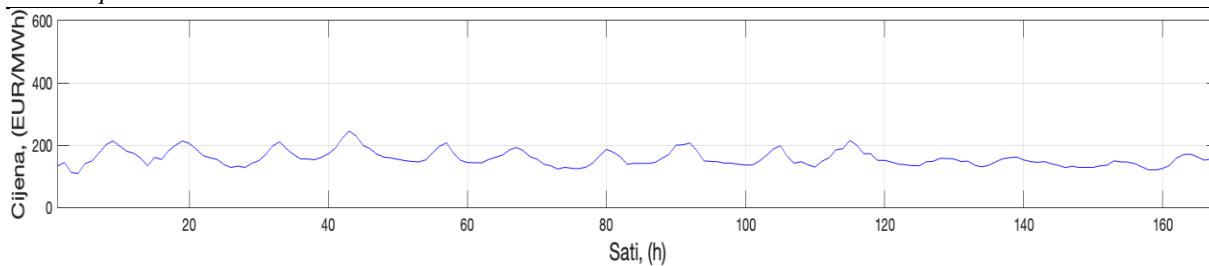
Na slici 38 prikazane su krivulje opterećenja industrijske zone te proizvodnje iz fotonaponskih elektrana i bioplinskog postrojenja. Uz proizvodnju imamo uvoz i izvoz mreže te utjecaj baterije. Vidimo da se krivulje poklapaju te možemo reći da se opterećenja uspješno pokrivaju proizvodnjom i uvozom.



Slika 38. Prikaz optimizacije proizvodnje i opterećenja ind. zone

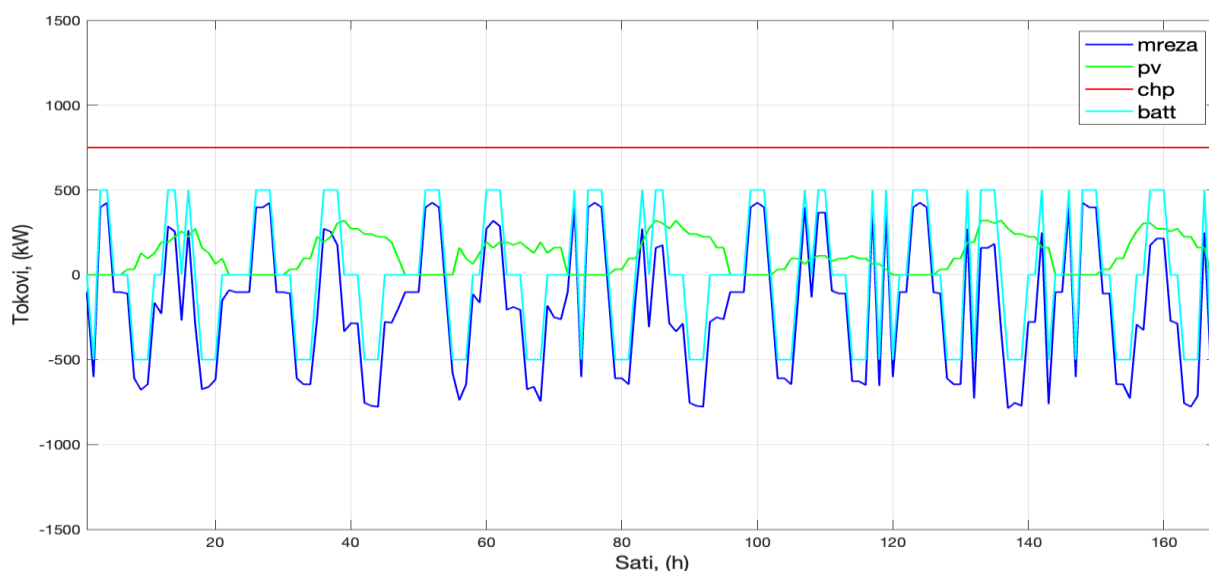
S druge strane, za vrijeme zimskog perioda, točnije za tjedan u veljači, proizvodnja električne energije iz solarnih elektrana je značajno manja u odnosu na ljetni period. Potrebe industrijske zone ne mogu se zadovoljiti električnom energijom iz fotonaponskih elektrana. Stoga se električna energija uglavnom proizvodi u bioplinskom postrojenju, a manjak se nadoknađuje uvozom iz mreže.

Cijena za proizvodnju energije iz fotonaponske elektrane i skladištenja energije je isto 0 €/kWh, budući da se ne bavimo troškovima investicije i održavanja ili zbrinjavanja otpada koji formiraju cijenu baterije i PV-a te radi simulacije uzimamo cijenu od 0.01 €/kWh. Tržišna cijena za uvoz i izvoz električne energije za zimski period je prikazana na slici 39. Uočeno je da je cijena skoro duplo manja od cijene u kolovozu. Iz tog razloga možemo očekivati manje prihode pri izvozu u mrežu i s druge strane manje troškove pri uvozu električne energije iz mreže.



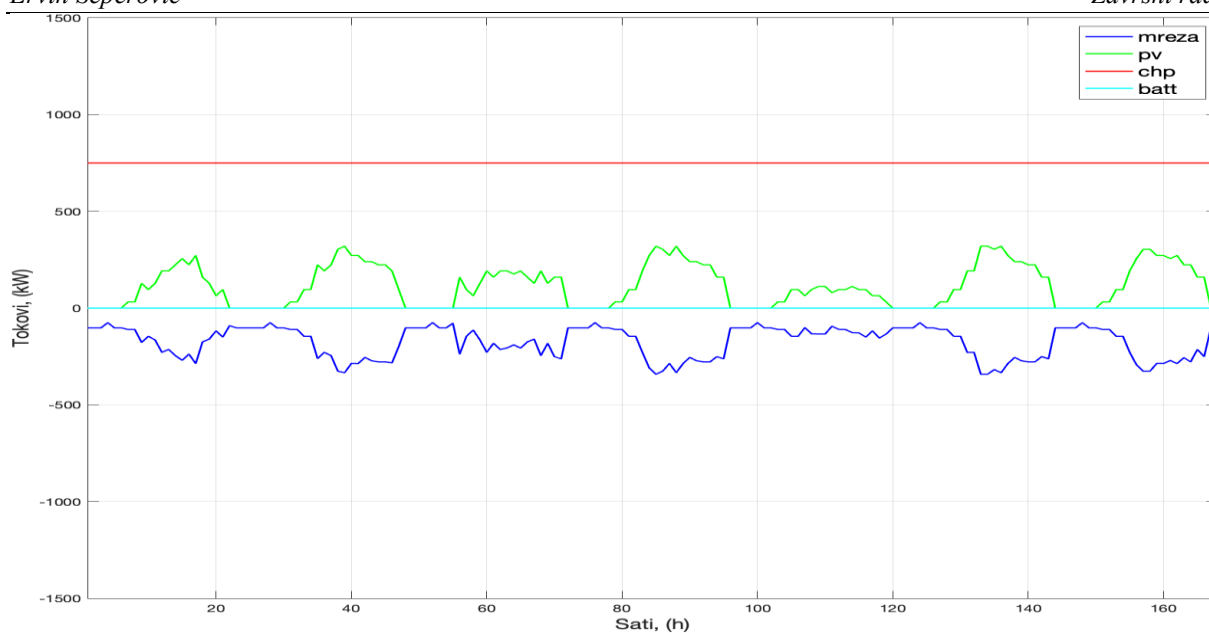
Slika 39. Cijene za proizvodnju energije tijekom tjedna u veljači

Na slici 40 uočavamo da nam je proizvodnja energije iz solarnih elektrana daleko manja za potrebe industrijske zone, stoga rad bioplinskog postrojenja držimo pri maksimalnim opterećenjem kroz cijeli tjedan. Kako u nekim trenucima imamo manje potrebe industrijske zone, proizvedena energija se skladišti u baterijama ili izvozi u mrežu.



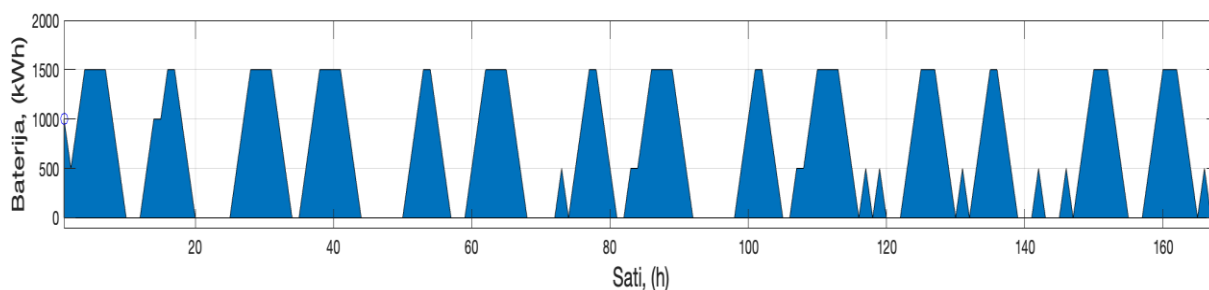
Slika 40. Tokovi proizvodnje za tjedan u veljači

U slučaju kada nemamo mogućnost skladištenja električne energije u baterijama, vidimo na slici 41 da se krivulje izvoza električne energije iz mreže i krivulje proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana relativno poklapaju. Što znači da za zadovoljavanje potrebe industrijske zone uvelike pokriva proizvodnja energije iz bioplinskog postrojenja.



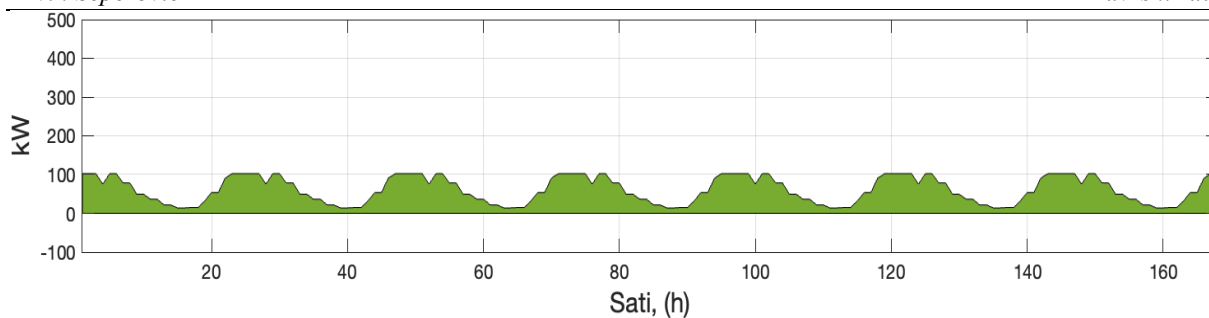
Slika 41. Tokovi proizvodnje za tjedan u veljači bez baterije

Napunjenost baterije je prikazana na slici 42. Uočavamo da imamo česte oscilacije punjenja i pražnjenja baterije tijekom tjedna u veljači slično kao za tjedan u kolovozu. U nekim trenutcima nemamo potpunu napunjenost najvjerojatnije zbog smanjene proizvodnje energije ili su se viškovi proizvedene energije izvozili u mrežu.



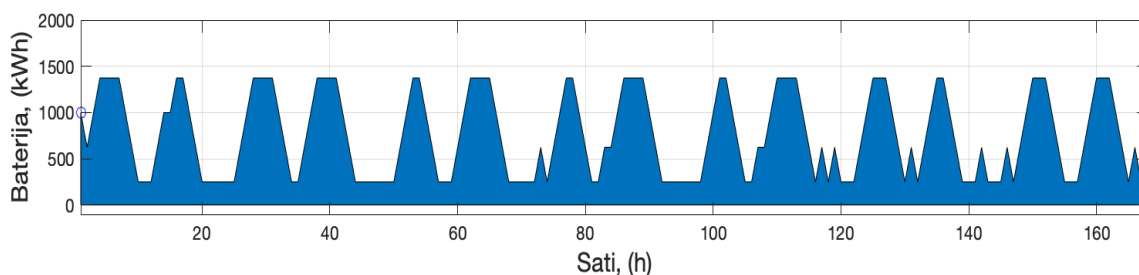
Slika 42. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u veljači

Razlika između zimskog i ljetnog perioda je ta da se zimi viškovi stvaraju iz CHP postrojenja za razliku od ljetnog perioda kada se viškovi stvaraju iz fotonaponskih elektrana. Prikaz viška energije iz bioplinskog postrojenja prikazan je na slici 43. Viškovi iz CHP, iznosom od 10151 kWh su manji u odnosu na viškove iz PV elektrana u iznosu od 8195 kWh. Budući da bioplinsko postrojenje radi danju i noću, ono će ujedno i stvarati veće viškove uz to što je i potreba preko noći manja.



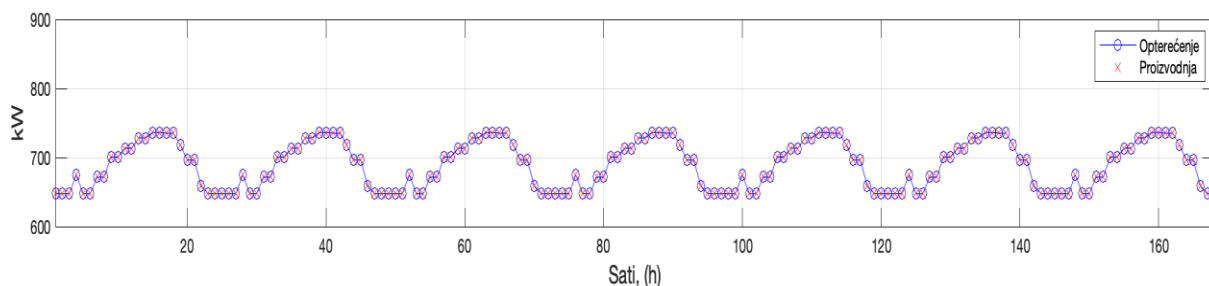
Slika 43. Viškovi energije iz bioplinskog postrojenja

Ponovno uvodimo da snage punjenja i pražnjenja imaju efikasnost od 75%, a ne 100%. Iako to ne utječe u velikim razmjerima na cijeli sustav proizvodnje i opskrbe, vidljivo je na slici 44 da kapacitet baterije nije napunjen do maksimalne vrijednosti 1500 kWh niti da je ispražnjen do minimalne vrijednosti 0 kWh. Slično situaciji kao i za tjedan u kolovozu.



Slika 44. Stanje napunjenosti baterije za tjedan u veljači s gubitcima

Na slici 45 prikazane su krivulje opterećenja industrijske zone te proizvodnje iz fotonaponskih elektrana i bioplinskog postrojenja, a uz proizvodnju imamo uvoz i izvoz mreže te utjecaj baterije. Vidimo da nam se krivulje poklapaju te možemo reći da je optimizacija također uspješna.



Slika 45. Prikaz optimizacije proizvodnje i opterećenja ind. zone za tjedan u veljači

S ekonomskog stajališta, prema tablici 1, vidimo kako utječe mogućnost pohranjivanja energije na cijenu troška, prihoda i uštede.



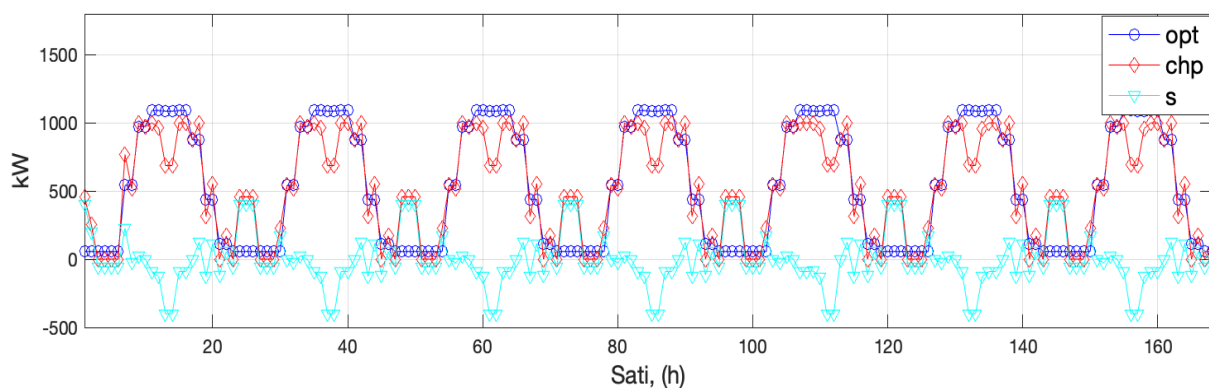
	Ljetni period				Zimski period			
	S baterijom		Bez baterije		S baterijom		Bez baterije	
	CHP	Mreža	CHP	Mreža	CHP	Mreža	CHP	Mreža
Troškovi	17 853 €	3094 €	17 853 €	7 €	17 853 €	2137 €	17 853 €	0 €
Ukupni trošak	20 947 €		17 860 €		19 990 €		17 853 €	
Prihod	35 512€		26 345 €		8641 €		4708 €	
Zarada/ ušteta	14 565 €		8485 €		-11 349€		-13 145€	

Tablica 1. Financijski pokazatelji za tjedan, električna energija

## 6.2. Toplinska energija

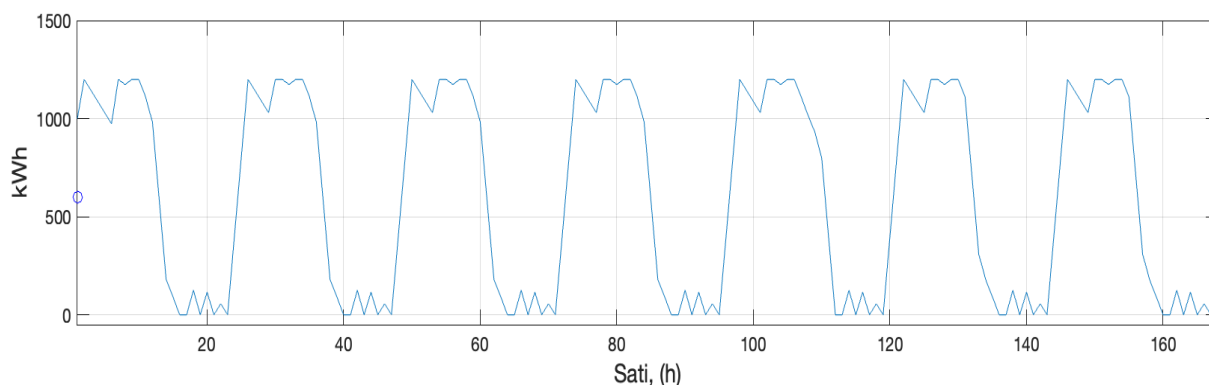
Toplinske potrebe industrijske zone pokrivene su proizvodnjom topline iz kogeneracijskog bioplinskog postrojenja (CHP) snage 1000 kW. Budući da snaga bioplinskog postrojenja u kombinaciji s toplinskim spremnikom, u većini slučajeva zadovoljava toplinske potrebe industrijske zone, onda mogućnost dobivanja toplinske energije iz dizalica toplina (za što je potrebna električna energija uvedena ili proizvedena) je zanemarena. One se uglavnom koriste u slučaju da dođe do zastoja proizvodnje iz CHP-a ili ako nemamo dovoljno biootpada za pogon CHP-a. Cijena za proizvodnju toplinske energije je pretpostavljena kao i za proizvodnju električne energije.

Na slici 46. za tjedan u kolovozu imamo vršna opterećenja nešto iznad 1000 kW. Za takve toplinske potrebe, rad samog bioplinskog postrojenja nije dovoljan. Vidljivo je da tijekom niske potražnje za toplinskom energijom, toplinski spremnik se puni. U slučaju kada je potreba za toplinskom energijom nešto viša od 1000 kW dodatno se opskrbljuje iz toplinskog spremnika. Iz ove pretpostavke uočena je djelotvornost i efikasnost toplinskog spremnika. Maksimalni tok punjenja  $t_s$  je 400 kW, a pražnjenja je -400 kW. Dok je energija koja stane u spremnik 1200 kWh. Za početnu graničnu vrijednost napunjenosti toplinskog spremnika uzeto je 600 kWh.



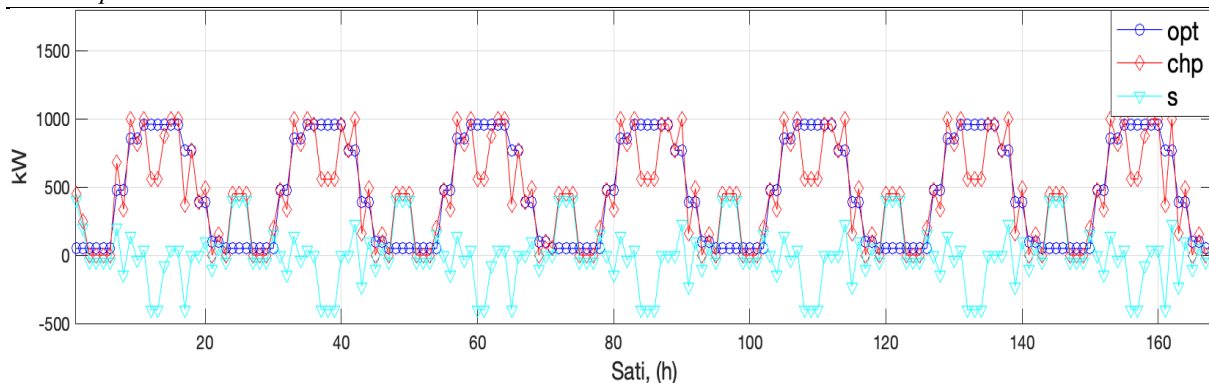
Slika 46. Proizvodnja i potreba toplinske energije za kolovoz

Slika 47. prikazuje napunjenost toplinskog spremnika za cijeli tjedan, kada je toplinska energija pri maksimalnoj potražnji, a spremnik je napunjen pri maksimalnom kapacitetu. Puni se za kasniju upotrebu u slučaju da je cijena za proizvodnju toplinske energije iz bioplinskog postrojenja dosta povoljnija i time isplativa.



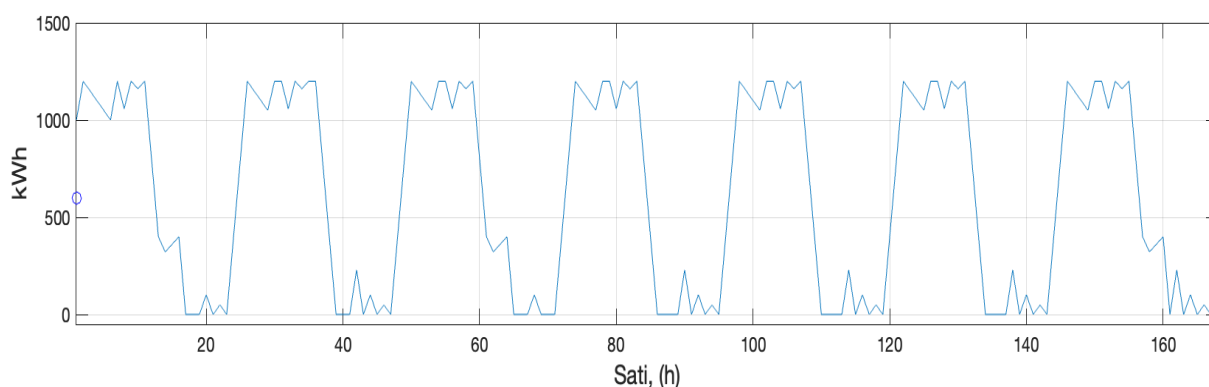
Slika 47. Kapacitet toplinskog spremnika za kolovoz

Nadalje, tijekom tjedna u veljači kada je potreba za toplinskom energijom nešto manja u odnosu na kolovoz imamo i manje potrebe za proizvodnjom energije iz bioplinskog postrojenja. Na slici 48. uočeno je da vršna opterećenja ne prelaze 1000 kW, što znači da je proizvodnja energije iz CHP-a snage 1 MW dostatna za toplinske potrebe industrijskog parka. Za vikend nemamo potrebe za proizvodnjom iz CHP-a, ali uočen je mali skok proizvodnje koji puni toplinski spremnik. Kako i za kolovoz tako i za veljaču pretpostavljene su iste vrijednosti maksimalnog toka punjenja, S je 400 kW, dok je pražnjenje -400 kW, a energija koja stane u spremnik je 1200 kWh. Za početnu graničnu vrijednost napunjenosti toplinskog spremnika uzeto je 600 kWh.



Slika 48. Proizvodnja i potreba toplinske energije za veljaču

Slika 49. prikazuje stanje napunjenosti toplinskog spremnika za tjedan u veljači. Slična je situacija kao i za kolovoz, samo što kapacitet ostane dulje pri maksimalnoj vrijednosti zbog viška energije proizvedene iz bioplinskog postrojenja pri maksimalnom opterećenju industrijske zone. To su neke razlike na satnoj razini.



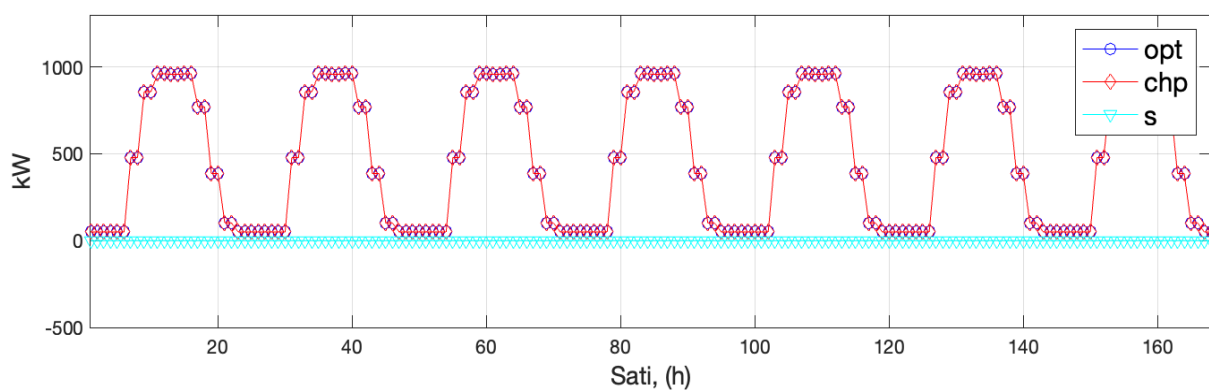
Slika 49. Kapacitet toplinskog spremnika za veljaču

U slučaju proizvodnje toplinske energije u kombinaciji s toplinskim spremnikom trošak iznosi 13 413 €. Bez korištenja toplinskog spremnika ne bi bila izvediva opskrba industrijske zone toplinskom energijom. Stoga usporedba uštede s i bez toplinskog spremnika nije ostvariva.

Ono što zbilja pravi razliku s ekonomskog stajališta jest kada proizvedemo toplinsku energiju iz bioplinskog postrojenja s kombinacijom sustava za skladištenje energije i bez takvog sustava. Pri sustavu s kombinacijom toplinskog spremnika trošak proizvodnje toplinske energije iznosi 11 903 € na tjednoj razini. Kod kombinacije sa sustavom bez pohrane energije, trošak iznosi 13 054 €. Trošak proizvodnje energije za veljaču bez toplinskog spremnika nam je identičan slučaju s toplinskim spremnikom za kolovoz gdje je potreba za toplinskom energijom bila znatno veća. Gledano na godišnjoj razini, sustavom s pohranom toplinske energije može se ostvariti ušteda od 55 248 €.

	Ljetni period		Zimski period	
	S top. spremnikom	Bez top. spremnika	S top. spremnikom	Bez top. spremnika
	CHP	CHP	CHP	CHP
Trošak	13 413 €	----	11 903 €	13 054
Ušteda	----		1151€	

Tablica 2. Financijski pokazatelji u tjednu, toplinska energija



Slika 50. Utjecaj na proizvodnju i opterećenje bez toplinskog spremnika

Slika 50. prikazuje da se krivulja opterećenja industrijske zone poklapa s proizvodnjom toplinske energije iz bioplinskog postrojenja. Cijena takve proizvodnje je veća i ne daje sustavu previše fleksibilnosti.

## 7. ZAKLJUČAK

Neizbježno je da će svijet prijeći na obnovljive izvore energije samo se postavlja pitanje kada. Aktualno povećanje cijena fosilnih energenata ubrzava energetske tranziciju. Industrija je jedan od najvećih potrošača energije, zato je važno pravilno vođenje i upravljanje postrojenjima koja se nalaze unutar industrijske zone. Budući da energetske potrebe kao što su električna, toplinska i rashladna, variraju ovisno o vrsti postrojenja, veličini pogona i razini automatizacije, bitno je naći strategiju za optimalni model upravljanja energetskom opskrbom industrijske zone uz maksimalno iskorištavanje potencijala obnovljivih izvora energije. Pretpostavljena lokacija razmatrane industrijske zone u srednjoj Dalmaciji, sugerirala je korištenje fotonaponskih modula koji su zajedno s hipotetskim bioplinskim postrojenjem. Omogućili pokrivanje najvećeg dijela električnih i toplinskih potreba Odabirom MATLAB funkcije *linprog* primijenjen je optimizacijski model koji traži najekonomičniji pogon. Budući da je proizvodnja energije iz solarnih elektrana, skladištenje i izvoz energije iz baterije, praktički besplatno, onda se električna energija prvo pokriva iz tih postrojenja. Ako padne noć ili je taj dan bilo ružno vrijeme, onda je proizvodnja energije iz PV elektrana bila mala i baterija nije bila pri nekom punijem kapacitetu te se zatim energija izvlači iz bioplinskog postrojenja. Uvoz iz mreže bio je zadnji prioritet. Slučajevi u kojima se preuzima energija iz mreže najčešće su bili samo u vrijeme povećanih potreba, a bez proizvodnje iz fotonaponskih elektrana. Viškove energije smo skladištili u baterije ili izvozili pri nekoj cijeni. Vidjeli smo da proizvodnjom električne energije s kombinacijom sustava za pohranu energije, npr. baterije, imamo značajnije uštede. Razlika u proizvodnji između veljače i kolovoza jest u fotonaponskoj elektrani. Puno je manja proizvodnja električne energije iz PV elektrane u veljači, stoga se tada puno više koristi bioplinsko postrojenje. Kod slučaja pokrivanja potreba za toplinskom energijom, sustavi bez toplinskog spremnika su praktički neizvedivi. Potrebe toplinske energije industrijske zone veće su nego što u danom trenutku bioplinsko postrojenje može proizvesti. Toplina se zbog toga nadomještava iz toplinskih spremnika koji su se punili za vrijeme smanjenih toplinskih potreba.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2022/12/beating-the-european-energy-crisis-Zettelmeyer>
- [2] <https://www.morski.hr/energetska-kriza-kao-vjetar-u-leda-globalnim-kapacitetima-za-zelenu-energiju/>
- [3] <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2022/articles/a-future-based-on-renewable-energy>
- [4] <https://www.datacenterdynamics.com/en/marketwatch/microgrids-and-data-centers-how-to-increase-high-availability-while-achieving-decarbonation-objectives/>
- [5] <https://strategicmicrogrid.com/about-microgrids/>
- [6] Lucić, Karlo (2021), USPOREDBA RAZLIČITIH TOPOLOGIJA MIKROMREŽE  
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:3351/datastream/PDF/view>
- [7] [https://www.researchgate.net/figure/Wide-observation-to-renewable-energy-sources\\_fig1\\_355433390](https://www.researchgate.net/figure/Wide-observation-to-renewable-energy-sources_fig1_355433390)
- [8] [http://enerpedia.net/index.php/Glavna\\_stranica](http://enerpedia.net/index.php/Glavna_stranica)
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy)
- [10] <https://www.iea.org/reports/renewables-2022/executive-summary>
- [11] <https://www.fzoeu.hr/hr/obnovljivi-izvori-energije/7573>
- [12] Prezentacija OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE, Zagreb 22.12. 2021., prof. Gorana Krajačića
- [13] <https://www.iea.org/reports/renewables-2022/renewable-heat#abstract>
- [14] Prezentacija HEP, SPREMNICI TOPLINE, Zagreb 14.veljače. 2019., prof. Mislav Čehil
- [15] <https://daelim-electric.com/solar-transformer/solar-power-plant-pad-mounted-transformer/>
- [16] <https://www.dw.com/en/heat-pump-energy-crisis-how-do-they-work-technology-what-are-they-climate-crisis-efficiency/a-62852353>
- [17] Kuljak, Petar (2022), IDEJNI PROJEKT BIOPLINSKOG POSTROJENJA,  
<https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh:3048>
- [18] <https://www.saftbatteries.com/market-sectors/utilities/renewables-microgrids>
- [19] <https://termometal.hr/akumulacijski-spremnici-centrometal-cas-grupa-334/>
- [20] <https://www.dreamstime.com/data-center-furniture-equipment-isometric-view-vector-data-center-furniture-equipment-isometric-view-server-image103776589>
- [21] <https://hrcak.srce.hr/file/283338>

- [22] Sučić, Marko (2022), FLEKSIBILNA ENERGETSKA OPSKRBA INDUSTRIJSKE ZONE,  
<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A8842>
- [23] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20300122>
- [24] <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=88981>
- [25] <https://www.brewersassociation.org/brewing-industry-updates/overview-of-the-brewing-process/>
- [26] [https://www.researchgate.net/publication/336284191\\_Energy\\_Efficiency\\_Improvements\\_in\\_a\\_Microbrewery\\_in\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/336284191_Energy_Efficiency_Improvements_in_a_Microbrewery_in_South_Africa)
- [27] <https://supeus.hr/wp-content/uploads/2020/05/Bioplan.pdf?x92590>
- [28] Marina Barbarić i Dražen Lončar, THERMAL SCIENCE (2016)  
ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR COMBINED HEAT AND ELECTRIC  
POWER MICRO-GRID <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2016/0354-98361600081B.pdf>
- [29] [https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html?s\\_tid=srchtitle\\_linprog\\_1](https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html?s_tid=srchtitle_linprog_1)
- [30] <https://www.grundfos.com/solutions/learn/research-and-insights/coefficient-of-system-performance>
- [31] <https://www.poslovni.hr/hrvatska/uredba-o-ekstrazaradi-omca-oko-vrata-bioplina-sima-4375774>
- [32] G. Čačić, M Bišćan, M. Capek, M. Mastilica i M. Vajdić (2010) PRIRUČNIK ZA TJEDNU I DNEVNU ANALIZU I INTERPRETACIJU PODATAK O POTROŠNJI ENERGIJE, Zagreb: Program Ujedinjenih naroda za razvoj u Hrvatskoj, 2010.

## PRILOG

Prilog prikazuje kod za optimizaciju troška energetske opskrbe pomoću *linprog* funkcije za tjedan u kolovozu.

```
clear

IndLoad= [737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 764.9100 764.9100 798.22 798.2200
813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9 839.9000 819.58 819.5800 794.95
794.9500 751.2550 741.255 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 764.9100 764.9100
798.22 798.2200 813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9 839.9000 819.58
819.5800 794.95 794.9500 751.2550 741.255 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050
764.9100 764.9100 798.22 798.2200 813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9 839.9000
819.58 819.5800 794.95 794.9500 751.2550 741.255 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050
737.6050 764.9100 764.9100 798.22 798.2200 813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9
839.9000 819.58 819.5800 794.95 794.9500 751.2550 741.255 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050
737.6050 737.6050 764.9100 764.9100 798.22 798.2200 813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9
840.9000 839.9 839.9000 819.58 819.5800 794.95 794.9500 751.2550 741.255 737.6050
737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 764.9100 764.9100 798.22 798.2200 813.47
813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9 839.9000 819.58 819.5800 794.95 794.9500 751.2550
741.255 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 737.6050 764.9100 764.9100 798.22 798.2200
813.47 813.4700 831.3 831.3000 840.9 840.9000 839.9 839.9000 819.58 819.5800 794.95
794.9500 751.2550 741.255]; % industrijska zona opterećenje za mjesec kolovoz
n = length(IndLoad);
% max/min vrijednosti varijabli
maxMreza= ones(1,n).*800; minMreza=-800.*ones(1,n);
%maxPV= ones(1,n).*2000;
maxPV=1150.*[0 0 0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.4 0.3 0.4 0.6 0.6 0.95 0.95 0.85 0.85 0.75 0.8 0.7 0.7 0.5 0.5 0
0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.7 0.6 0.95 0.95 1 0.85 0.85 0.75 0.75 0.7 0.7 0.6 0.3 0 0 0 0 0 0 0
0.5 0.3 0.3 0.6 0.6 0.5 0.95 1 1 0.85 0.75 0.75 0.7 0.7 0.5 0.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.6
0.85 1 0.95 0.85 1 0.85 0.75 0.75 0.7 0.7 0.5 0.5 0 0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.6 0.3 0.95 0.95
0.85 0.85 0.75 0.9 0.75 0.7 0.7 0.2 0.5 0 0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.6 0.6 1 1 0.95 1 0.85 0.75
0.75 0.7 0.7 0.5 0.5 0 0 0 0 0 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.6 0.8 0.95 0.95 0.85 0.85 0.8 0.85 0.7 0.7 0.5
0.5 0 0 ];
minPV=ones(1,n).*0; %za površinu od 30 000m2
maxCHP= ones(1,n).*750; minCHP=ones(1,n).*500;
maxBatt = ones(1,n).*500; minBatt=ones(1,n).*-500; % 1/3 kapaciteta EBatt na sat, npr.

VLB = [minMreza minPV minCHP minBatt]';
VUB = [maxMreza maxPV maxCHP maxBatt]';

maxEBatt = 1500; minEBatt = 0;
EBatt0 =1000;

% vektori cijena
cMreza=[ 0.38506 0.34406 0.33881 0.32086 0.32972 0.38 0.42966 0.46791 0.4749 0.46062 0.44911 0.43132
0.40582 0.39432 0.38677 0.40386 0.40652 0.45199 0.48994 0.52021 0.53798 0.53104 0.51288 0.47607
0.44098 0.3901 0.3821 0.35989 0.35269 0.39303 0.45704 0.4799 0.4789 0.43588 0.4191 0.41399 0.39624
0.4194 0.40991 0.4298 0.4647 0.46092 0.49891 0.53356 0.54145 0.53557 0.50021 0.44967 0.38557 0.37363
0.34721 0.3263 0.32996 0.37053 0.41737 0.45788 0.44124 0.43415 0.33592 0.37592 0.38122 0.40739
0.39674 0.41863 0.43411 0.43569 0.51474 0.53809 0.53539 0.51677 0.5059 0.4577 0.4503 0.41426 0.37507
0.34849 0.3453 0.37507 0.43464 0.4801 0.47427 0.39234 0.36346 0.38563 0.36188 0.36368 0.36802 0.3634
0.41022 0.38891 0.50051 0.51598 0.50471 0.49119 0.46637 0.41687 0.43341 0.35818 0.33764 0.33917
0.33852 0.39005 0.44991 0.468 0.48391 0.44962 0.42936 0.40927 0.41219 0.39737 0.42948 0.43443
0.46657 0.49012 0.49883 0.48654 0.48721 0.44184 0.42991 0.38655 0.36176 0.31505 0.30859 0.27645
0.26776 0.26125 0.29083 0.31503 0.30956 0.29708 0.31449 0.32838 0.31906 0.31649 0.31314 0.32859
0.37272 0.39147 0.38109 0.41464 0.4215 0.40839 0.36908 0.32498 0.27789 0.23285 0.21828 0.2064
0.20047 0.20523 0.205 0.20629 0.16227 0.1427 0.1 0.08769 0.08682 0.08803 0.08866 0.08779 0.1048
0.19942 0.30167 0.3933 0.42199 0.41992 0.40186 0.35942];
cPV= 0.01.*ones(1,n);
cCHP= 0.01.*ones(1,n);
cBatt = 0.01.*ones(1,n);
% cBatt troškovi punjenja i pražnjenja, minimalan utjecaj na cijenu,

% funkcija cilja
f=[cMreza cPV cCHP cBatt]';

d=ones(1,n); D=diag(d);
Aeq=[D D D -D]; beq=IndLoad';

F=zeros(n); K=ones(n); G=tril(K);
Al=[F F F G];
bl=ones(n,1).*(maxEBatt-EBatt0); % EBatt0 oduzima se kroz cijeli interval, prema izvedenim
jednadžbama

J=-ones(n); H=tril(J);
```



```

A2=[F F F H];
b2=ones(n,1).*(EBatt0-minEBatt);

A=[A1; A2]; b=[b1; b2];

% poziv funkcije
x=linprog(f,A,b,Aeq,beq,VLB,VUB);
Mreza=x(1:n);
PV=x(n+1:2*n);
CHP=x(2*n+1:3*n);
Batt=x(3*n+1:4*n);
%PV = PV';

suma=Mreza+PV+CHP-Batt;

ebatt0=EBatt0;
for ii=1:n
    EBatt(ii)=ebatt0+Batt(ii);
    ebatt0=EBatt(ii);
end

subplot(411),
plot(1:n,cMreza.*1000,'b'),grid, hold on
y=ylabel('Cijena, (EUR/MWh)'), axis([1 n 0 600])
x=xlabel("Sati, (h)")
x.FontSize = 14;
y.FontSize = 14;
subplot(412),plot(1:n,IndLoad,'bo-'),hold on, grid,
plot(suma,'rx'),axis([1 n 600 900]),
legend("Opterećenje", "Proizvodnja")
y=ylabel('kW');
x=xlabel("Sati, (h)")
x.FontSize = 13;
y.FontSize = 13;
subplot(413),plot(1:n,Mreza,'b',1:n,PV,'g',1:n,CHP,'r',1:n,Batt,'c'),grid, hold on
legend('mreza','pv','chp','batt'), y=ylabel('tokovi kW')
axis([1 n -1500 1500])

subplot(414),area(1:n,EBatt),grid,hold on
plot(1,EBatt0,'bo'),
y=ylabel('Baterija, (kWh)'),x =xlabel('Sati, (h)')
x.FontSize = 14;
y.FontSize = 14;
axis([1 n -100 2000])

```