

# Fleksibilna energetska opskrba industrijske zone

---

Sučić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:792008>

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

**Marko Sučić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Marko Sučić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Draženu Lončaru na pruženoj pomoći, podršci i ukazanom strpljenju u izradi ovog rada. Veliko hvala roditeljima, braći, sestri i ostaloj rodbini na nesebičnoj i bezuvjetnoj podršci tijekom dosadašnjeg studija i života. Zahvaljujem se i svojim prijateljima koji su mi nebrojno puta pružili pomoć i podršku. Na kraju, hvala mojoj djevojci Ivani na podršci i razumijevanju tijekom studija i pisanja ovog rada.

Marko Sučić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Sučić** JMBAG: 0035211934

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fleksibilna energetska opskrba industrijske zone**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flexible energy supply of an industrial park**

Opis zadatka:

Višestruko povećanje cijena, kao i mogući prekidi u opskrbi energijom, potaknuli su industrijske potrošače na razmatranje izgradnje i korištenja alternativnih energetskih izvora, koji bi omogućili zamjenu postojećih te stvorili preduvjete za nastavak osnovne djelatnosti i u uvjetima energetske krize. U pravilu su prva ulaganja usmjerena na prekrivanje krovova gospodarskih zgrada fotonaponskim modulima, dok se s obzirom na potrebe lokacije procjenjuje i opravdanost korištenja drugih izvora energije poput biomase, bioplina, dizalica topline, ili geotermalne energije.

U okviru zadatka potrebno je za odabranu gospodarsku zonu površine 50 ha u južnoj Hrvatskoj, u kojoj su već smješteni pogoni prehrambeno prerađivačke industrije, hladnjača, pivovara, a planirana je i izgradnja barem još tvornice kartonske ambalaže, tvornice betonskih proizvoda te *data* centra:

1. Odrediti dnevne, tjedne i sezonske profile potrošnje električne, toplinske i rashladne energije;
2. Dimenzionirati energetski sustav temeljen na alternativnim izvorima koji će omogućiti pokrivanje određenog dijela (50 % i 75 %) ili svih (100 %) energetskih potreba lokacije;
3. Predvidjeti izgradnju bioplinskog postrojenja koje kao primarnu sirovinu koristi komunalni otpad, te izvesti matematički model dinamike procesa koji će omogućiti satnu analizu pogona;
4. Simulirati pogon bioplinskog postrojenja u uvjetima promjenjivih potreba za toplinskom i električnom energijom kao i promjenjivih cijena na tržištu električne energije u odabranom zimskom i ljetnom tjednu;
5. Provesti tehno-ekonomsku analizu opravdanosti izgradnje spremnika električne i toplinske energije u cilju povećanja fleksibilnosti energetske opskrbe razmatrane lokacije.

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

Zadatak zadan: 29. rujna 2022. Datum predaje rada: 1. prosinca 2022. Predvideni datumi obrane: 12. – 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	XI
1 UVOD .....	1
1.1 Zelena energetska tranzicija .....	1
1.2 Električna energija u tranziciji.....	4
1.3 Toplinska energija u tranziciji .....	5
1.4 OIE na tržištu.....	6
1.5 OIE na mreži.....	9
2 FLEKSIBILNOST ENERGETSKOG SUSTAVA .....	11
2.1 Proizvodnja.....	11
2.2 Prijenos i distribucija .....	12
2.3 Pohrana .....	12
2.4 Upravljanje potražnjom .....	13
2.5 Povezivanje sektora .....	15
3 ENERGETSKA TRANZICIJA U INDUSTRIJSKOJ ZONI .....	16
3.1 Trenutno stanje OIE u industrijskoj zoni.....	17
3.2 Mogućnost OIE u industrijskoj zoni.....	18
4 INDUSTRIJSKA ZONA.....	20
4.1 Opis industrijske zone .....	20
4.2 Potencijali izgradnje postrojenja OIE.....	21
5 PROFILI POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	23
5.1 Prehrambena industrija .....	25
5.2 Hladnjača .....	28

5.2.1	Proračun rashladne energije .....	28
5.3	Pivovara .....	33
5.4	Kartonska ambalaža.....	35
5.5	Betonski proizvodi.....	37
5.6	Data centar .....	38
5.7	Industrijska zona.....	41
6	OIE ENERGIJE U INDUSTRIJSKOJ ZONI .....	43
6.1	Fotonaponski sustav .....	43
6.2	Bioplinsko postrojenje.....	45
7	MODELIRANJE FLEKSIBILNE OPSKRBE ELEKTIRČNOM ENERGIJOM TIJEKOM TJEDNA U VELJAČI I SRPNJU .....	46
7.1	Pretpostavke modela opskrbe .....	46
7.2	Programsko postavljanje modela.....	46
7.3	Rezultati modela optimizacije opskrbe industrijske zone .....	49
7.3.1	Srpanj, baterija = 0 kWh .....	50
7.3.1	Veljača, baterija = 0 kWh.....	51
7.3.2	Srpanj, baterija = 5 MWh.....	53
7.3.3	Veljača, baterija = 5 MWh .....	55
7.4	Utjecaj fleksibilne opskrbe .....	57
7.5	Procjena isplativosti instaliranja baterijskog sustava .....	58
7.6	Sirovine bioplinskog postrojenja i punjenje spremnika. ....	59
8	ZAKLJUČAK .....	60
	LITERATURA.....	61
	PRILOZI.....	65
	Prilog A – Dnevna, tjedna i sezonska opterećenja energetske opskrbe pojedinih industrija ...	66
	Prilog B– Rezultati simulacije modela solarnog sustava u programu <i>PVSol</i> .....	75
	Prilog C– <i>Matlab</i> optimizacija .....	76





## POPIS SLIKA

Slika 1 Ovisnost potrošnje energije i BDP-a po glavi stanovnika [3].....	2
Slika 2 Raspodjela izvora energije u svijetu (2019). [4] .....	2
Slika 3 Raspodjela energije po sektorima u EU (2019.) [5].....	3
Slika 4 Rast udjela električne energije [6].....	4
Slika 5 Mogućnosti tranzicije toplinske opskrbe [7].....	5
Slika 6 Visokotemperaturni toplinski spremnik punjen pijeskom [8].....	6
Slika 7 Određivanje cijene el. energ., pojednostavljeno [11].....	7
Slika 8 Podaci za dan unaprijed tržište za dva radna dana s burze CROPEX, 2022. [14].....	8
Slika 9 Udjeli projekata prema podacima OIEKPP-a i podacima HOPS-a [9] .....	10
Slika 10 Dnevni profil opskrbe [6].....	10
Slika 11 Fleksibilnost energetske sustava [6] .....	11
Slika 12 Suvremene mogućnosti pohrane energije [16].....	13
Slika 13 Shema odnosa uzajamnog trgovanja [19] .....	15
Slika 14 Praksa u projektiranju fotonaponskih sustava.....	18
Slika 15 Približni raspored industrijske zone .....	20
Slika 16 Srednja dnevna ukupna osunčanost vodoravne plohe [24].....	21
Slika 17 Udjeli pojedinih Županija u ukupno sakupljenom komunalnom otpadu u organizaciji JLS [25] .....	22
Slika 18 Dijagram toka proizvodnje sira.....	25
Slika 19 Mjesečna isporuka mlijeka u mljekaru .....	27
Slika 20 Sezonski profil potrebe za energijom.....	27
Slika 21 Dnevni raspored temperature .....	30
Slika 22 Sezonska profil potrebe za rashladnom energijom u hladnjači.....	32
Slika 23 Razdioba rashladne energije u hladnjači.....	33
Slika 24 Postupak proizvodnje piva [35] .....	33
Slika 25 Mjesečna razdioba proizvodnje piva.....	34
Slika 26 Sezonski profil potrebe za energijom u pivovari .....	35
Slika 27 Blok dijagram proizvodnje kartona.....	35
Slika 28 Sezonski profil energetske potrebe pogona kartonske industrije.....	36
Slika 29 Udio u godišnjoj proizvodnji betona.....	37
Slika 30 Godišnja potreba za električnom energijom u tvornici betonskih proizvoda .....	38

Slika 31 Slijed energetske opskrbe data centra .....	38
Slika 32 Razdioba energetske potrebe u data centru.....	39
Slika 33 Raspored opterećenja data centra jedinstvene upotrebe [40].....	39
Slika 34 Raspored potrošnje električne energije data centra tijekom godine.....	40
Slika 35 Upotreba toplinske energije u industrijskoj zoni .....	41
Slika 36 Upotreba rashladne energije u industrijskoj zoni.....	41
Slika 37 Upotreba električne energije u industrijskoj zoni .....	42
Slika 38 Model fotonaponskog sustava industrijske zone .....	44
Slika 39 Tok energije proizvedene iz FN .....	44
Slika 40 Shematski prikaz tehnološkog procesa bioplinskog postrojenja [41].....	45
Slika 41 Ograničenja fmincon metode .....	46
Slika 42 Cijena električne energije tijekom tjedna veljače i srpnja .....	48
Slika 43 Upravljanje opskrbom, srpanj, bat = 0kWh .....	50
Slika 44 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat = 0 kWh .....	50
Slika 45 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, srpanj, bat=0 kWh.....	51
Slika 46 Trošak opskrbe, srpanj, bat=0 kWh .....	51
Slika 47 Upravljanje opskrbom, veljača, bat = 0 kWh.....	51
Slika 48 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat =0 kWh .....	52
Slika 49 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, veljača, bat=0 kWh .....	52
Slika 50 Trošak opskrbe, veljača, bat = 0 kWh.....	52
Slika 51 Upravljanje opskrbom, srpanj, bat = 5000 kWh .....	53
Slika 52 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat =5000 kWh .....	53
Slika 53 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, srpanj, bat=5000 kWh.....	54
Slika 54 Trošak opskrbe, veljača, bat = 0 kWh.....	54
Slika 55 Napunjenost baterije, veljača, bat = 5000 kWh .....	54
Slika 56 Upravljanje opskrbom, veljača, bat = 5000 kWh.....	55
Slika 57 Opskrba industrijske zone, veljača, bat =5000 kWh.....	55
Slika 58 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, veljača, bat=5000 kWh .....	56
Slika 59 Trošak opskrbe, veljača, bat = 5000 kWh.....	56
Slika 60 Napunjenost baterije, veljača, bat = 5000 kWh .....	56
Slika 61 Iskorištena snaga FN sustava u opskrbi zone.....	57
Slika 62 Tjedni trošak u ovisnosti o veličini baterije .....	58
Slika 63 Napunjenost bioplinskog spremnika.....	59
Slika 64 Relativna dnevna opterećenja, električna energija.....	67

Slika 65 Relativna tjedna opterećenja, električna energija.....	67
Slika 66 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, električna energija.....	68
Slika 67 Apsolutna opterećenja u tjednu srpnja, električna energija.....	68
Slika 68 Apsolutno opterećenje u zoni, električna energija.....	69
Slika 69 Apsolutno opterećenje zone i proizvodnja iz FN elektrane, električna energija.....	69
Slika 70 Relativna dnevna opterećenja, toplinska energija.....	70
Slika 71 Relativna tjedna opterećenja, toplinska energija.....	70
Slika 72 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, toplinska energija.....	71
Slika 73 Apsolutna opterećenja u srpnju u tjednu srpnja.....	71
Slika 74 Apsolutno opterećenje u tjednu srpnja, toplinska energija.....	72
Slika 75 Relativna dnevna opterećenja, rashladna energija.....	72
Slika 76 Relativna tjedna opterećenja, rashladna energija.....	73
Slika 77 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, rashladna energija.....	73
Slika 78 Apsolutna opterećenja u tjednu srpnja, rashladna energija.....	74
Slika 79 Apsolutno opterećenje zone, rashladna energija.....	74
Slika 80 Predviđena proizvodnja iz FN elektrane i potreba za energijom.....	75
Slika 81 Upotreba energije iz fotonapona.....	75
Slika 82 Fmincon metoda.....	76
Slika 83 Funkcija „Trosak“.....	76
Slika 84 Funkcija „ogranicenja“.....	77
Slika 85 Srpanj, bat = 1000 kWh.....	79
Slika 86 Veljača, bat = 1000 kWh.....	80
Slika 87 Srpanj, bat = 2000 kWh.....	81
Slika 88 Veljača, bat = 2000 kWh.....	82
Slika 89 Srpanj, bat = 3000 kWh.....	83
Slika 90 Veljača, bat = 3000 kWh.....	84
Slika 91 Srpanj, bat = 4000 kWh.....	85
Slika 92 Veljača, bat = 4000 kWh.....	86
Slika 93 Srpanj, bat = 6000 kWh.....	87
Slika 94 Veljača, bat = 6000 kWh.....	88

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Potrebna energija u proizvodnji sira.....	26
Tablica 2 Raspodjela energije u pivnici .....	34
Tablica 3 Podaci o proizvodnji bioplinskog postrojenja .....	59

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
$P_{\max,s,h,m}$	- maksimalno prosječno mjesečno satno opterećenje ,	$W(h)$ .
$P_{s,h}$	- prosječno satno opterećenje,	$W(h)$ ,
$A_p$	- površina poda,	$m^2$ ,
$A_z$	- površina zidova i stropa,	$m^2$ ,
$E_{bat,h}$	- trenutna napunjenost baterije,	$kWh$ ,
$E_{bat,c}$	- kapacitet baterije,	$kWh$ .
$E_m$	- energija potrošena tijekom mjeseca,	$kWh$ ,
$P_{\dot{c}}$	- toplinski tok kojeg odaje čovjek,	$W$ ,
$P_L$	- snaga rasvjetnih tijela,	$W$ .
$P_{bat,h}$	- prosječna snaga baterije u satu,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$P_{bio,h}$	- prosječna snaga bioplinskog postrojenja u satu,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$P_d$	- snaga odleđivanja,	$W$ ,
$P_{mre,h}$	- prosječna snaga mreže u satu,	$\frac{kWh}{h}$ .
$P_{opt,h}$	- prosječna potrebna snaga u satu,	$\frac{kWh}{h}$ .
$P_{pan,h}$	- prosječna snaga fotonaponske elektrane u satu,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$P_v$	- snaga ventilatora,	$W$ ,
$Q_{rp}$	- toplinski dobici uslijed respiracije na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$Q_{ti,s}$	- toplinski dobici uslijed transmisije i infiltracije na satnoj razini,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$Q_u$	- toplinski dobici od unutarnjeg opterećenja na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$Q_{up}$	- toplinski dobici uslijed unosa proizvoda u hladnjaču na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$T_{vp}$	- temperatura zemlje,	$^{\circ}C$ ,

$T_h$	- trošak na satnoj razini,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$T_j$	- temperatura ulaza jabuka,	$^{\circ}C$ .
$T_u$	- temperatura unutar hladnjače,	$^{\circ}C$ ,
$T_v$	- vanjska temperatura u ciljanom satu,	$^{\circ}C$ ,
$U_p$	- koeficijent prolaza topline poda,	$\frac{W}{m^2K}$
$U_z$	- koeficijent prolaza topline zidova i stropa,	$\frac{W}{m^2K}$
$c_{bat,h}$	- cijena energije iz baterije,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$c_{bio,h}$	- cijena energije iz bioplinskog postrojenja,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$c_{mre,h}$	- cijena energije iz mreže,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$c_p$	- specifični toplinski kapacitet jabuke,	$\frac{kJ}{kgK}$
$c_{pan,h}$	- cijena energije iz fotonaponske elektrane,	$\frac{\text{€}}{kWh}$
$m_j$	- masena zapremina jabuka,	$kg$ ,
$m_{ju}$	- masa unosa jabuka,	$kg$ ,
$n_{hm}$	- broj sati u mjesecu.	
$n_c$	- broj ciklusa odležavanja,	
$n_l$	- broj rasvjetnih tijela,	
$n_{lj}$	- broj ljudi koji boravi u hladnjači,	
$n_v$	- broj ventilatora,	
$t_d$	- vrijeme trajanja odležavanja ,	$h$ ,
$t_l$	- vrijeme rada rasvjetnih tijela,	$h$ ,
$t_r$	- radno vrijeme,	$h$ ,
$t_v$	- vrijeme rada ventilatora,	$h$ ,
$V$	- volumen hladnjače,	$m^3$ ,
$c\rho$	- umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće vlažnog zraka	$\frac{kJ}{m^3K}$
$f$	- faktor opterećenja,	
$n$	- broj izmjena zraka u prostoriji,	

---

*resp* - energija respiracije,

$\frac{kJ}{kg}$

## SAŽETAK

Zelena energetska tranzicija i energetska kriza donose nove izazove za energetske sustav Europske Unije koji naglašavaju potrebu za smanjenjem uvozne ovisnosti i potpunom dekarbonizacijom energetske sustava. Postizanje ciljeva donosi mnoge izazove. Potrebno je očuvati gospodarstvo te očuvati i unaprijediti dostupnost energije.

Ubrzana tranzicija uključuje sve veći broj postrojenja obnovljivih izvora energije priključenih na energetske sustav. Zbog stohastičke naravi elektroenergetski sustav nije prilagođen za rad s punim potencijalom obnovljivih izvora energije. Kako bi sustav bio dugoročno održiv potrebno je izvršiti prilagodbe koje će omogućiti nesmetan rad obnovljivih izvora energije, jamčiti pouzdanu opskrbu, pritom, maksimalno smanjiti troškove prilagodbe.

Ovaj diplomski rad donosi pregled trenutnog stanja opskrbe iz obnovljivih izvora energije, pregled mogućih rješenja za prilagodbu energetske sustava i primjer prilagodbe opskrbe na jednoj industrijskoj zoni.

Prilagodba predmetne industrijske zone temelji se na fleksibilnoj energetskej opskrbi omogućenoj: sudjelovanjem zone na burzi električne energije, korištenjem baterijskog sustava i fleksibilnim upravljanjem bioplinskog postrojenja. Fleksibilna energetska opskrba prikazana je matematičkim modelom napravljenim u programu *Matlab*. Model za cilj ima prikazati način upravljanja kojim se ostvaruju minimalni troškovi opskrbe električnom energijom.

Za izradu modela opskrbe korišteni su profili potrošnje industrijske zone napravljeni na temelju dostupnih podataka o sličnim postrojenjima i izrađen je model fotonaponskog sustava industrijske zone u programu *PVSol*.

Ključne riječi: energetska tranzicija, fleksibilna opskrba, industrijska zona



## SUMMARY

The green energy transition and the energy crisis bring new challenges for the energy system of the European Union, which emphasize the need to reduce import dependence and complete decarbonization of the energy system. Achieving goals brings many challenges. It is necessary to preserve the economy and preserve and improve the availability of energy.

The accelerated transition includes an increasing number of renewable energy plants connected to the energy system. Due to its stochastic nature, the power system is not adapted to work with the full potential of renewable energy sources. In order for the system to be sustainable in the long term, it is necessary to make adjustments that will enable the smooth operation of renewable energy sources, guarantee a reliable supply, and at the same time, reduce adjustment costs as much as possible.

This graduate thesis provides an overview of the current state of supply from renewable energy sources, an overview of possible solutions for adjusting the energy system and an example of adjusting the supply in one industrial zone.

The adaptation of the industrial zone is based on flexible energy supply made possible by: the zone's participation in the electricity exchange, the use of a battery system and flexible management of the biogas plant. Flexible energy supply is shown by a mathematical model created in the *Matlab* program. The aim of the model is to show the way of management that achieves the minimum costs of electricity supply.

To create the supply model, industrial consumption profiles of the zone were used based on available data on similar plants, and a photovoltaic system model of the industrial zone was created in the PVSol program.

Keywords: energy transition, flexible supply, industrial zone

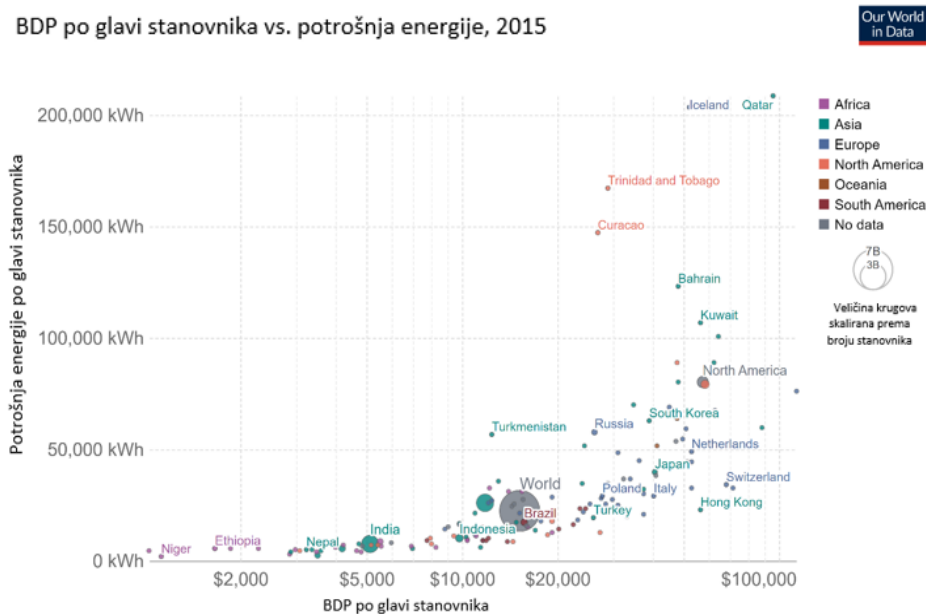
# 1 UVOD

Posljednja četvrtina 20. stoljeća donijela je nova saznanja o utjecaju ljudskog djelovanja na stanje klime. Nove spoznaje rezultirale su potpisivanjem sporazuma o klimatskim promjenama na globalnoj razini: Protokol iz Kyota (1997.), Pariški sporazum (2015.). Kako bi ciljevi tih sporazuma bili ostvareni na području Europe, Europska komisija je 11. prosinca 2019. predstavila europski Zeleni plan („*Green Deal*“). Planom je predviđeno da Europa do 2050. godine postane prvi klimatski neutralan kontinent i pritom ostvari gospodarski uzlet, očuva prirodu i osigura visoki životni standard. Kako bi se ispunio takav ambiciozan plan, donesen je niz propisa i strategija, koji zacrtane ciljeve zelenog plana ugrađuju u zakonodavstvo. Među glavnim područjima obuhvaćenim planom nalaze se energetika, industrija i okoliš, pa tako gospodarstvo mora počivati na čistoj, cjenovno prihvatljivoj, pristupačnoj i sigurnoj energiji, visokoj učinkovitosti sustava i nultoj stopi onečišćenja [1].

Vremensko razdoblje od predstavljanja Zelenog plana pa do danas (kraj rujna 2022. godine) obilježila je pandemija korona virusa, a od veljače i rat na istoku Europe. Reakcije na događaje u tom razdoblju dovele su do inflacije, energetske krize, odnosno sveopćeg povećanja cijena i nesigurnosti opskrbe. Nesigurnost opskrbe dovela je do donošenja još jednog plana, u okviru Zelenog plana, „*REPowerEU*“, koji predviđa još bržu zelenu energetska tranziciju nego je to predviđeno prvotnim Zelenim planom. Novi plan donesen je ne samo zbog klimatskih promjena, već i zbog energetske neovisnosti.

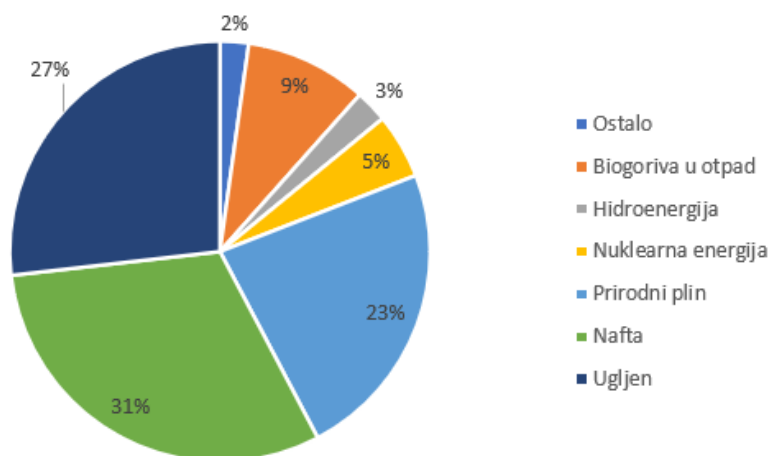
## 1.1 Zelena energetska tranzicija

Energija, u smislu komercijalno iskoristive energije, danas je potrebna u svim aspektima života modernog čovjeka: kao električna, toplinska (rashladna) ili mehanička energija (energija za transport). Potrošnja energije po glavi stanovnika uvelike korelira s ekonomskom moći države, pa države s velikim BDP-om po glavi stanovnika imaju veću potrošnju energije. Korelaciju BDP-a (*per capita*) i potrošnje energije prikazuje slika 1. U prosjeku za svakih 1% rasta BDP-a po glavni stanovnika, potrošnja energije po glavi stanovnika raste za 0,46% [2]. Nagli ekonomski razvoj do sad slabije razvijenih, a mnogoljudnih zemalja rezultira povećanom potrebom za energijom na svjetskoj razini.



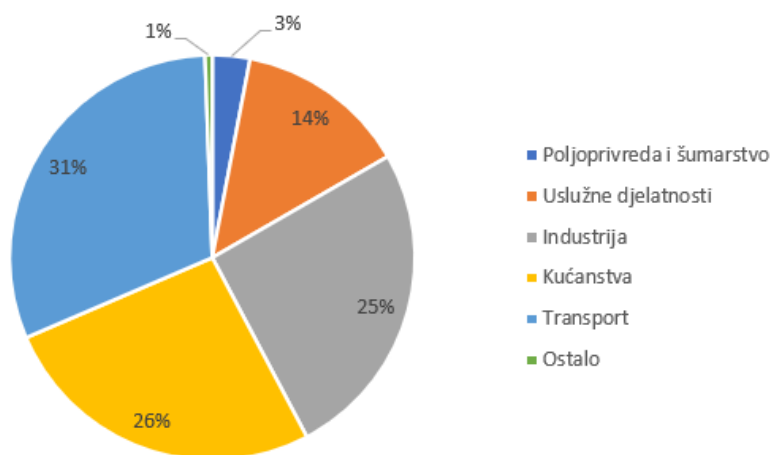
Slika 1 Ovisnost potrošnje energije i BDP-a po glavi stanovnika [3]

Većina energije danas nastaje izgaranjem fosilnih goriva. Na slici 2, može se vidjeti kako se 2019. godine, čak više od ¾ svjetske energije dobivalo izgaranjem fosilnih goriva. Stanje raspodjele izvora energije ni danas nije značajno drugačije.



Slika 2 Raspodjela izvora energije u svijetu (2019). [4]

Da bi se spriječile posljedice daljnjeg rasta upotrebe fosilnih goriva potreban je nagli zaokret u energetskej politici. Potrebno je u svim sektorima djelovati izbacivanjem fosilnih goriva iz upotrebe, a uvođenjem obnovljivih izvora energije. Prijelaz s fosilnih goriva na obnovljive izvore energije nazvan je *zelena energetska tranzicija*.



Slika 3 Raspodjela energije po sektorima u EU (2019.) [5]

Slika 3 prikazuje kako se na transport, industriju i kućanstva odnosi 82% potrošnje energije Europske Unije. Nužno je zato pozornost obratiti na rješavanje energetske pitanja tih triju sektora. U sektorima transporta i kućanstava rješavanje pitanja energetske tranzicije ide u smjeru elektrifikacije. U sektoru transporta dolazi do sve većeg broja elektrificiranih vozila, a u sektoru kućanstva do sve veće primjene dizalica topline. Može se očekivati kako će se trend elektrifikacije nastaviti i uzrokovati značajan porast potražnje za električnom energijom.

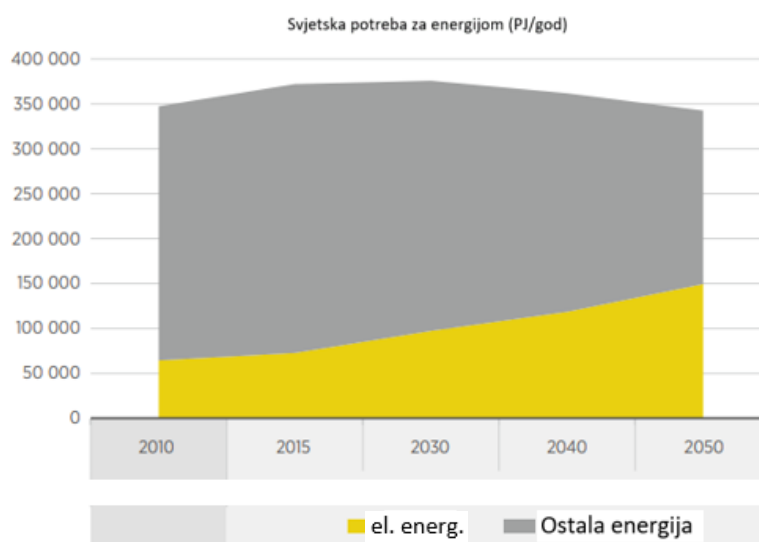
Industrijski sektor obuhvaća četvrtinu energetske potrošnje i bitan je čimbenik gospodarskog razvoja Europske Unije. Činjenica kako u industrijskom sektoru sudjeluju tvrtke, a ne fizičke osobe, čini ga potentnim sektorom za ostvarenje najbrže energetske tranzicije. Ulaganje u nove pristupe energetskej opskrbi kroz implementiranje novih tehnologija, industrijski sektor mogu učiniti okosnicom *zelene energetske tranzicije*.

## 1.2 Električna energija u tranziciji

U razdoblju do pojave OIE elektroenergetski sustavi (EES) bili su centralizirani sustavi koji su se sastojali obično od manjeg broja velikih proizvodnih postrojenja električne energije. Sustavom je uglavnom upravljala jedinstvena nacionalna tvrtka, u Hrvatskoj to je bila Hrvatska elektroprivreda (HEP). Pojavom obnovljivih izvora energije (OIE), došlo je do mogućnosti razvijanja decentralizirane proizvodnje električne energije proizvodnim postrojenjima manjih snaga. Spajanjem OIE na elektroenergetsku mrežu pojavila se potreba za restrukturiranjem EES-a. U Hrvatskom EES-u tako se danas razlikuju operatori prijenosa, distribucije i opskrbe.

Proizvodni pogodni OIE postrojenja, za razliku od konvencionalnih postrojenja, često se spajaju na strani potrošača, na distribucijsku mrežu srednjeg i niskog napona. Električna energija koja se preuzima iz takvih izvora često je povremena, stohastičke naravi.

Predviđeni značajni porast potražnje za električnom energijom, prikazan na slici 4, i porast broja OIE stavljaju nove zahtjeve pred EES. Tradicionalni elektroenergetski sustav nije prilagođen zahtjevima masovnog priključenja OIE na mrežu. U slijedećem vremenu zato su izvjesna velika ulaganja u prilagodbu EES-a.

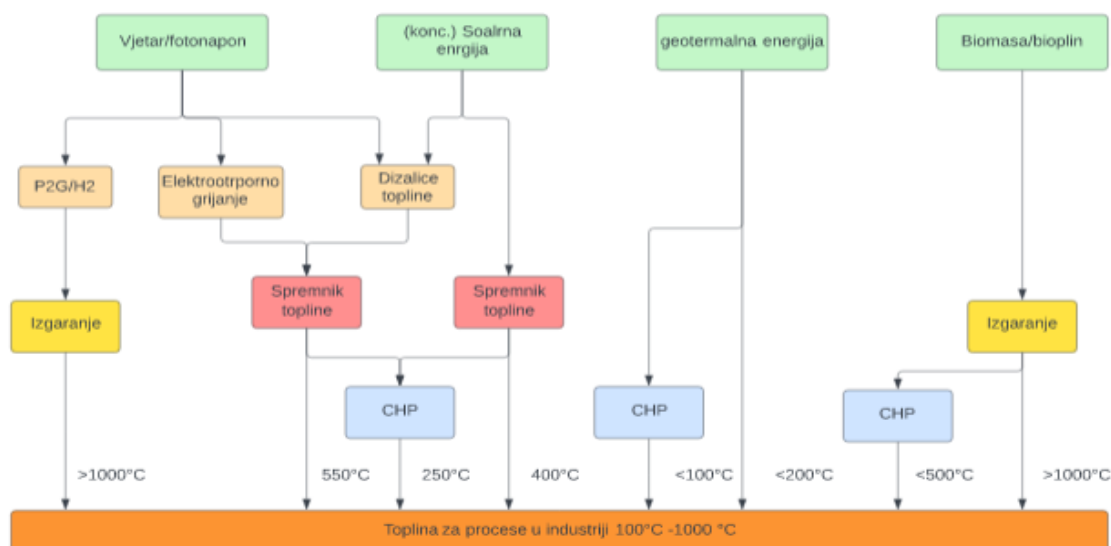


Slika 4 Rast udjela električne energije [6]

### 1.3 Toplinska energija u tranziciji

Značajnu ulogu u energetskej tranziciji zauzima osiguravanje toplinske energije iz OIE. U dijelu kućanstava dio potreba za toplinskom energijom pokriva se korištenjem električne energije, a drugi dio potreba moguće je pokriti kroz spajanje na centralne gradske sustave grijanja. U prijelaznom razdoblju centralni sustavi mogu biti pogonjeni prirodnim plinom, dok je poslije moguć prelazak na biopljin i/ili zeleni vodik. Kućanstva zauzimaju veliki dio potrošnje energije, ali zbog relativno malih potrebnih temperatura tranzicija kućanstava ne bi trebala biti upitna.

Industrijski potrošači često su potrošači značajnih količina toplinske energije, obično toplinske energije na višim temperaturnim razinama. Visoke temperature do sad su se postizale izgaranjem fosilnih goriva pa je danas potrebno pronaći odgovarajuću zamjenu. Primjerice, za postizanje visokih temperatura može se spaljivati biomasa, biopljin ili vodik. Osim spaljivanjem, do visokih temperatura, može se doći i uz pomoć sustava za koncentraciju solarne energije, geotermalnih postrojenja ili direktno iz električne energije dobivene iz OIE (elektrotopno grijanje). Različite mogućnosti proizvodnje toplinske energije mogu se vidjeti na slici 5. Iako direktno dobivanje topline iz električne energije može izgledati kao besmislena degradacija energije, viškovi električne energije tako mogu biti pretvoreni u korisnu energiju. Proizvedena toplinska energija može se pohranjivati zajedno s otpadnom toplinom iz kogeneracijskih postrojenja. Primjer spremnika za pohranu toplinske energije prikazan je slikom 6.



Slika 5 Mogućnosti tranzicije toplinske opskrbe [7]



Slika 6 Visokotemperaturni toplinski spremnik punjen pijeskom [8]

Osim toplinske energije viših temperaturnih razina, u industriji postoji potreba za toplinskom energijom nižih temperaturnih razina, odnosno rashladnom energijom. Rashladna energija se većinom dobiva korištenjem električne energije za rad kompresora u ljevokretnom ciklusu, a moguće ju je dobiti i preko apsorpcijskih rashladnika. Tehnologija apsorpcijskih rashladnika omogućava ostvarenje rashladne energije iz toplinske energije. Učinak apsorpcijskog hladnjaka može se upotrijebiti kako bi se iskoristila otpadna toplina nastala u procesima u industriji.

#### 1.4 OIE na tržištu

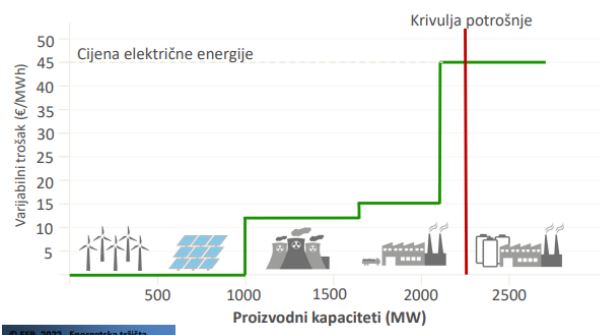
Izbor postrojenja OIE raznolik je i ima različite karakteristike pa je teško pristupiti sveobuhvatnom opisu njihove uloge. Uz sam opis odnosa OIE i mreže, u tehničkom smislu, nužno je spomenuti način financiranja i ulogu OIE na tržištu. Ne postoji jedinstven način njihova djelovanja ni na mreži ni na tržištu, kako na razini svijeta tako i na razini EU. Zato će se u daljnjem tekstu OIE sagledati u kontekstu njihova prisustva u Republici Hrvatskoj.

Kad je riječ o djelovanju OIE na tržištu, uglavnom se misli na tržište električne energije. Tržište toplinske energije zakonski je definirano, Zakonom o tržištu toplinske energije (NN 80/13, 14/14, 102/14, 95/15, 76/18, 86/19). Tehnička ograničenja prijenosa topline onemogućuju stvaranje burzi toplinske energije što tržište toplinske energije čini manje razvijenim.

U odnosu na tržište toplinske energije, tržište električne energije je razvijenije, a regulirano je Zakonom o tržištu električne energije (NN 111/21). U početnom razdoblju pristupanja OIE u mrežu, cijena električne energije nije mogla isplatiti investiciju u OIE pa je glavni pokretač rasta broja postrojenja OIE bio sustav zajamčene otkupne cijene (FiT), a 2021. godine Vlada RH uspostavila je novi sustav u vidu javnih natječaja kojima se dodjeljuje zajamčena otkupna cijena (do 500 kW) i tržišne premije (iznad 500 kW) (FiP) [9].

Sustav je to u kojem se povlaštenim proizvođačima električna energija otkupljuje po dogovorenoj cijeni za svaku jedinicu proizvedene energije. Povlaštene proizvođači su oni proizvođači od kojih su operatori prijenosnog i distribucijskog sustava dužni preuzimati energiju, a to su proizvođači iz OIE i visokoučinkovite kogeneracije (VUK) [10]. U Hrvatskoj, ulogu operatora prijenosnog sustava ima Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS), a operatora distribucijskog sustava, ima HEP-Operator distribucijskog sustava (HEP-ODS). Povlaštene proizvođači energije iz OIE i VUK koji ne sudjeluju direktno na tržištu moraju biti članovi EKO bilančne grupe. Članovi grupe nakon što ishoduju dozvolu o obavljanju energetske djelatnosti od Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA), imaju pravo na povlaštenu cijenu sukladno sklopljenim ugovorima o otkupu električne energije s Hrvatskim operatorom tržišta energije (HROTE). Od početka 2019. HROTE proizvedenu električnu energiju EKO bilančne skupine prodaje na tržištu putem platformi za trgovanje električnom energijom burze CROPEX.

Na tržištu električne energije prodaje se energija iz svih izvora, a cijena je diktirana varijabilnim troškovima zadnje elektrane voznog reda elektrana (eng. *merit order*). Na prvom mjestu voznog reda elektrana nalaze se elektrane iz OIE. Varijabilni trošak proizvodnih postrojenja OIE praktički je jednak nula. Pojednostavljeni prikaz određivanja cijene prema voznom redu prikazan je slikom 7.

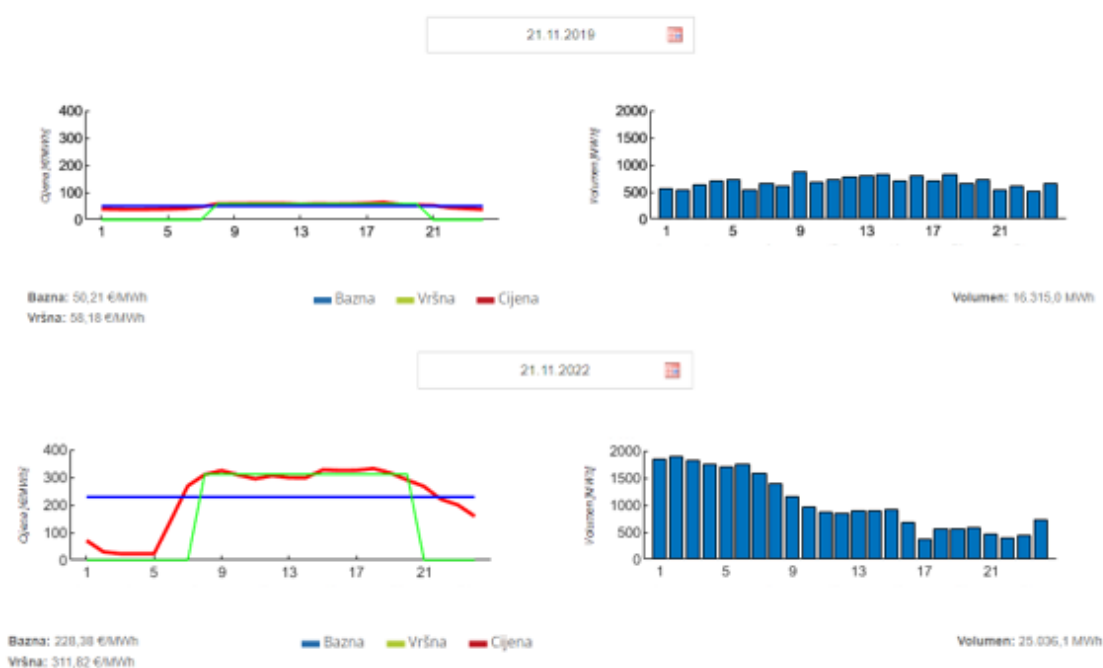


Slika 7 Određivanje cijene el. energ., pojednostavljeno [11]



OIE, poglavito energija vjetra i energija sunca, imaju svojstvo proizvodnje električne energije stohastičke prirode. Takvo svojstvo proizvodnje stvara potrebu za energijom uravnoteženja EES-a. Za pružanje usluge uravnoteženja EES-a u Hrvatskoj, zadužen je Hrvatski operator prijenosa (HOPS). U procesu otkupa energije iz OIE, HROTE je obvezan plaćati troškove energije uravnoteženja HOPS-u. Troškove energije HROTE pokriva iz sredstava prikupljenih u sustavu poticanja proizvodnje električne energije iz OIE i VUK [12]. Rast broja postrojenja OIE može povećati troškove energije uravnoteženja. Troškovi rastu zbog češće potrebe za aktiviranjem elektrana u rezervi i povećavanja potrebe za rezervom.

Trenutne visoke cijene električne energije uzrokovane energetsom krizom pridonose izlazu postrojenja OIE iz sustava poticanja i potiču izgradnju OIE. Daljnji razvoj OIE može utjecati na smanjenje cijene električne energije, ali pitanje je do koje mjere i u kojim uvjetima. Prema istraživanju konzultantske kuće McKinsey daljim rastom udjela OIE prosječna cijena električne energije 2025. može pasti do cijene 120 €/MWh [13]. Za usporedbu, na slici 8 prikazane su trenutne cijene i cijene električne energije 2019. godine. Kako bi se ostvarili što manji troškovi energetske opskrbe potrebno će biti ostvariti fleksibilnost opskrbe. Na taj način će se omogućiti preuzimanje energije u vrijeme niskih cijena. Povećana potražnja uzrokovana niskim cijenama može se vidjeti na dijagramu volumena trgovanja električnom energijom na slici 8.



Slika 8 Podaci za dan unaprijed tržište za dva radna dana s burze CROPEX, 2022. [14]

## 1.5 OIE na mreži

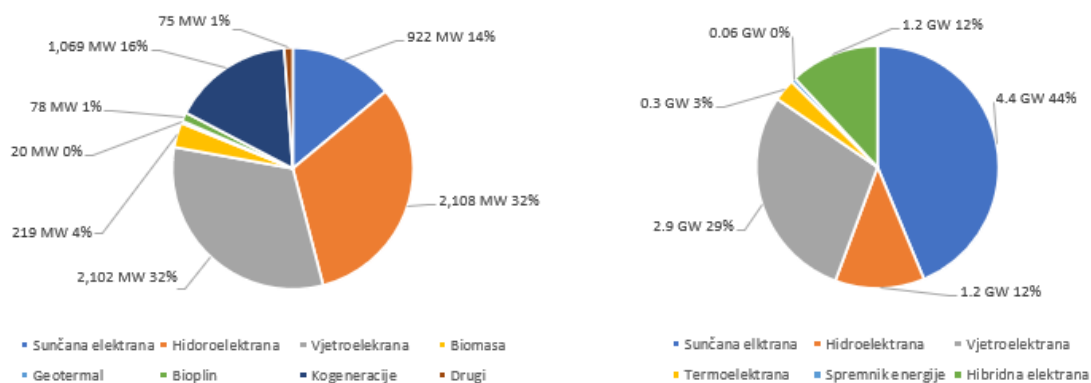
Već u prethodnom poglavlju naznačen je problem uravnoteženja mreže zbog stohastičke naravi proizvodnje električne energije iz energije vjetra i energije Sunca. Mehanizmi uravnoteženja EES-a koje provodi HOPS, iz rezervi snage za održavanje frekvencije sustava uslijed pojave neravnoteže u sustavu, su: rezerva za održavanje frekvencije (FCR), rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom (aFRR), rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnom aktivacijom (mFRR) [15]. Osiguranje FCR rezerve snage unutar hrvatskog regulacijskog područja frekvencije i snage razmjene (LFC) ne plaća se. Osiguranje aFRR i mFRR se naplaćuje. Rezerva aFRR osigurava vraćanje frekvencije na predefiniranu vrijednost dok rezerva mFRR primarno se koristi kako bi se oslobodilo aktivirane aFRR rezerve. Od pojave OIE rezerve aFRR osim pokrivanja varijacije opterećenja EES-a i satnih promjena ugovornih rasporeda razmjene i proizvođača u EES-u pokrivaju i stohastičke varijacije proizvodnje OIE te odstupanje proizvodnje OIE od planiranih vrijednosti [15].

Dimenzioniranje rezervi aFRR vrši se uz empirijski pristup. Minimalni preporučeni iznos rezerve određuje se prema izrazu:  $R = \sqrt{aL_{\max} + b^2} - b$ , gdje je  $L_{\max}$  maksimalno opterećenje u sustavu, a  $a$  i  $b$  su iskustveni faktori.

Dimenzioniranje rezervi mFRR vrši se determinističkim i probablističkim pristupom. Deterministički pristup u obzir uzima najveće pojedinačne ispade jedinica proizvodnje i najveće pojedinačne ispade jedinica potrošnje. Probablistički pristup definira potrebu rezervi temeljem povijesnih potreba rezervi. Prilikom dimenzioniranja rezervi mFRR mora se uzeti u obzir integracija volatilnih OIE koji utječu na dimenzioniranje. Primjerice, velike potrebe za uravnoteženjem OIE nastaju, prilikom pogreške prognoze rada vjetroelektrana.

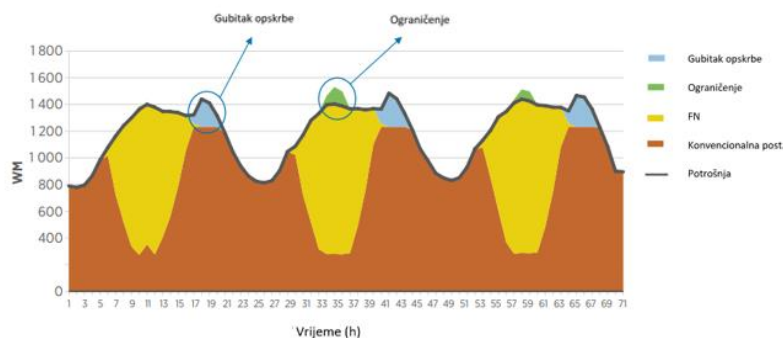
U prvih šest mjeseci 2020. godine maksimalne pogreške između prognozirane i ostvarene satne proizvodnje vjetroelektrana iznosile su 216,7 MW ( prognoza veća od ostvarenja) i -252,2 MW (prognoza manja od ostvarenja) [15]. Za usporedbu, 252,2 MW može iznositi između 10 i 17% ukupne potrebe snage regulacijske zone HOPS-a. Ukoliko rezerve nisu dostatne za uravnoteženje tako velikih pogrešaka može doći do neuravnoteženosti elektroenergetskog sustava.

U registru OIE i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (OIEKPP) na datum 5.prosinca 2022. upisani su projekti snage 6,6 GW (godinu dana ranije, 5,5 GW), a prema podacima HOPS-a o projektima koji čekaju priključenje na mrežu, na datum 7.svibnja 2021. HOPS je imao 11,30 GW projekata koji su kandidati za priključenje na prijenosnu mrežu. Udjeli projekata iz navedenih izvora prikazani su slikom 9. Većina tih projekata vezana je za energiju vjetra i energiju Sunca [9].



Slika 9 Udjeli projekata prema podacima OIEKPP-a i podacima HOPS-a [9]

Kako se broj OIE povećava, uz iste relativne pogreške prognoze rada, povećavat će se i apsolutni iznosi pogreške [15]. Takve pogreške mogu dovesti do zagušenja mreže i otežanog uravnoteženja. Zbog nemogućnosti uspostavljanja ravnoteže u mreži, u trenucima kad energije vjetra i energije Sunca ima previše, potrebno će biti isključiti postrojenja OIE, a u trenucima manjka može doći do djelomičnog nestanka električne energije (eng. *loss of load*). Dnevni profil opskrbe s prikazanim djelomičnim nestankom električne energije prikazan je slikom 10. U takvim okolnostima postojeća dostupna snaga svih izvora energije daleko će morati nadmašiti stvarno potrebnu snagu, što će pak uzrokovati visoke cijene. Kako bi se scenariji urušavanja mreže spriječili, cijena električne energije bila prihvatljiva i kako bi se uspješno provela dekarbonizacija proizvodnje energije, potrebno je povećati fleksibilnost energetskog sustava.



Slika 10 Dnevni profil opskrbe [6]

## 2 FLEKSIBILNOST ENERGETSKOG SUSTAVA

Elektroenergetski sustav sadašnjeg oblika u budućnosti neće biti spreman za prihvaćanje novih količina OIE na mrežu. Kako bi se EES sustav prilagodio novim okolnostima treba djelovati što prije i na svim područjima sustava. Prema izvješću Međunarodne agencije za obnovljive izvore energije (IRENA), potrebno je djelovati u područjima proizvodnje, prijenosa, distribucije, pohrane, upravljanja potražnjom i sektorskog povezivanja. Potencijalna područja ostvarenja fleksibilnosti prikazana su slikom 11.



Slika 11 Fleksibilnost energetskog sustava [6]

### 2.1 Proizvodnja

Povećanjem udjela OIE na mreži, uloga konvencionalnih postrojenja mora se mijenjati. Ona moraju postati fleksibilna postrojenja za pokrivanje razlike između proizvodnje i potrošnje OIE. Za to su potrebna ulaganja u povećanje fleksibilnosti konvencionalnih proizvodnih postrojenja. Za uravnoteženje EES-a potrebno je uključiti i što veći broj OIE. Planskim vođenjem bioplinska i postrojenja na biomasu se mogu prilagoditi za rad u sustavu uravnoteženja EES-a.

Za vrijeme pogodnih vremenskih uvjeta za proizvodnju, energija se dobiva iz vjetra i Sunca, a u vremenu kada to uvjeti ne dozvoljavaju dio se može pokriti iz hidroelektrana, postrojenja biomase i bioplina, a dio iz fosilnih postrojenja (u prijelaznom razdoblju). Kako u budućnosti ne bi konstantno morali imati podvojevu potrebnu snagu u hladnim rezervama, u vidu fosilnih postrojenja (koje je potrebno izbaciti iz uporabe), potrebno je djelovati i na drugim dijelovima EES-a.

## 2.2 Prijenos i distribucija

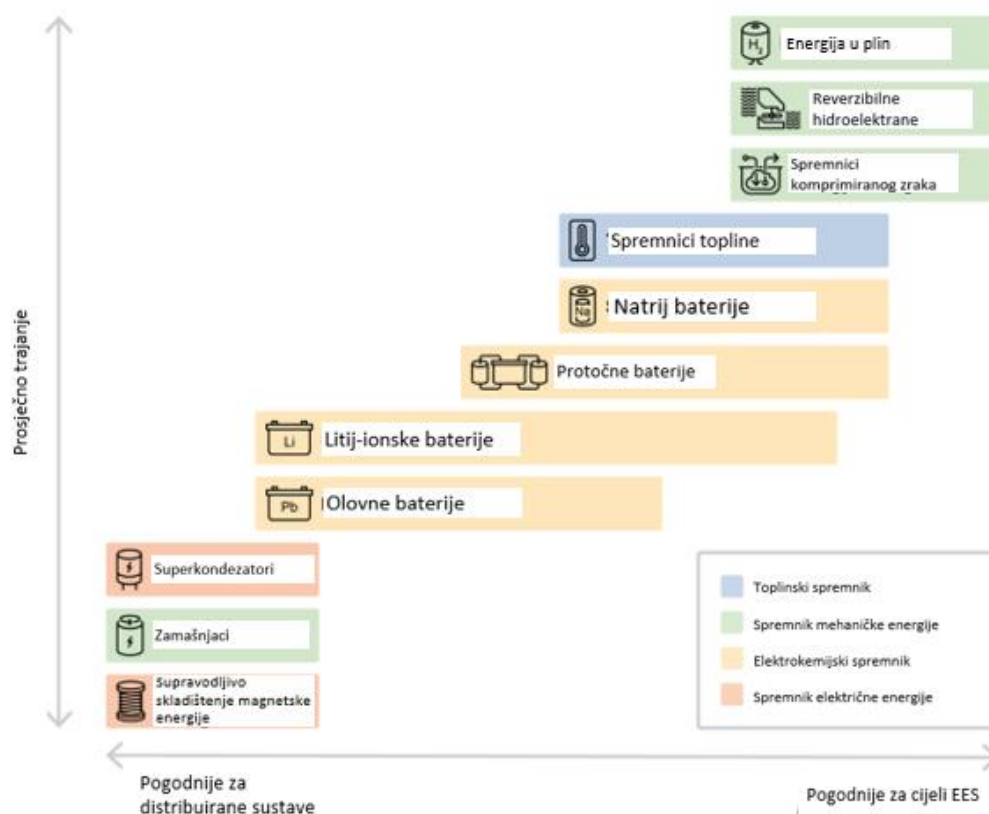
Obnovljivi izvori energije nisu jednoliko rasprostranjeni po teritoriju regulacijskih područja. U regulacijskoj zoni HOPS-a većina proizvodnje električne energije iz energije vjetra nalazi se u 4 četiri najjužnije županije: Splitsko-dalmatinskoj, Šibensko-kninskoj, Zadarskoj i Dubrovačko-neretvanskoj. S obzirom na planove o rastu proizvodnje el. energije iz energije Sunca, izgledno je da će se većina proizvodnje te energije nalaziti u navedene četiri županije. Takvo stanje pridonosi višku električne energije u jednom dijelu regulacijskog područja, a manjku u drugom dijelu regulacijskog područja. U vjetrovitim i sunčanim danima, ukoliko kapacitet prijenosa nije dovoljan, može doći do preopterećenja mreže. Rasterećenje prijenosnog sustava može se postići postavljanjem novih vodova i surađivanjem s drugim operatorima prijenosa u svrhu prekograničnog prijenosa. Trenutni prekogranični prijenosni kapaciteti regulacijskog bloka SLO-HR-BIH višestruko zadovoljavaju stvarnu potrebu.

Na razini distribucije EES-a potrebno je provesti modernizaciju sustava, omogućiti uspostavljanje pametne mreže i graditi nove vodove i trafostanica. Ugradnjom pametnih sustava operatorima sustava omogućava se pristup većem broju informacija kojima je moguće manipulirati u svrhu uravnoteženja EES-a, a korisnicima se olakšava pristup obnovljivim izvorima energije.

## 2.3 Pohrana

Kako bi se ulaganja u području proizvodnje, distribucije i opskrbe smanjila na racionalnu razinu potrebno će biti razvijati sustave pohrane energije. Na najvišoj razini, sustavi za pohranu energije se mogu omogućiti putem reverzibilnih hidroelektrana. Takva veliki sustavi omogućavaju pohranu velikih količina električne energije u potencijalnoj energiji vode. Na nižoj razini, odnosno kao manji sustavi pohrane energije (iako ona postaju sve veća) mogu se upotrijebiti baterije koje električnu energiju pohranjuju u obliku kemijske energije. Postoje i drugi oblici sustava pohrane električne energije koja su rjeđe korištena, a prikazana su slikom 14.

Osim pohrane energije u vrijeme povoljnih vremenskih uvjeta, baterijski sustavi mogu služiti za snižavanje vršnih opterećenja i iskorištavanje niskih cijena energije iz mreže. Prilikom puštanja u pogon nekih strojeva dolazi do povećanja snage koju stroj uzima iz mreže. Ukoliko se taj vršni dio snage uzme iz baterije ne dolazi do narušavanja mreže, a kupcu se smanjuju troškovi zbog plaćanja manje snage električne energije.



Slika 12 Suvremene mogućnosti pohrane energije [16]

## 2.4 Upravljanje potražnjom

Uspostavljanje tržišnog mehanizma pokazuje pozitivan trend za ostvarenje upravljanja potražnjom na dobrovoljnoj osnovi [17]. Veleprodajno tržište u Hrvatskoj danas je organizirano kroz izvanburzovno i burzovno tržište električne energije [9]. Na burzovnom tržištu, u Hrvatskoj je to CROPEX, cijena energije se određuje standardno u odnosu ponude i potražnje za energijom na satnoj razini. Velike cijene uzrokovane nedostatkom jeftinih izvora električne energije uzrokuju manju potražnju i obrnuto. Primjerice, u ranim jutarnjim satima, uslijed niske cijene električne energije, uzrokovane prisustvom vjetrova i troškom obustave i ponovnog pokretanja velikih konvencionalnih postrojenja, može doći do povećane potražnje za električnom energijom. Da bi se cijene na unutardnevnom tržištu uskladile sa stvarnim odnosima u mreži potrebno je smanjiti interval trgovanja na manje od jednog sata.

Maloprodajno tržište obuhvaća opskrbu električnom energijom i agregiranje [9]. Kupci električne energije kupuju energiju od opskrbljivača s kojim imaju potpisan ugovor. Ukoliko su kupci i proizvođači električne energije, tj. posjeduju fotonaponski sustav, sklapaju drugu vrstu ugovora s opskrbljivačem. U takvim okolnostima otkupa i prodaje električne energije nema

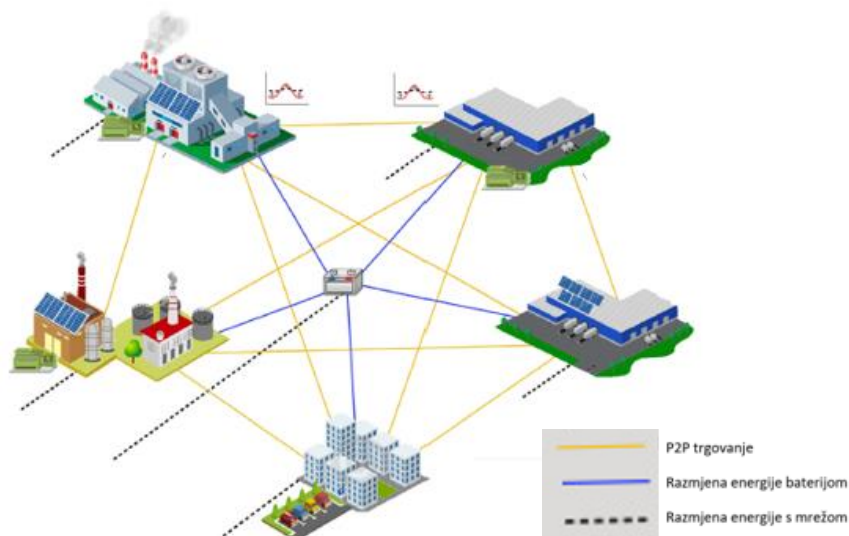
mogućnosti za upravljanjem potražnjom jer je cijena otkupa i prodaje unaprijed je dogovorena ugovorom.

Novi sudionik koji se pojavio na tržištu električne energije je agregator koji obavlja djelatnost agregiranja. Agregiranje je djelatnost koju obavlja fizička ili pravna osoba koja može kombiniranjem snage i/ili iz mreže preuzete električne energije više kupaca ili operatora skladišta energije ili snage i/ili u mrežu predane električne energije više proizvođača ili aktivnih kupaca ili operatora skladišta energije radi sudjelovanja na bilo kojem tržištu električne energije [18]. Odnosno, agregatori mogu stvoriti mrežu malih proizvođača, potrošača i spremnika električne energije kako bi svoju energiju nudili na tržištu. Time agregatori mogu omogućiti stabilnost elektroenergetskom sustavu upravljanjem potražnje i ponude.

Jedan od načina poboljšanja sustava ponude i potražnje je uspostavljanje lokalnih tržišta koja se odvijaju u realnom vremenu. Na lokalnim tržištima sudjeluju članovi smješteni u blizini projekta obnovljivih izvora energije. Ideja lokalnog tržišta je stvoriti dugoročno održive, realne cijene na nekom području, u ovom slučaju, na području industrijske zone. Uspostavljanjem lokalnog tržišta, cijene se u realnom vremenu sinkroniziraju s proizvodnjom energije. Sinkronizacijom cijena s proizvodnjom dolazi do uravnoteženja područja koje tržište obuhvaća. Za očekivati je onda da će cijene odrediti potražnju, a ulaganje u spremnike energije postati isplativije. Do sad takav način trgovanja nije bio izvediv, što zbog nepostojanja tehnologije koja takvo što može omogućiti, što zbog ne postojanja zakonskih okvira za djelovanje takvog sustava. Danas, tehnologija postoji, a na tragu stvaranja zakonskih okvira je uvođenje pojma „*zajednica obnovljivih izvora energije*“ i pojma „*uzajamno trgovanje*“ u ZOIEiVUK (NN 138/21) .

U lokalnim tržištima proizvođači mogu trgovati direktno u mreži bez posredovanja središnjeg tijela, takvo trgovanje može se nazvati uzajamno (eng. *peer to peer*) (P2P). Uzajamno trgovanje električnom energijom nameće se kao moguće rješenje zahtjeva energetske sustava i energetske tržišta, odnosno zahtjeva regulacije sustava i zahtjeva jednostavnog, pristupačnog i dostupnog načina trgovanja uključujući što veći broj sudionika. P2P trgovanje se temelji na međusobnoj povezanosti relativno malih proizvođača, potrošača i akumulatora električne energije koji na lokalnoj razini mogu međusobno trgovati električnom energijom. Takve mikromreže osim što mogu raditi u otočnom režimu, mogu se i međusobno povezivati te povezivati s velikim proizvođačima, odnosno ostatkom EES-a.

Slikom 13 ilustrirano je uzajamno trgovanje i razmjena energije unutar zajednice.



Slika 13 Shema odnosa uzajamnog trgovanja [19]

Na temu uzajamnog trgovanja ostvareni su već neki projekti pa je tako u Švicarskoj napravljen projekt *Quartierstorm* koji je uključivao zajednicu nekoliko stambenih jedinica [20]. Rezultati projekta pokazali su poboljšanje stabilnosti i iskoristivosti sustava. Australaska tvrtka Powerledger također provodi projekte širom svijeta koji omogućuju P2P trgovanje u realnom vremenu [21].

## 2.5 Povezivanje sektora

Još jedan od načina postizanja veće fleksibilnosti sustava je i povezivanje različitih sektora. Za vrijeme sunčanih i vjetrovitih dana moguće je pohraniti električnu energiju u obliku toplinske energije. Pretvorena energija dalje se može koristiti, primjerice, u industriji ili u kućanstvima. Viškovi električne energije mogu se upotrijebiti i za proizvodnju zelenog vodika, koji se može koristiti za postizanje visokih temperatura u industriji ili kao gorivo namijenjeno za transport. Baterije električnih automobila može se iskoristiti kao ponor električne energije u vrijeme njenog izobilja, ali isto tako ih se može iskoristiti kao izvor za uravnoteženje sustava.

Svi ovi primjeri pridonose samoj potrošnji na mjestu proizvodnje što uzrokuje manja opterećenja infrastrukture, a onda i manja ulaganja u sve druge dijelove elektroenergetskog sustava.



### 3 ENERGETSKA TRANZICIJA U INDUSTRIJSKOJ ZONI

Na industrijski sektor otpada 25% svjetske potrošnje primarne energije. Prema Europskoj Komisiji industrija je okosnica europskog gospodarstva. Globalna konkurentna prednost Europe u proizvodima i uslugama visoke dodane vrijednosti predstavlja više od 20% ukupne dodane vrijednosti EU-a, pri čemu industrija izravno osigurava 35 milijuna radnih mjesta [22]. Iz tog razloga jedan od primarnih ciljeva energetske tranzicije mora biti sigurna dekarbonizacija industrijskog sektora. Kako je već spomenuto u uvodnom dijelu, unutar industrijskog sektora djeluju tvrtke, a ne fizičke osobe. Struktura tvrtki omogućuje da njihova znanja i resursi mogu biti dijelom iskorišteni za sudjelovanje u energetske tranziciji. Na taj način industrija može postati prvi dekarbonizirani sektor.

Jedna od sastavnica industrijskog sektora su industrijske zone. Industrijske zone su dijelovi prostora namijenjeni za izgradnju industrijskih pogona. Industrijske zone posjeduju potrebnu infrastrukturu kako bi potakle dolazak ulagača. Zbog načina organizacije industrijskih zona, one su prikladne za primjenu naprednog vođenja upravljanja sustavom energetske opskrbe.

Unutar industrijskih zona ovisno o pogonima postoji potreba za električnom, toplinskom i rashladnom energijom. Postavlja se pitanje, kako sve izvore dekarbonizirati. Tradicionalne industrijske zone do sad su uglavnom imale pasivni način opskrbe energijom, odnosno energija se nije proizvodila unutar zone već se preuzimala iz mreže. U takvom pasivnom načinu opskrbe, električna energija preuzima se iz mreže, preko trafostanica smještenih u zoni. Toplinska energija ovisno o njoj upotrebi najčešće se dobiva izgaranjem fosilnog goriva ili električnim grijačima, dok se rashladna energija obično dobiva iz lijevokretnog procesa u kojem se za pogon koristi električna energija. Pasivnim načinom opskrbe korisnici industrijske zone nisu u mogućnosti upravljati smanjenjem emisija uslijed proizvodnje energije, već to mogu samo činiti poboljšanjem pojedinih procesa koji se provode u postrojenjima. Nemogućnost upravljanja smanjenjem emisija CO<sub>2</sub>, znači nemogućnost smanjenja troškova ili povećanja prihoda u slučaju sudjelovanja unutar okvira EU ETS-a (*Emission Trading System*). Sudionici u takvoj zoni ne mogu utjecati na cijenu energije dok cijena energije značajno utječe na poslovanje sudionika.

S povećanjem dostupnosti tehnologija obnovljivih izvora energije (OIE) dolazi do povećane mogućnosti proizvodnje energije unutar granica zone uz prihvatljivu cijenu pa se tako unutar zone mogu postaviti fotonaponski sustavi, vjetrenjače, bioplinska postrojenja, ili neka druga energetska

postrojenja na OIE. Izbor tipa i veličine postrojenja na OIE unutar zone ovisi o značajkama lokacije konfiguracije terena i objekata.

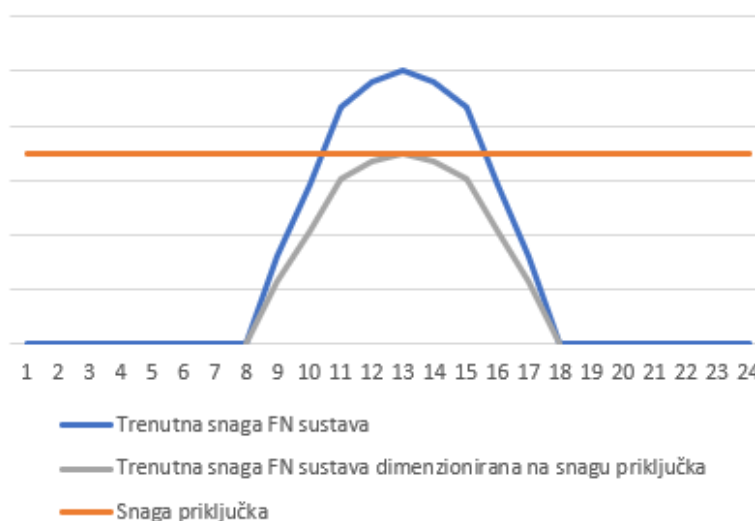
### 3.1 Trenutno stanje OIE u industrijskoj zoni

Zbog trenutnog stanja cijena električne energije i uvjeta priključenja na mrežu, mnogi poduzetnici u gospodarskim zonama odlučuju se na instaliranje fotonaponskih panela. Jednostavniji postupak i učinkovitije iskorištavanje prostora, korisnike zone navodi instalaciju integriranih fotonaponskih sustava, sustava smještenih na krovovima i fasadama građevina.

Uvjeti priključenja na mrežu propisani su zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji. Tim zakonom definiran je status kupca s vlastitom proizvodnjom koji se odnosi na poduzetnike. Kupac s vlastitom proizvodnjom je definiran kao krajnji kupac električne energije na čiju je instalaciju priključeno proizvodno postrojenje iz OIE ili VUK. Proizvedenom energijom se podmiruju njegove potrebe, a ima mogućnost isporuke viška energije u prijenosnu ili distribucijsku mrežu. Da bi imali mogućnost isporuke proizvođačima su nametnuta ograničenja od 500 kW priključne snage po mjernom mjestu i ograničenje snage isporuke koje je jednako priključnoj snazi kupca [9]. Cijena po kojoj se energija preuzima u mrežu definirana je u odnosu na omjer godišnje proizvodnje i godišnje potrošnje. Ako godišnja proizvodnja premaši godišnju potrošnju kupac s vlastitom potrošnjom nalazi se u nepovoljnijem položaju te mu cijena za otkup energije pada. Zadanim ograničenjima smanjuje se ispunjavanje punog potencijala ugradnje fotonaponskih sustava. Modelom obračuna proizvodnje na godišnjoj razini odgovornost za moguće poremećaje mreže u vršnim satima nije na proizvođaču. Takav model spajanja fotonaponskih sustava na mrežu nije održiv. Nastavljanjem takve prakse pitanje je vremena kad mreža više neće moći podnijeti dotok energije u vršnim satima.

U trenutno postavljenom sustavu investitori u intermitentne OIE nisu odgovorni za uravnoteženje EES pa se sustavi projektiraju tako da se odabere onaj broj panela koji će omogućiti dovoljno energije da se na godišnjoj razini pokrije potrošnja. Elektrane su projektirane s većim snagama od snage priključenja, a ograničavaju se prema mreži na veličinu priključne snage (prikazuje slika 14). Zbog ograničenja snage, dio energije koji se može proizvesti pri opterećenjima višim od snage priključka ostaje neiskorišten. Ukoliko neki korisnik industrijske zone nema dovoljno prostora za postavljanje dovoljno velikog sustava za pokrivanje vlastitih potreba, ne može iskoristiti višak koji može proizvesti tvrtka na susjednom zemljištu.

Ograničenjima se smanjuje utjecaj na neuravnoteženost mreže, ali dugoročno gledano, takav sustav ne iskorištava puni potencijal fotonaponskog sustava.



Slika 14 Praksa u projektiranju fotonaponskih sustava

Kod izgradnje drugih postrojenja kao što su bioplinska postrojenja i postrojenja na biomasu, energija se na isti način predaje u mrežu. Pri projektiranju se ne gleda na potrebe za energijom u realnom vremenu, već se gleda na maksimalno ostvarenje financijske koristi iz trenutno mogućih ugovora. Zakoni su postavljeni kao poticaj za izgradnju postrojenja na OIE, ali ugovori, propisani zakonom, nisu temeljni na stanju EES-a u realnom vremenu. Zbog nesuglasja zakona i sustava za očekivati je da će u nekom trenutku doći do promjene zakona.

### 3.2 Mogućnost OIE u industrijskoj zoni

Kako bi se omogućio dugoročan rad OIE, neovisan o vanjskim faktorima, potrebno je razviti sustav fleksibilne opskrbe. Sustav fleksibilne opskrbe predstavlja složen sustav opskrbe energijom koji omogućuje smanjenje troškova opskrbe na temelju proizvodne, skladišne i upravljačke infrastrukture. Ideja je fleksibilne opskrbe je iskoristiti što veći udio potencijala OIE na lokaciji, a pritom ostvariti neutralno ili pogodno djelovanje na uravnoteženost EES-a. Unutar industrijske zone moguće je izgraditi različita postrojenja OIE. Potrebno je omogućiti međusobno povezivanje svih potrošača i proizvođača unutar industrijske zone. Povezivanjem bi se ostvarila mogućnost međusobnog dijeljenja vlastitih viškova proizvodnje električne energije, čime bi se uklonila postavljena ograničenja za izgradnju fotonaponskih panela. Viškove proizvodnje koji se ne mogu koristiti unutar zone potrebno je adekvatno akumulirati u baterijske, toplinske ili druge spremnike, a eventualno preostali višak predati u mrežu.

U takvom sustavu ostaje pitanje raspodjela energetske troškova i/ili prihoda unutar industrijske zone. Jedna mogućnost je da sustavom unutar zone upravlja treća strana (agregator) koja sklapa ugovore sa svim korisnicima zone i s operatorom prijenosa i/ili distribucije. Agregator se brine za iskorištavanje maksimalnog potencijala svih resursa industrijske zone. Druga mogućnost je udruživanje dionika zone u energetske zajednice koje implementiranjem naprednih sustava lokalnog trgovanja mogu samostalno obavljati trgovanje električnom energijom međusobno i s mrežom. Takvi sustavi mogu biti upravljani većinom automatski, pa neće predstavljati velik problem za korisnike zone. Cijena električne energije u takvim sustavima definira se u realnom vremenu. Time bi uz decentralizaciju elektroenergetskog sustava došlo i do njegove demokratizacije, a ostvarilo bi se pogodno djelovanje na regulaciju sustava.

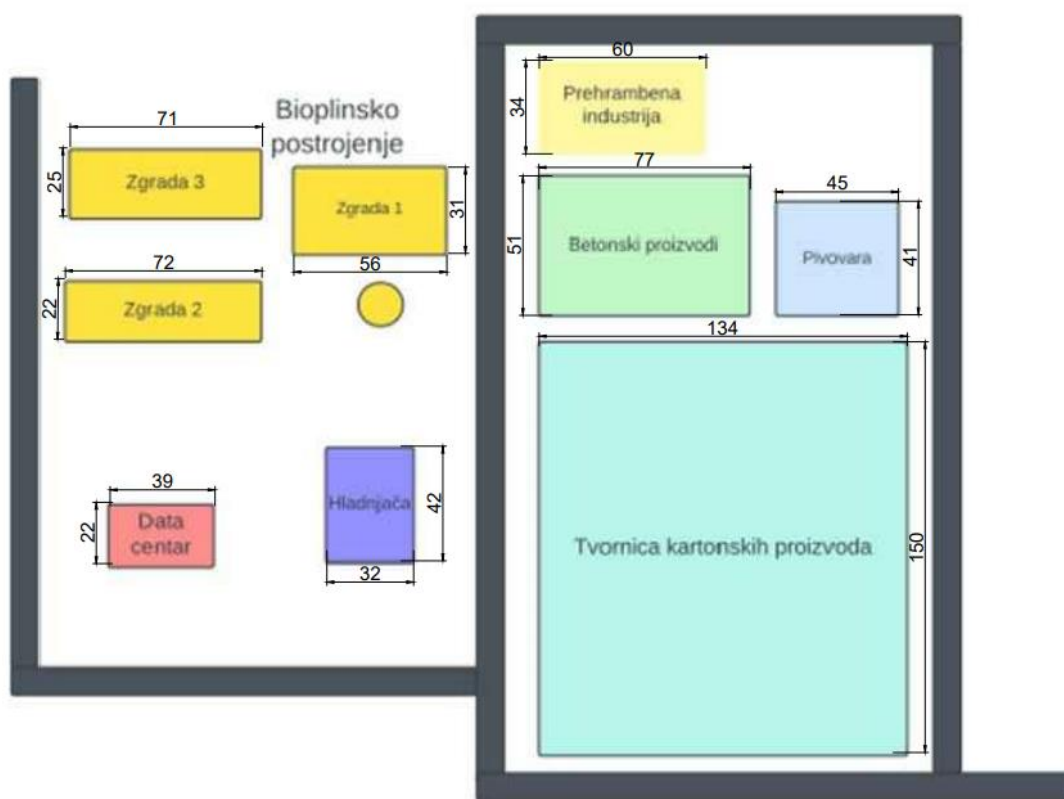
Na osnovu prethodnih principa omogućio bi se povremeni otočni rad industrijske zone, u vremenu kad ima dovoljno energije. Duljina djelovanja u otočnom radu ovisi o veličini spremnika i dostupnosti OIE. U vremenu kad energija iz OIE nije dostupna može se koristiti akumulirana energija i energije iz mreže. Zbog tržišta svedenog na realno vrijeme, energetske tokovi bi se poklapali s finansijskim tokovima, a time bi se i omogućila najpovoljnija raspodjela energije za energetske sustav.

Projekti koji počivaju na sličnim načelima u svijetu već postoje. Jedan od njih je i projekt INZELL napravljen u Njemačkoj u industrijskoj zoni Max Bögl. Projekt je to koji omogućuje optimalno vođenje različitih proizvodnih postrojenja OIE, energetske spremnika i vršnih opterećenja. Cilj projekta je uspostaviti sustav upravljanja fleksibilnom opskrbom energije koji će biti dugoročno održiv, a rezultati projekta moći će se koristiti za postavljanje sustava drugih zona [23].

## 4 INDUSTRIJSKA ZONA

### 4.1 Opis industrijske zone

Predmetna industrijska zona nalazi se na području južne Hrvatske, a obuhvaća površinu od oko 50 ha. Unutar industrijske zone trenutno se nalaze pogoni prehrambena prerađivačke industrije, hladnjača i pivovara, a planirana je i izgradnja tvornice kartonske ambalaže tvornice betonskih proizvoda te *data* centar. U industrijskoj zoni u tijeku je i izgradnja bioplinskog postrojenja. Približni raspored industrijske zone prikazuje slika 15.

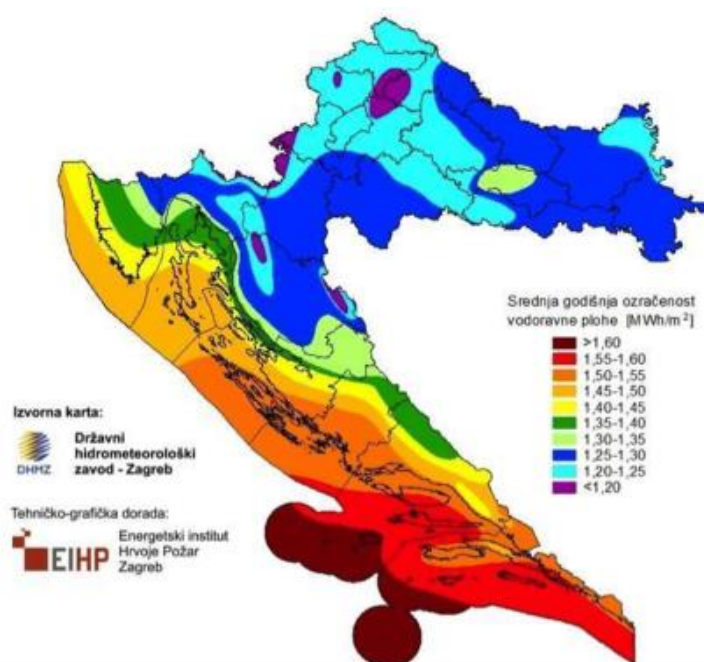


Slika 15 Približni raspored industrijske zone

Svako postrojenje industrijske zone zahtjeva energiju pa su tako unutar zone istaknute potrebe za električnom, toplinskom i rashladnom energijom. Svi korisnici zone ne trebaju sve oblike energije niti ih trebaju istovremeno, zato je potrebno pronaći adekvatan način iskorištavanja potencijala obnovljivih izvora energije unutar zone. Kako bi se moglo izraditi mogući model upravljanja energetske opskrbom zone, u slijedećim poglavljima bit će prikazani potencijali OIE i profili potrošnje energije svih korisnika industrijske zone.

## 4.2 Potencijali izgradnje postrojenja OIE

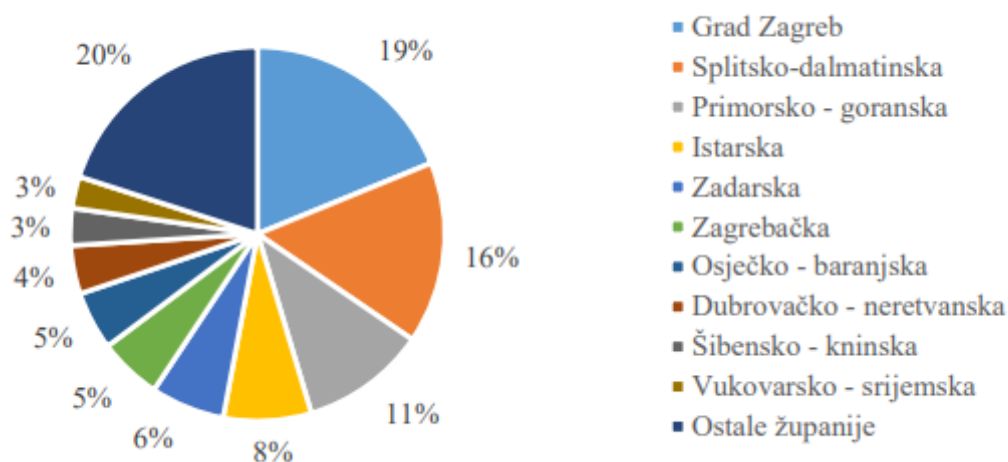
S obzirom na smještaj industrijske zone u južnoj Hrvatskoj postoji značajan potencijal za iskorištavanje fotonaponskog sustava. Prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ-a) [24] na području kopnenog područja južne Hrvatske srednja dnevna osunčanost vodoravne plohe iznosi između 1,35 i 1,45 kWh/m<sup>2</sup> (prikazuje slika 16), što ukazuje na visok tehnički potencijal proizvodnje.



Slika 16 Srednja dnevna ukupna osunčanost vodoravne plohe [24]

Prema podacima iz *Izvjешća o komunalnom otpadu za 2019. godinu* [25] zbog značajnog udjela komunalnog otpada iz turizma u južnoj Hrvatskoj nastane više otpada po glavi stanovnika nego u ostatku Republike Hrvatske (podaci su uzeti za 2019. godinu zbog utjecaja pandemije COVID-19 na turizam, samim time i na količinu proizvedenog otpada u južnoj Hrvatskoj). U okviru javne usluge u četiri županije južne Hrvatske sakupljeno je 29% komunalnog otpada, dok je samo u Splitsko-dalmatinskoj županiji sakupljeno 16% komunalnog otpada Republike Hrvatske (prikazuje slika 17). Plan za gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje od 2023. – 2028. g još nije donesen, međutim, s obzirom na planove Europske Unije i poticanje kružnog gospodarstva izvjesno je da će se udio razdvojenog komunalnog otpada morati povećati. *Prema Rješenju za Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023.-2028.*, količina komunalnog otpada koje će se odlagati na odlagališta može biti najviše 10% mase ukupno

proizvedenog komunalnog otpada, do 2035. godine [26]. Udio biootpada u miješanom komunalnom otpadu 2012. iznosio je 37,06% i značajno se ne mijenja [25]. Obzirom na opisano stanje i nedostatak rješenja aktualne situacije s otpadom, predmetna gospodarska zona ima povoljan položaj za izgradnju bioplinskog postrojenja.



Slika 17 Udjeli pojedinih Županija u ukupno sakupljenom komunalnom otpadu u organizaciji JLS [25]

Potencijali lokacije predmetne industrijske zone usmjerili su njenu zelenu tranziciju u smjeru izgradnje fotonaponskih elektrana i bioplinskog postrojenja koje bi kao sirovinu koristilo komunalni otpad.

## 5 PROFILI POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Određivanje profila opskrbe industrijske zone energijom započinje analizom energetskih potreba potrošača. Analizira se potreba za električnom, toplinskom i rashladnom energijom.

Podaci o potrošnji energije nisu poznati pa je njihove potrošnje potrebno pretpostaviti ili izračunati. Pretpostavke se uzimaju na temelju sličnih slučajeva za koje su podaci dostupni. Na osnovu pretpostavljenih ili izračunatih podataka izrađuju se dnevni profili relativnog opterećenja. Relativno opterećenje zadano je izrazom:

$$f_{s,h} = \frac{P_{s,h}}{P_{\max,s,h,m}}$$

Navedene oznake predstavljaju:

- $f_{s,h}$  - faktor opterećenja,
- $P_{s,h}$  - prosječno satno opterećenje,  $W(h)$ ,
- $P_{\max,s,h,m}$  - maksimalno, prosječno, mjesečno, satno opterećenje,  $W(h)$ .

Prosječno satno prosječno opterećenje, odnosno prosječna snaga ( $W$ ) tijekom sata rada postrojenja ekvivalentna je utrošenoj energiji tijekom jednog sata rada postrojenja ( $Wh$ ). Stvarno trenutno opterećenje postrojenja može biti nekoliko puta veće ili manje u ovisnosti o načinu i vrsti rada strojeva i trošila unutar pogona [27].

Pretpostavljeno je da svaki radni dan ima jednak tijek opterećenja. Opterećenja radnih dana pridružuju se opterećenjima neradnih dana iz čega se dobije raspored relativnog tjednog opterećenja. Daljnjim pridruživanjem dobije se raspored relativnog mjesečnog opterećenja.

Prosječno satno opterećenje, odnosno utrošena energija tijekom jednog sata dobiva se množenjem faktora opterećenja i maksimalnog prosječnog mjesečnog satnog opterećenja. Budući da maksimalno prosječno mjesečno satno opterećenje nije poznato, ono se računa kao omjer mjesečne potrošene energije i zbroja faktora opterećenja tijekom jednog mjeseca. Prikazan je izraz za izračun maksimalnog prosječnog satnog opterećenja:

$$P_{\max,s,h,m} = E_m \cdot \sum_1^{n_{hm}} f_{s,h}$$



Navedene oznake u prethodnoj jednadžbi predstavljaju:

- $E_m$  - energija potrošena tijekom mjeseca,  $kWh$ ,  
 $n_{hm}$  - broj sati u mjesecu.

Nakon što se izračuna  $P_{\max,s,h,m}$  svi podaci o potrošnji postrojenja su poznati. Postupak proračuna podataka može mijenjati redoslijed u ovisnosti o tome koji podaci su dostupni.

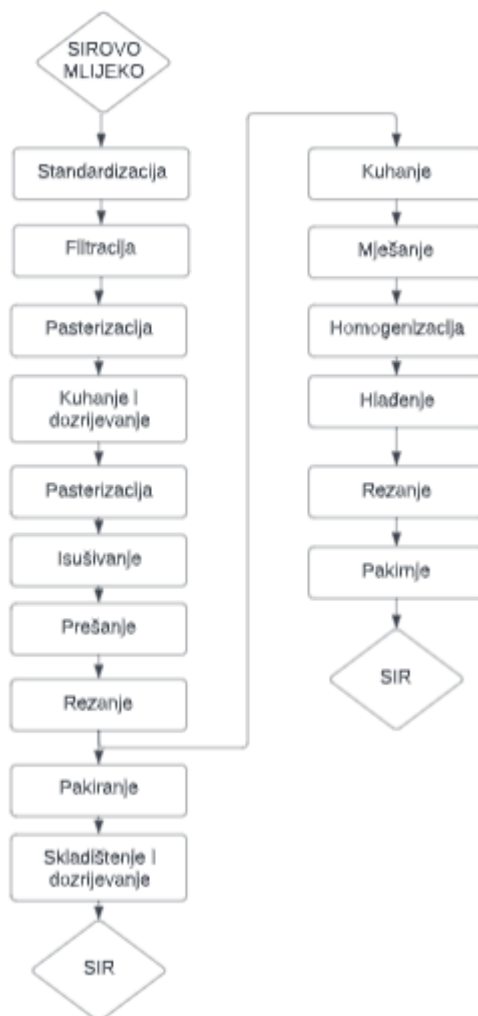
Podaci o energetskej potrošnji postrojenja jednostavno se mogu zbrojiti u istim satima tijekom godine čime se dobiva energetska potrošnja industrijske zone. Može se reći da se integracijom krivlje prosječnog satnog opterećenja dobiva apsolutna potrošnja energije.

U prilogu A nalaze se podaci o relativnim električnim, toplinskim i rashladnim opterećenjima na dnevnoj i tjednoj bazi. Profil potrošnje dobiven na osnovi prethodnih relativnih opterećenja prikazan je na tjednoj bazi za jedan tjedan u zimskom i za jedan tjedan u ljetnom periodu. Tjedan u zimskom periodu predstavlja tjedan u mjesecu veljači, a tjedan u ljetnom periodu predstavlja tjedan u mjesecu srpnju.

Podaci o karakteristikama industrijskih postrojenja i podaci o njihovim mjesečnim i godišnjim energetskim potrebama prikazani su u sljedećim poglavljima.

## 5.1 Prehrambena industrija

U okviru gospodarske zone koja se proučava u ovom diplomskom radu pretpostavljen je pogon proizvodnje sira. Proces proizvodnje sira zahtjeva veliki broj koraka kojima se dolazi od sirovog mlijeka do konačnog proizvoda, sira. Dijagram toka proizvodnje sira prema [28] prikazan je na slici 18.



Slika 18 Dijagram toka proizvodnje sira

Na dijagramu toka proizvodnje sira može se uočiti da je u procesu proizvodnje potrebna električna energija za pogon svih strojeva i opreme kao i toplinska i rashladna energija za održavanje tehnologijom propisanih procesnih uvjeta.

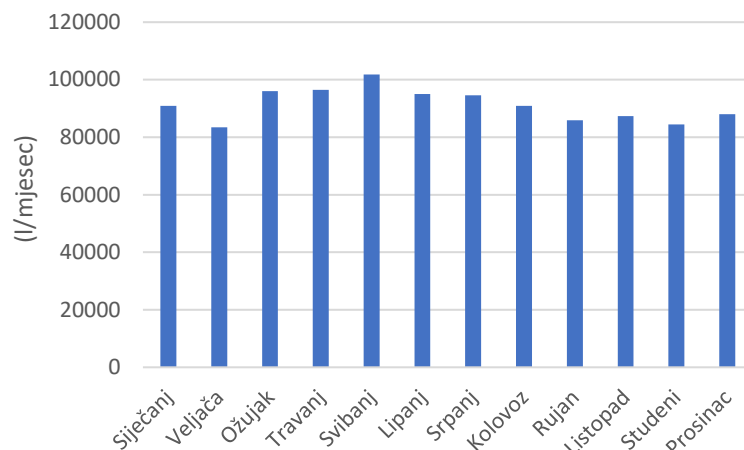
Prema energetsom vodiču [28] sastavljena je tablica 1 u kojoj je prikazana potrebna energija za proizvodnju sira. Energija je izražena u kWh po kilogramu proizvedenog sira. Potreba za rashladnom energijom u vodiču opisana je preko električne energije. Kako bi se dobila rashladna energija, električnu energiju za rashlađivanje uvećava se za onoliko puta koliki je COP rashladnog uređaja. Pretpostavljeni COP rashladnog uređaja je četiri.

Tablica 1 Potrebna energija u proizvodnji sira

Proces	Energetska potreba (kWh/kg)		
	Toplinska energija	Rashladna energija	Električna energija
<b>Kuhanje, pasterizacija</b>	0,060		
<b>Završni kotao</b>	0,005		
<b>Radni kotao</b>	0,115		
<b>Početni medij</b>	0,004		
<b>Pasterizacija</b>	0,047		
<b>Motori, pumpe</b>		0,437	0,419
<b>Ukupno</b>	0,23	0,437	0,42

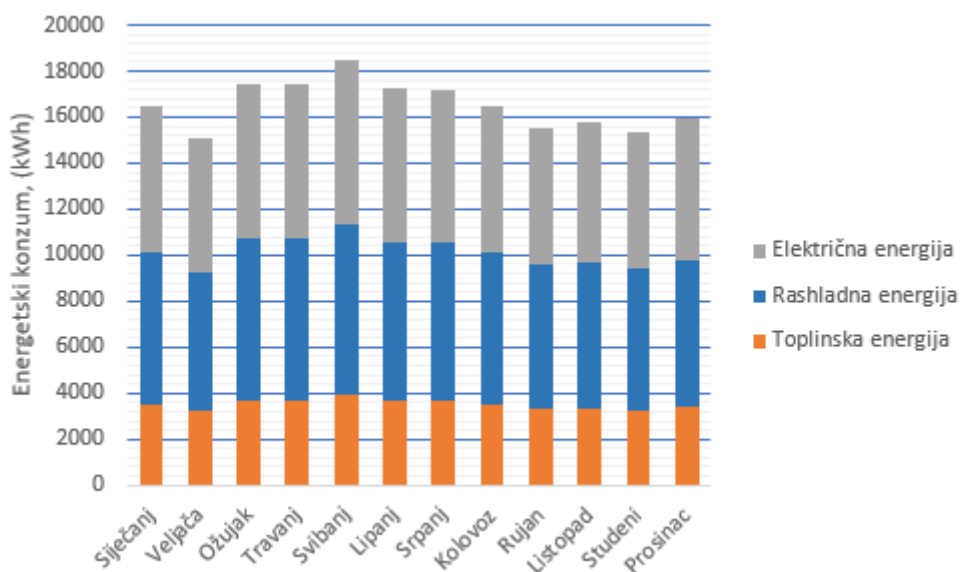
Pretpostavljena prosječna dnevna isporuka mlijeka u industrijski pogon iznosi 4000 litara, a za proizvodnju kilograma sira u prosjeku je potrebno 8 litara mlijeka. Iz tih podataka jednostavnim računom se dolazi do godišnje proizvodnje sira od 182,5 t.

Na potrošnju energije u pogonima za proizvodnju sira utječe količina isporučenog mlijeka. Što je veća isporuka mlijeka, veći je obim posla, pa je time i veći energetska potrošnja. S obzirom da proizvodnja mlijeka ima sezonska obilježja i isporuka mlijeka ima sezonska obilježja. Potrošnja energije je proporcionalna isporuci mlijeka. Prema podacima iz [29] sastavljen je dijagram koji prikazuje mjesečne isporuke mlijeka u industrijski pogon. Dijagram mjesečne isporuke mlijeka u industrijski pogon prikazan je slikom 19.



Slika 19 Mjesečna isporuka mlijeka u mljekaru

Preračunavanjem isporučene količine mlijeka u proizvodnju sira, uz pomoć tablice 1, može se dobiti i sezonska energetska potreba pri proizvodnji sira. Ostali podaci o potrošnji energije nalaze se u prilogu A. Sezonska energetska potreba u prehrambenoj industriji prikazana je slikom 20.



Slika 20 Sezonski profil potrebe za energijom

## 5.2 Hladnjača

Hladnjača je građevina koja služi za održavanje niskih temperatura poljoprivrednih i ostalih dobara. U okviru postojeće industrijske zone hladnjača je namijenjena za održavanje svježine voća i povrća. U ovisnosti o vrsti proizvoda koji se nalazi u hladnjači, zahtijevane temperature mogu biti različite. Hladnjače su obično podijeljene na komore u kojima vladaju različita stanja zraka (temperatura i vlažnost). Hlađenje se najčešće izvodi uz pomoć dizalica topline, a moguće je i napraviti izvedbu s apsorpcijskim hladnjakom.

Budući da nisu dostupne stvarne brojke karakterističnih veličina koje opisuju hladnjaču, uvijete u hladnjači potrebno je pretpostaviti. Da bi se dobila potrebna rashladna energija provodi se pojednostavljeni proračun.

### 5.2.1 Proračun rashladne energije

Proračun hladnjače provodi se prema uputama za dimenzioniranje rashladne komore preuzetih sa mrežne stranice [30]. Da bi se dobila potrebna rashladna energija treba izračunati toplinske dobitke komore. Toplinski dobici mogu nastati uslijed transmisije, infiltracije, unošenja mase toplog povrća, voća i mesa u komoru i rada strojeva i ljudi. Podatke o temperaturama okoliša i drugim veličinama potrebnim za proračun hladnjače uzima se prema [31], [32], [33]. Pretpostavljeno je da se u hladnjači nalaze jabuke. Temperatura hladnjače za taj proizvod iznosi +2°C, a podatak se uzima prema [34]. Dimenzije hladnjače se pretpostavljaju, a one iznose: dužina 40 m, širina 30 m, visina 5m.

Koristeći navedene upute proračun se provodi u programu *MS Excel*.

- **Transmisija i infiltracija**

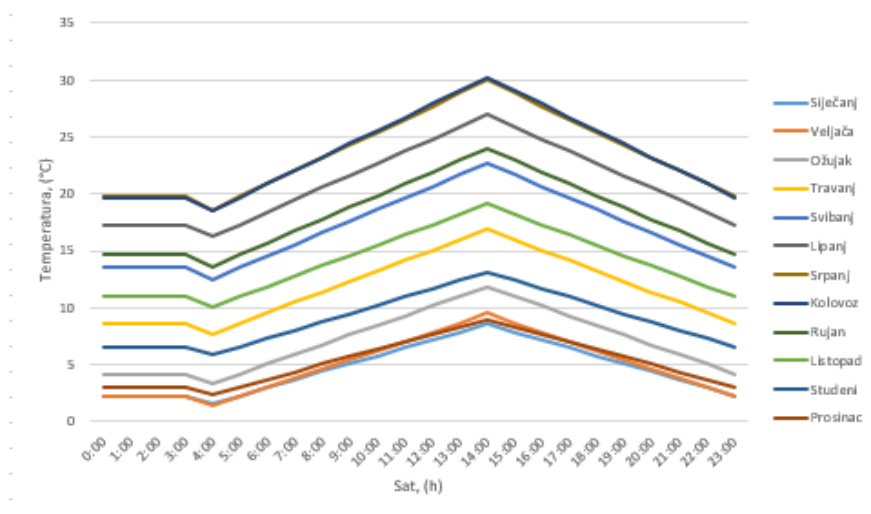
Toplinski dobici hladnjače koji nastaju uslijed ulaska topline preko vanjske stijenke građevine nazivaju se transmisijski dobici, a dobici nastali uslijed ulaska topline putem mase zraka u prostor hladnjače nazivaju se infiltracijski dobici. Proračun dobitaka topline uslijed transmisije i infiltracije provodi se na satnoj razini, a zatim se izračunava i na dnevnoj, mjesečnoj i godišnjoj razini. Prvi pribrojnik proračuna prikazanog ispod odnosi se na toplinske dobitke prema podu, drugi pribrojnik odnosi se na toplinske dobitke prema vanjskom zraku, treći pribrojnik odnosi se na satnu infiltraciju:

$$Q_{ti,s} = U_p \cdot A_p \cdot \frac{T_{vp} - T_u}{1000} + U_z \cdot A_z \cdot \frac{T_v - T_u}{1000} + n \cdot V \cdot c\rho \cdot \frac{T_v - T_u}{3600 \cdot 24}$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

$Q_{ti,s}$	- toplinski dobici uslijed transmisije i infiltracije na satnoj razini,	$\frac{kWh}{h}$ ,
$U_p$	- koeficijent prolaza topline poda,	$\frac{W}{m^2K}$ ,
$A_p$	- površina poda,	$m^2$ ,
$T_{vp}$	- temperatura zemlje,	$^{\circ}C$ ,
$T_u$	- temperatura unutar hladnjače,	$^{\circ}C$ ,
$U_z$	- koeficijent prolaza topline zidova i stropa,	$\frac{W}{m^2K}$ ,
$A_z$	- površina zidova i stropa,	$m^2$ ,
$T_v$	- vanjska temperatura u ciljanom satu,	$^{\circ}C$ ,
$n$	- broj izmjena zraka u prostoriji,	
$V$	- volumen hladnjače,	$m^3$ ,
$c\rho$	- umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće vlažnog zraka	$\frac{kJ}{m^3K}$ ,

Temperatura okoliša na satnoj razini rekonstruirana je iz prosječne dnevne temperature i prosječne dnevne amplitude za svaki mjesec. Pretpostavljeno je da se najviša dnevna temperatura mjeri u 14:00, a najniža temperatura u 4:00. Temperatura između 23:00 i 4:00 uzima se kao konstantna temperatura i jednaka je temperaturi u 23:00 do koje se došlo linearnom interpolacijom između najviše i najniže temperature. Temperature za svaki pojedini mjesec prikazane su dijagramom na slici 21.



Slika 21 Dnevni raspored temperature

- **Unos proizvoda**

Usljed unosa voća i povrća dolazi do povećanja temperature u hladnjači. Proizvodi se prije unosa ostavljaju u prostorijama koje nisu direktno hladene pa uneseni proizvodi imaju nešto nižu temperaturu od temperature okoliša. Toplinski dobici uslijed unosa proizvoda računaju se iz sljedećeg izraza:

$$Q_{up} = m_{ju} \cdot c_p \cdot \frac{(T_u - T_s)}{3600}$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

$Q_{up}$	- toplinski dobici uslijed unosa proizvoda u hladnjaču na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$m_{ju}$	- masa unosa jabuka,	kg
$c_p$	- specifični toplinski kapacitet jabuke,	$\frac{kJ}{kgK}$
$T_j$	- temperatura ulaza jabuka,	°C.

Toplina koju ju je potrebno odvesti uslijed ove vrste procesa pojavljuje se najviše u ljetnom dijelu godine kada plodovi dozrijevaju.

### • Respiracija proizvoda

Respiracija je biološki proces kojim biljke i namirnice životinjskog porijekla uzimaju kisik, a stvaraju ugljikov dioksid vodu i toplinu. Respiracija je kontinuiran proces pa se potrebno pobrinuti da se sva nastala toplina odvodi tijekom cijelog procesa. Da bi se moglo odrediti iznos te topline potrebno je poznavati zapremninu hladnjače. Budući da ona nije poznata pretpostavljeno je da zapremnina iznosi 1400 tona. Toplinski dobici uslijed respiracije računaju se iz sljedećeg izraza:

$$Q_{rp} = m_j \cdot \frac{resp}{3600}$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

$Q_{rp}$	- toplinski dobici uslijed respiracije na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$m_j$	- masena zapremnina jabuka,	$kg$ ,
$resp$	- energija respiracije,	$\frac{kJ}{kg}$ .

### • Unutarnje opterećenje

Pod unutarnje opterećenje hladnjače uračunat je rad ljudi u postrojenju, rad ventilatora u postrojenju, proces odmrzavanja (eng. *defrost*) te rad rasvjete. Pretpostavljeno je da u postrojenju radi osam ljudi u jednoj smjeni, postoji 30 ventilatora snage 300W, proces odmrzavanja odvija se tri puta dnevno po pola sata uz snagu od 12kW i učinkovitost 50%, u hladnjači postoji 48 rasvjetnih tijela snage 100W. Proces odmrzavanja podrazumijeva grijanje ovojnice izmjenjivača topline kako bi se uklonilo inje i led. Odmrzavanjem se održava učinkovitost izmjenjivača. Unutarnje opterećenje na dnevnoj bazi računa se iz sljedećeg izraza:

$$Q_u = n_{lj} \cdot t_r \cdot \frac{P_{\check{c}}}{1000} + n_v \cdot t_v \cdot \frac{P_v}{1000} + P_d \cdot t_d \cdot n_c \cdot \eta + n_l \cdot t_l \cdot \frac{P_L}{1000}$$

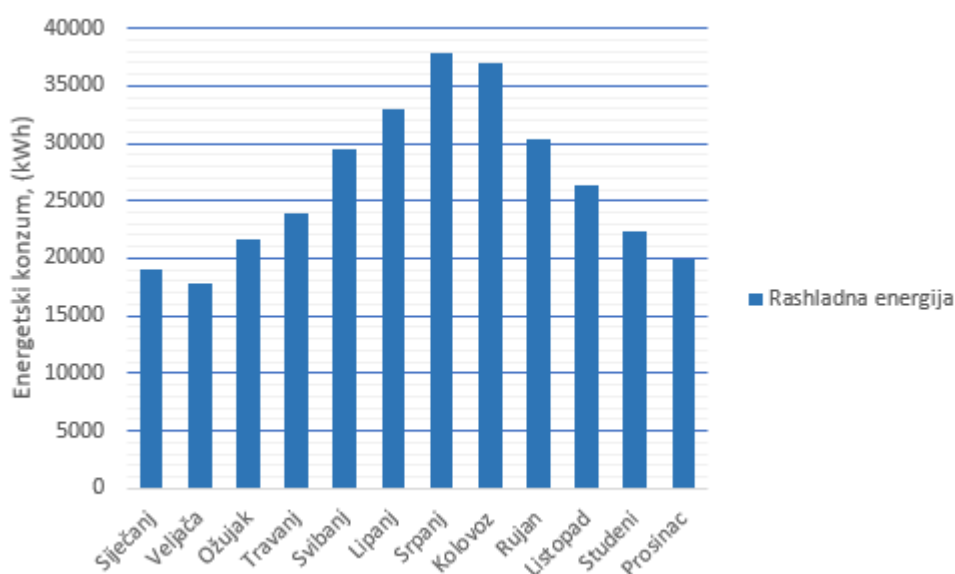
U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

$Q_u$	- toplinski dobici od unutarnjeg opterećenja na dnevnoj razini,	$\frac{kWh}{dan}$ ,
$n_{lj}$	- broj ljudi koji boravi u hladnjači,	

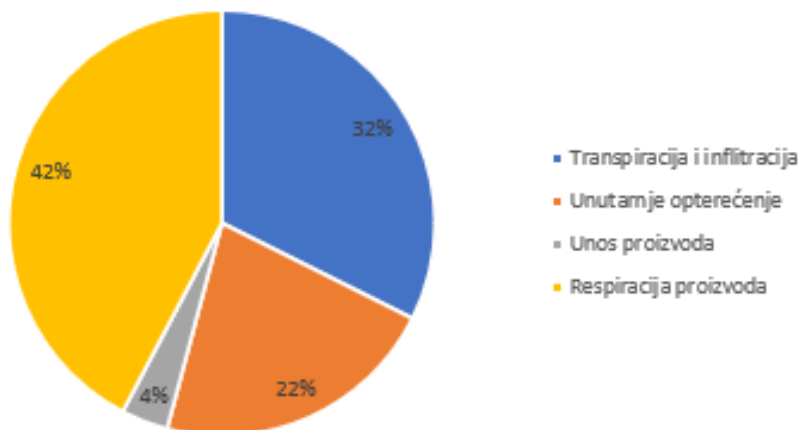


$t_r$	- radno vrijeme,	$h$ ,
$P_{\dot{c}}$	- toplinski tok kojeg odaje čovjek,	$W$ ,
$n_v$	- broj ventilatora,	
$t_v$	- vrijeme rada ventilatora,	$h$ ,
$P_v$	- snaga ventilatora,	$W$ ,
$P_d$	- snaga odleđivanja,	$W$ ,
$t_d$	- vrijeme trajanja odleđivanja,	$h$ ,
$n_c$	- broj ciklusa odleđivanja,	
$\eta$	- učinkovitost odleđivanja,	
$n_l$	- broj rasvjetnih tijela,	
$t_l$	- vrijeme rada rasvjetnih tijela,	$h$ ,
$P_L$	- snaga rasvjetnih tijela,	$W$ .

Nakon provedenog proračuna izračunata je sezonska potreba za rashladnom energijom i razdioba dobitaka topline u hladnjači. Sezonska potreba za rashladnom energijom prikazana je na slici 22, a razdioba dobitaka topline u hladnjači prikazana je na slici 23. Ostali podaci o potrošnji nalaze se u prilogu A.



Slika 22 Sezonski profil potrebe za rashladnom energijom u hladnjači



Slika 23 Razdioba rashladne energije u hladnjači

### 5.3 Pivovara

U prostoru industrijske zone predviđena je izgradnja pivovare. Na temelju podataka o proizvodnji piva unutar malih pivovara, obično nazivanih *craft* pivovarama, određena je godišnja proizvodnja piva. Unutar predmetne pivovare proizvede se 500.000 litara godišnje. Da bi se odredili oblici energije koji su potrebni u pivovari potrebno je poznavati postupak proizvodnje piva. Postupak proizvodnje piva prikazan je slikom 24.



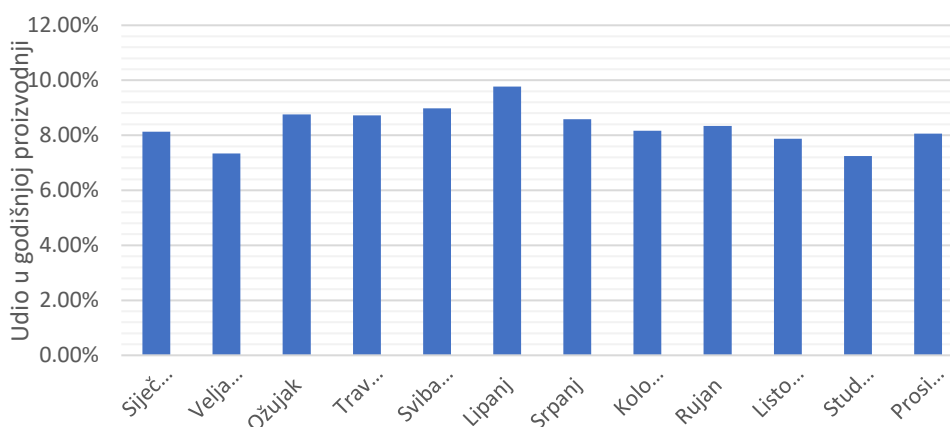
Slika 24 Postupak proizvodnje piva [35]

Na prikazanoj slici uočava se da je za postupak proizvodnje piva potrebna električna, toplinska i rashladna energija. Podaci o potrebnoj energiji za proizvodnju piva uzimaju se prema [36], gdje je potrebna energija prikazana za proizvodnju količine 800 litara piva. Podatke se prilagodilo potrebama proračuna pa su oni u tablici 2 prikazani za proizvodnju jedne litre piva, u kWh.

Tablica 2 Raspodjela energije u pivnici

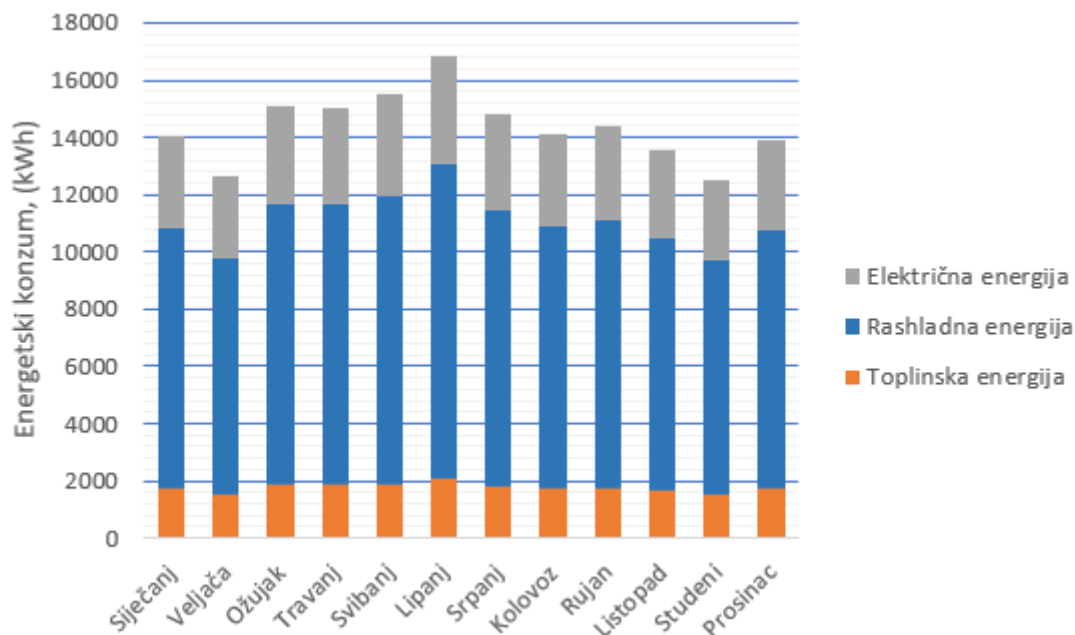
Zagrijavanje vode	0,104	Toplinska energija
Mljevenje	0,032	Toplinska energija
Kuhanje	0,075	Toplinska energija
Hlađenje	0,002	Rashladna energija
Fermentacija	0,040	Rashladna energija
Pakiranje	0,014	Rashladna energija

Potrebna električna energija iznosi 65% od zbroja rashladne i električne energije pa se preračunavanjem može doći do apsolutnog iznosa električne energije [37]. Prema dostupnim podacima o proizvodnji piva [38], uočava se sezonska karakteristika proizvodnje. Mjesečnu razdiobu proizvodnje piva prikazuje slika 25.



Slika 25 Mjesečna razdioba proizvodnje piva

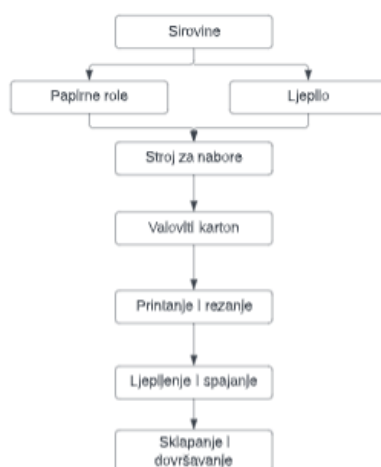
Uzimanjem u obzir svih navedenih podataka dobivaju se podaci o potrebnoj energiji za pogon pivovare. Podatke o potrošnji tijekom godine prikazuje dijagram na slici 26, a ostali podaci o potrošnji nalaze se u prilogu A.



Slika 26 Sezonski profil potrebe za energijom u pivovari

#### 5.4 Kartonska ambalaža

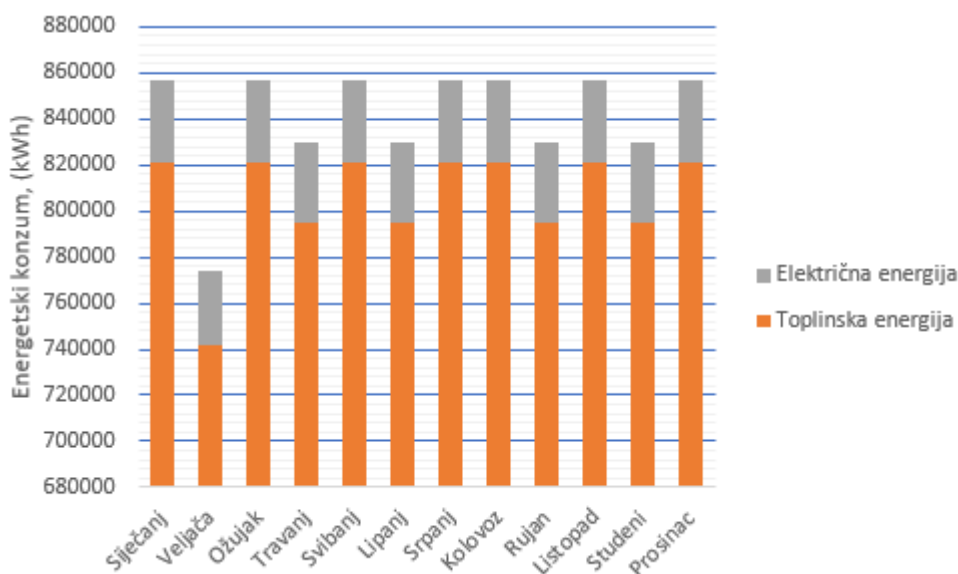
Predviđena tvornica kartonske ambalaže smještena u zoni proizvodi valoviti karton od gotovog papira koji se dovozi na lokaciju. U procesu proizvodnje kartona potrebna je električna energija koja pogoni sve potrebne strojeve kao što su: transportni valjci i trake, strojevi za automatsko lijepljenje, bubanj stroja za namotavanje, valjci za prešanje i drugi strojevi. Osim električne energije potrebna je i toplinska energija koja služi za proizvodnju pare potrebne u procesu lijepljenja i ovlaživanja papira. Postupak proizvodnje kartona prikazan je dijagramom na slici 27.



Slika 27 Blok dijagram proizvodnje kartona

Prema postojećim tvornicama kartona pretpostavljena je tvornica koja se prostire na 20.000 m<sup>2</sup> s godišnjim kapacitetom proizvodnje kartona od 30.000 t godišnje. U razgovoru sa zaposlenicom kineske tvrtke Yugong Machinery (3. studenog 2022., zaposlenica Beryl) za tvornicu kapaciteta 30.000 t godišnje došlo se do podataka o godišnjoj potrebi za električnom energijom i o potrebnoj količini pare. Yugong Machinery je tvrtka specijalizirana za proizvodne strojeve kartonske ambalaže.

Za pogon opreme tvornice kartonske ambalaže potrebno je 420.000 kWh električne energije godišnje i 12.600.000 kg pare godišnje. Iz podataka o potrebnoj količini pare može se dobiti potrebna količina toplinske energije. Pretpostavlja se da procesi zahtijevaju suhozasićenu paru stanja 7 bara. Specifična entalpija isparavanja pare u tom stanju iznosi 2.763kJ/kg. Preračunavanjem je dobiveno da je za potrebnu količinu pare potrebno dovesti 9.670 MWh godišnje. Temperatura zasićenja pri 7 bara iznosi 165°C. Tvornica kartonske ambalaže radi kontinuirano tijekom 24 sata, u tri smjene, sa stankom za pregled ispravnosti rada strojeva. Podaci o potrebi za električnom i toplinskom energijom tijekom svih 12 mjeseci prikazani su dijagramom na slici 28. Svi ostali podaci o potrošnji nalaze se u prilogu A.

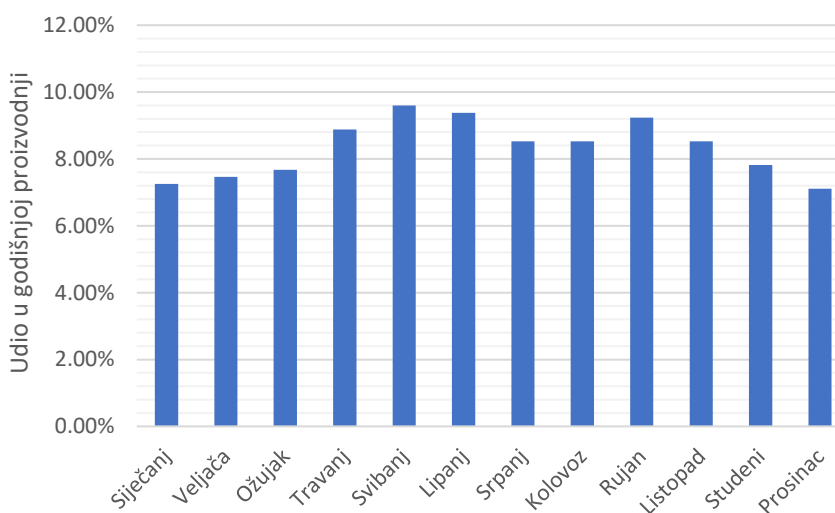


Slika 28 Sezonski profil energetske potrebe pogona kartonske industrije

## 5.5 Betonski proizvodi

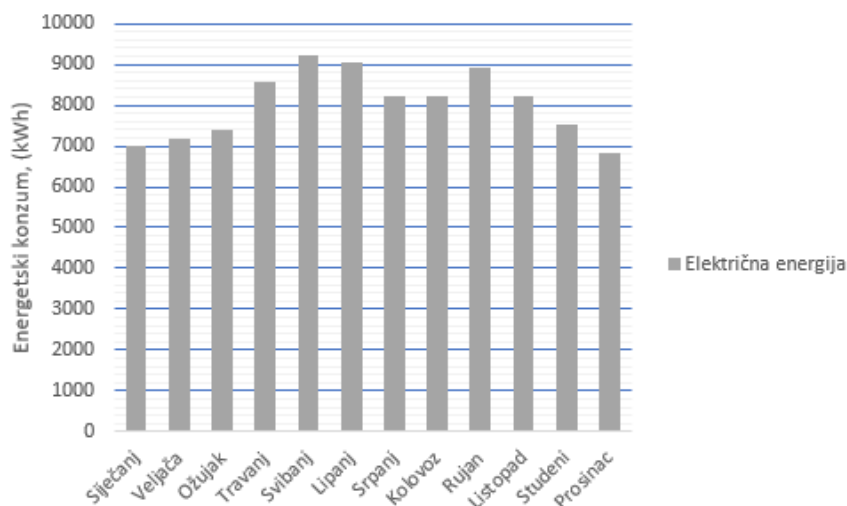
Tvornica betonskih proizvoda industrijske zone bavi se proizvodnjom betonskih zidova, ograda, cvjetnjaka, rubnjaka, blokova za popločavanje, komunalne opreme, itd. Za proizvodnju betonskih proizvoda koriste se postupci miješanja cementa s pijeskom i vodom. U postupcima proizvodnje koristi se isključivo električna energija koja je potrebna za pogon različite opreme. Električna energija koristi se za strojeve potrebne za utovar i istovar materijala, za skladištenje materijala, za transport materijala unutar postrojenja, za miješanje materijala i ostalu opremu. Prema dostupnim podacima, za proizvodnju jednog kubnog metra betonskog proizvoda, potrebno je prosječno 3,21 kWh električne energije [39].

Za predmetnu tvornicu betonskih proizvoda pretpostavljena je godišnja proizvodnja od 80.000 m<sup>3</sup> betona. Intenzitet radova koji uključuju betonske proizvode često je vezan uz vremenske prilike. Za očekivati je da će najmanji opseg proizvodnje biti unutar zimskih mjeseci. Pretpostavljena sezonska karakteristika proizvodnje betonskih proizvoda prikazana je dijagramom na slici 29.



Slika 29 Udio u godišnjoj proizvodnji betona

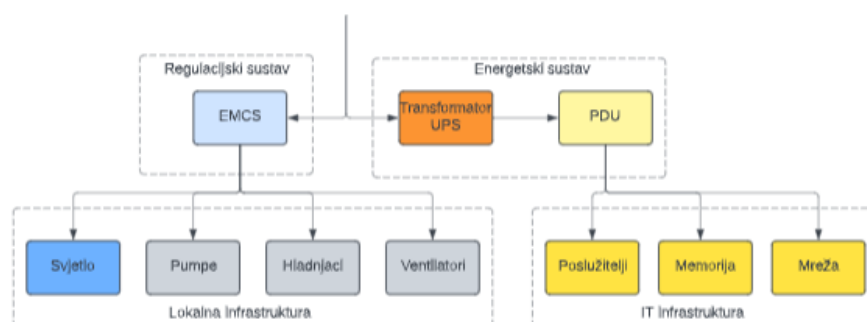
Jednostavnim računom iz prethodnih podataka može se dobiti profil godišnje potrošnje tvornice betonskih proizvoda. Dijagramom na slici 30 prikazane su potrebe za električnom energijom tijekom svih 12 mjeseci. Ostali podaci o potrebnoj energiji nalaze se u prilogu A.



Slika 30 Godišnja potreba za električnom energijom u tvornici betonskih proizvoda

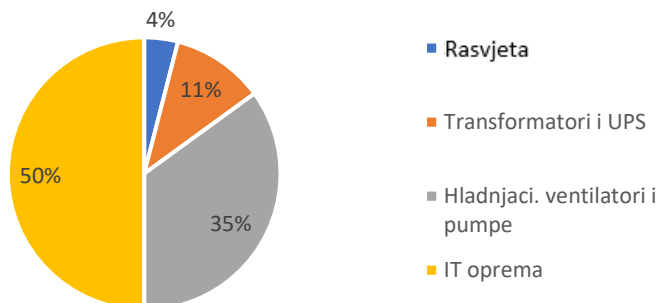
## 5.6 Data centar

U industrijskoj zoni osim navedenih tradicionalnih industrija predviđeno je i postavljanje podatkovnog centra, češće zvanog *data centar*. Podatkovni centri mogu biti definirani kao skup uređaja poslužitelja, pohrane i mrežnih uređaja, u prostoru namijenjenom prvenstveno za smještaj potrebne opreme. *Data* centri uz navedenu opremu mogu imati i urede korištene za upravljanje podatkovnim centrom. Ovisno o udjelu potrošnje energije mogu se svrstati u dvije kategorije, *data* centri jedinstvene namjene i *data* centri mješovite namjene. U skupinu onih za mješovitu namjenu spadaju centri koji imaju veći udio potrošnje energije za rad ureda. Elementi centra mogu se podijeliti na dvije skupine: elementi informacijske (IT) infrastrukture i elementi infrastrukture lokacije. IT infrastruktura podrazumijeva poslužitelje (servere), pohranu (memoriju) i mrežnu (*network*) opremu. Lokacijska infrastruktura podrazumijeva sustave opskrbe energijom, ventilacijske sustave, i druge sustave podrške IT-u. Za oba elementa infrastrukture potrebno je osigurati opskrbu energijom, prikazuje slika 31.



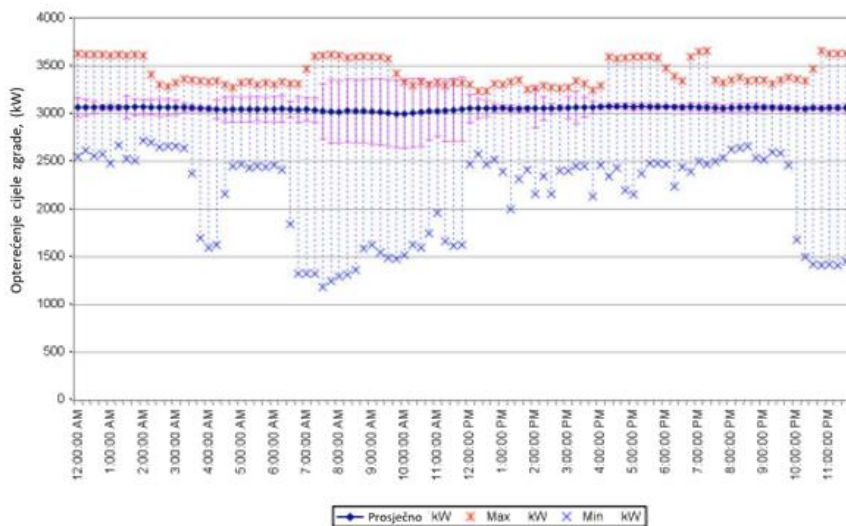
Slika 31 Slijed energetske opskrbe data centra

Potrošnja energije raspodijeljena, je od prilike, u omjeru 1:1 između energije potrebne za pogon infrastrukture lokacije i energije potrebne za IT infrastrukturu [40].



Slika 32 Razdioba energetske potrebe u data centru

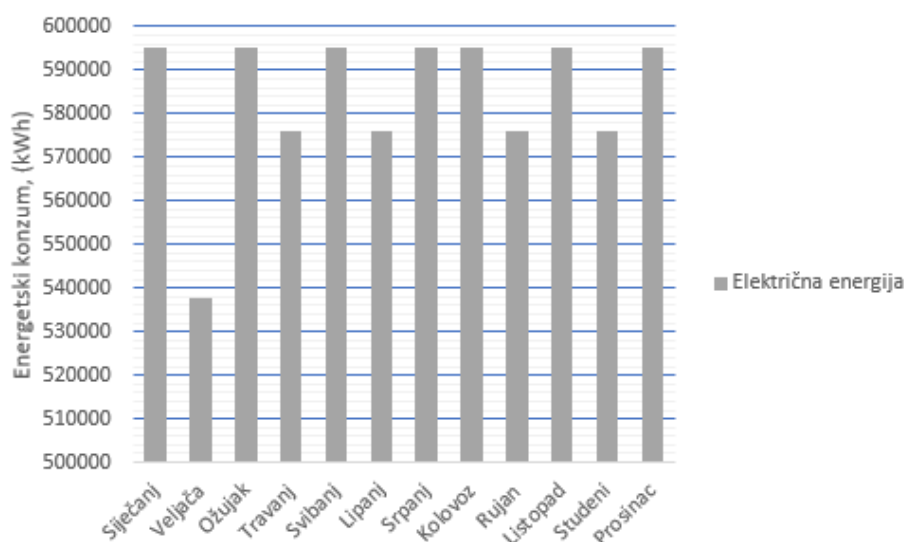
Data centri mješovite namjene raspored dnevnog opterećenja imaju sličan kao raspored opterećenja uredske zgrade. Povećano opterećenje očituje se u vrijeme radnog vremena. Data centri jedinstvene upotrebe imaju uglavnom jednoliko opterećenje. Prosječna opterećenja tijekom dana i godine su jednolika, a potrošnja energije ne korelira bitno s vremenskim uvjetima. Primjer dnevnog rasporeda opterećenja data centra jedinstvene upotrebe prikazan je slikom 33.



Slika 33 Raspored opterećenja data centra jedinstvene upotrebe [40]



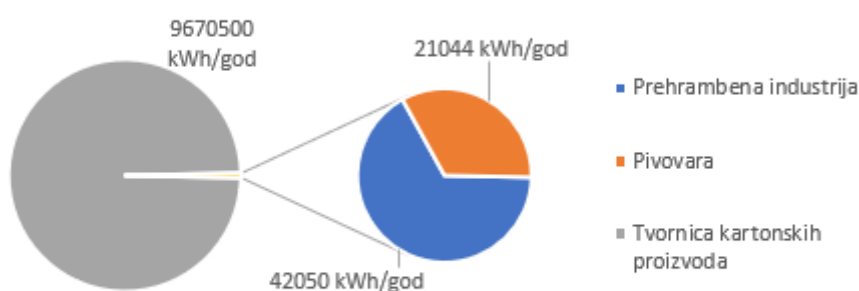
*Data* centar ove industrijske zone osmišljen je kao modularna građevina predviđena za smještaj računalnih sustava i potrebnih komponenti za potrebe pohrane podatka i telekomunikacije. Pretpostavljeno je da centar neće imat značajan udio potrošnje energije za uredske namjene, odnosno centar ima jednoliko opterećenje tijekom dana i čitave godine. Vršno opterećenje pogona IT dijela infrastrukture iznosi 400kW. Iz podatka da energija utrošena za pogon IT infrastrukture iznosi 50% izračunata je ukupna potrebna energija za pogon centra kroz godinu. Zbog složenosti sustava hlađenja pretpostavljeno je da se sva rashladna energija dobiva putem električne energije, ali s obzirom na klimatske uvjete na lokaciji *data* centra, postoji potencijal dobivanja rashladne energije i direktno iz okoliša. Podaci o sezonskoj energetskej potrebi podatkovnog centra prikazani su dijagramom na slici 34.



Slika 34 Raspored potrošnje električne energije data centra tijekom godine

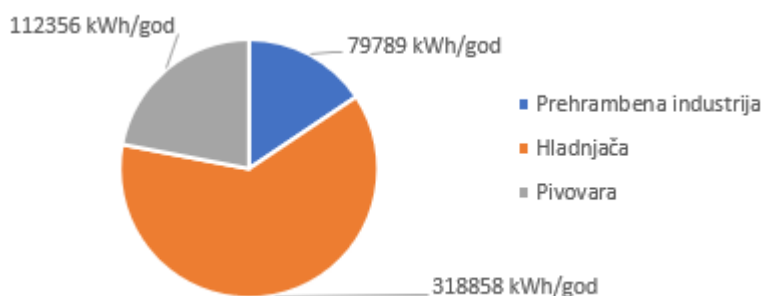
## 5.7 Industrijska zona

Nakon što su poznate energetske potrebe industrijske zone može se dovesti upotreba energije svake industrije u kontekst cjelokupne energetske potrebe. Najveći potrošač toplinske energije je kartonska industrija. Kartonska industrija koristi 99% ukupne toplinske energije potrebne u industrijskoj zoni. Velike potrebe u kartonskoj industriji uzrokovane su velikim potrebama za proizvodnjom pare. Toplinske energetske potrebe industrijske zone prikazuje dijagram na slici 35.



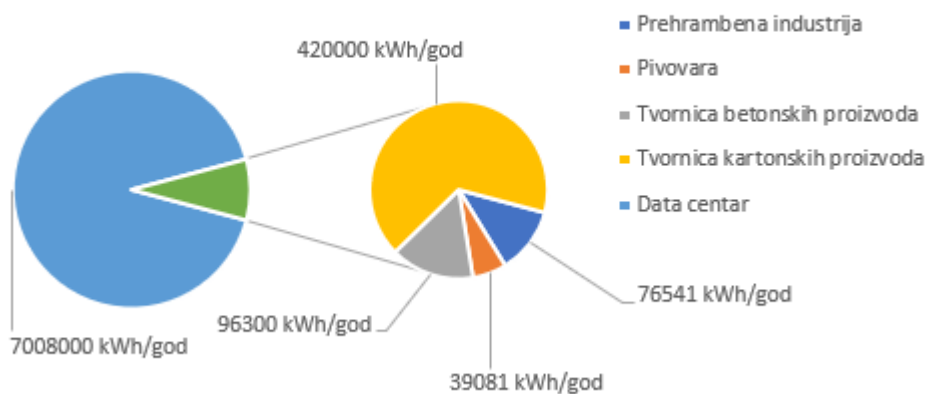
Slika 35 Upotreba toplinske energije u industrijskoj zoni

Najveći potrošač rashladne energije u industrijskoj zoni je hladnjača. Hladnjača predstavlja 62% ukupnih potreba rashladne energije industrijske zone. Potreba za rashladnom energijom prikazana je dijagramom na slici 36.



Slika 36 Upotreba rashladne energije u industrijskoj zoni

Najveći potrošač električne energije u industrijskoj zoni je *data* centar. Od ukupne potrebe za električnom energijom u industrijskoj zoni 92% odnosi se na potrebe *data* centra. Dijagramom na slici 37 prikazane su potrebe za električnom energijom u industrijskoj zoni.



Slika 37 Upotreba električne energije u industrijskoj zoni

## 6 OIE ENERGIJE U INDUSTRIJSKOJ ZONI

### 6.1 Fotonaponski sustav

Zbog trenutnog sustava preuzimanja električne energije fotonaponski (FN) sustavi se dimenzioniraju tako da se odabere onoliki broj FN modula potreban za proizvodnju one količine energije koja će pokriti godišnje potrebu. U predmetnoj industrijskoj zoni najveći potrošač električne energije je *data* centar, a istovremeno zbog prirode građevine nema mogućnost instalacije integriranog fotonaponskog sustava. Drugi korisnici industrijske zone imaju prostora za instalaciju fotonaponskih sustava koji nadilaze njihove potrebe. Uzimajući u obzir da će korisnici zone moći međusobno dijeliti proizvedenu energiju i na velike potrebe zone za električnom energijom, fotonaponski sustav se dimenzionira tako da se postavi maksimalan mogući broj fotonaponskih panela na objekte unutar zone.

Proračun fotonaponskog sustava, odnosno njegovo projektiranje provedeno je se uz pomoć programa *PVSol*. Kako bi dobili što točnije podatke o proizvodnji električne energije fotonaponskog sustava, potrebno je sve do sad definirane podatke o potrošnji električne energije unijeti u program. Programu je potrebno dati informacije o profilima potrošnje svakog od potrošača.

Nakon što su programu zadani parametri o potrošnji potrebno je napraviti model fotonaponskog sustava industrijske zone. Izrada modela započinje izradom trodimenzionalnog modela građevina. Nakon što su definirane sve površine, započinje se s postavljanjem fotonaponskih modula. Za postavljanje odabrani su fotonaponski moduli proizvođača *LONGISolar*, model *LR4-60 HIH 380 M G2*, pojedinačne snage 380 W. Pretpostavljeno je da su krovovi građevina izvedeni ravno pa se fotonaponski moduli postavljaju pod nagibom u smjeru istok-zapad. Slika 38 prikazuje trodimenzionalni model napravljen u okviru programa *PVSol*. Ukupna vršna snaga postavljenog solarnog sustava iznosi 2578,56 kWp. Pri definiranju konfiguracije sustava odabrani su inverteri tvrtke *Huawei* modela *SUN2000-50-KTL-M3\_480V*, snaga pretvarača iznosi 50 kW. Kad je model u potpunosti definiran može se pokrenuti simulaciju. Simulacijom se izračunava osunčanost površina fotonaponskih modula, zasjenjenja i konačno se dobiva rezultate o proizvodnji energije tijekom svakog trenutka u godini.



Slika 38 Model fotonaponskog sustava industrijske zone

Rezultati simulacije pokazali su da fotonaponski sustav godišnje može proizvesti 3.571.761 kWh električne energije, što zadovoljava 47% potreba industrijske zone za električnom energijom, na godišnjoj razini. Od 47% proizvedene energije, 72% (2.582.998 kWh) energije može se iskoristiti u trenutku proizvodnje dok je ostatak, 28% (988.766 kWh) potrebno predati u mrežu ili sustav pohrane za kasniju upotrebu. Podaci o apsolutnim vrijednostima proizvodnje energije iz fotonaponskih sustava prikazani su slikom 39.

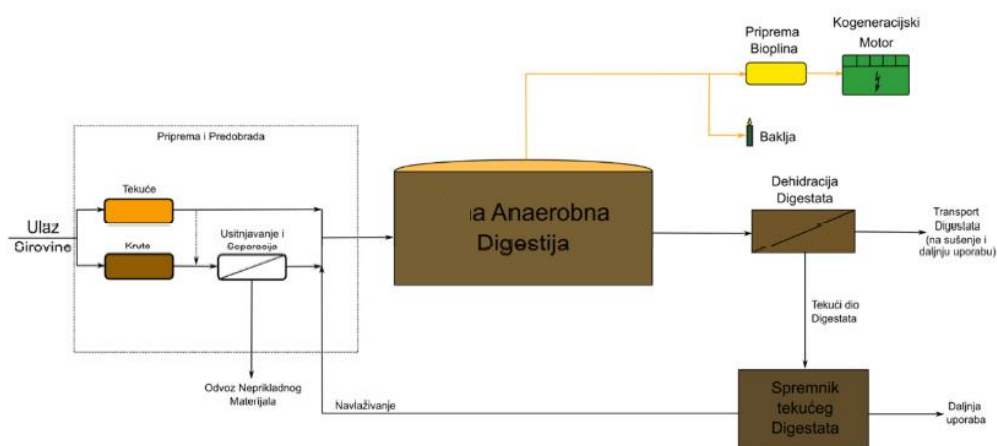


Slika 39 Tok energije proizvedene iz FN

Ostali rezultati dobiveni simulacijom fotonaponskog sustava u programu *PVSol* prikazani su u prilogu B.

## 6.2 Bioplinsko postrojenje

Tipično bioplinsko postrojenje sastoji se od bazena za prikupljanje biomase, fermentora, spremnika plina, spremnika digestata, plinskog motora sa generatorom i postrojenja za proizvodnju biometana. Proces proizvodnje bioplina započinje dovozom biomase u bazen za prikupljanje. Biomasa zavisno od dostupnosti, osim biorazgradive komponente komunalnog otpada, može biti i gnojovka, kukuruzna silaža, silaža žitarica, slama žitarica i slično. Nakon dovoza sirovina ulazi u fermentor gdje u anaerobnim uvjetima bez prisustva svjetla nastaje bioplin. Zavisno o načinu upravljanja dohranjivanja fermentora novom sirovinom mogu se dobivati konstantne ili varijabilne količine bioplina. Nakon što nastane bioplin, on se izdvaja u prostor spremnika, a iskorištene sirovine se vode u spremnik digestata. Iz prostora spremnika bioplin se vodi u CHP jedinicu, jedinicu za proizvodnju topline i električne energije.



Slika 40 Shematski prikaz tehnološkog procesa bioplinskog postrojenja [41]

Bioplinsko postrojenje smješteno u zoni pod punim opterećenjem može dati 500kW električne snage i 530 kW toplinske snage. Preračunavanjem snage kroz period od 8.200 h/god, takvo postrojenje može proizvesti 4.100 MWh električne energije, od čega se 400 MWh koristi za vlastiti potrošnju, a 3.700 MWh ostaje za potrošnju u zoni i u mreži. Kogeneracijsko postrojenje može proizvesti i 4.346 MWh toplinske energije.

## 7 MODELIRANJE FLEKSIBILNE OPSKRBE ELEKTIRČNOM ENERGIJOM TIJEKOM TJEDNA U VELJAČI I SRPNJU

Na temelju profila potrošnje električne energije, profila proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sustava, prikazanih u prilogu A, i snage bioplinskog postrojenja izrađuje se model fleksibilne opskrbe. Izrada modela vrši se u programu *Matlab*.

### 7.1 Pretpostavke modela opskrbe

Model opskrbe zamišljen je u okviru *zajednice obnovljivih izvora energije* čiji su članovi korisnici zone. Na čelu upravljanja opskrbom industrijske zone nalazi se *agregator* koji je dužan osigurati stabilnu opskrbu po najpovoljnijoj cijeni. Prodaja energije među sudionicima se vrši po načelu *uzajamnog trgovanja*. S nastalim viškovima energije agregator može trgovati na burzi energije i tako ostvarivati dobit.

Kao izvor fleksibilnosti opskrbe industrijske zone predviđena je instalacija baterijskog sustava, uspostavljanje upravljanja potražnjom putem sudjelovanja na tržištu električne energije, a moguće se koristiti i fleksibilnim upravljanjem bioplinskog postrojenja. U sljedećem poglavlju izveden je model čiji rezultat prikazuje slijed upravljanja koji je agregator dužan uspostaviti kako bi korisnici zone imali minimalne troškove energetske opskrbe.

### 7.2 Programsko postavljanje modela

Model fleksibilne opskrbe izvodi se uz pomoć optimizacijske metode *fmincon*. *Fmincon* metoda pronalazi ograničeni minimum skalarne funkcije, nekoliko varijabli, počevši od početne procjene. To se općenito naziva ograničena nelinearna optimizacija ili nelinearno programiranje [42]. Ograničenja *fmincon* metode prikazuje slika 41.

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ \text{ceq}(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ \text{Aeq} \cdot x = \text{beq} \\ \text{lb} \leq x \leq \text{ub}, \end{cases}$$

Slika 41 Ograničenja *fmincon* metode

U slučaju izrade predmetnog modela funkcija za koju je potrebno pronaći minimum ( $\min_x f(x)$ ) jest funkcija troška. Funkcija troška definira se kao zbroj troškova energetske opskrbe svakog od izvora energije u jedinici vremena. Funkcija troška može se zapisati:

$$T_h = c_{bio,h} \cdot P_{bio,h} + c_{pan,h} \cdot P_{pan,h} + c_{bat,h} \cdot P_{bat,h} + c_{mre,h} \cdot P_{mre,h}.$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

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

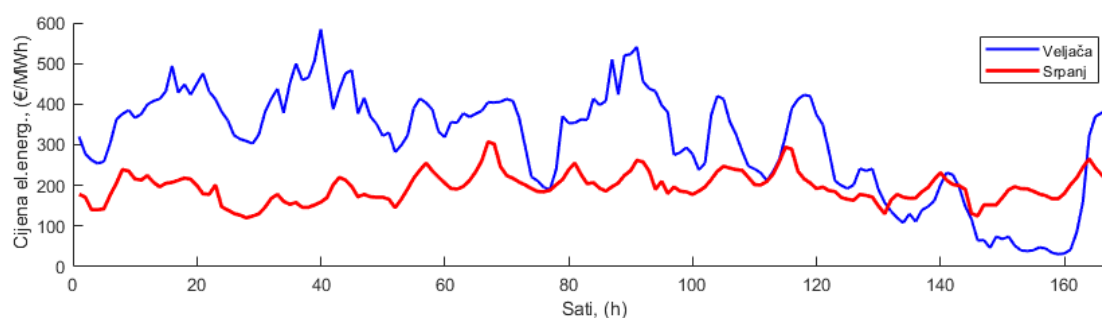
Osim troška energije nastalog uslijed rada prethodno opisanih OIE, u jednadžbu je uključen trošak energije dobivene iz mreže i trošak rada baterije.

Cijena energije iz bioplinskog postrojenja dobivena je na osnovi podataka o cijeni sirovina koje se koriste u bioplinskom postrojenju. Pretpostavljeno je da se kao sirovina koriste ostaci hrane (80% mase otpada), otpad iz separatora masti (5%) i biootpad (15%). Cijene sirovine iznose: 5 € ostaci hrane, 0 € otpad iz separatora masti, 0 € biootpad [43]. Cijene sirovine izražene su po toni svježe sirovine. Kako bi se dobila cijena energije potrebno je pronaći količinu bioplina koja se može dobiti anaerobnom digestijom sirovine i ogrijevnu vrijednost bioplina. Ogrijevna vrijednost bioplina iznosi  $5.19 \text{ kWh/m}_n^3$  [44]. Za proračun količine proizvedenog plina korišteni su podaci



kolegija *Vođenje energetskih sustava* na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [43]. Iz podataka o udjelu suhe tvari u sirovini, udjelu organske tvari u suhoj tvari, prinosa bioplina i ogrijevne vrijednosti bioplina, izračunata je cijena energije iz bioplinskog postrojenja. Cijena energije iz bioplinskog postrojenja iznosi 0.0164 €/kWh. Cijena proizvodnje energije iz fotonaponske elektrane definirana je kao besplatna energija, 0 €/kWh. S obzirom da je u modelu pretpostavljeno da nema gubitaka pretvorbe energije i kako bi energija fotonapona imala prioritet direktnog korištenja u odnosu na energiju iz baterije, cijena energije, dobivena iz baterije, zadana je s 0.01€/kWh.

Cijena energije iz mreže uzeta je prema podacima s burze električne energije CROPEX [14] za tjedan u veljači (7.2.2022.-13.2.2022.) i za tjedan u srpnju (4.7.2022.-10.7.2022). Cijene u tim razdobljima prikazuje slika 42.



Slika 42 Cijena električne energije tijekom tjedna veljače i srpnja

Funkcija ograničenja  $ceq(x) = 0$ , funkcija je koja daje ograničenje održavanja potrebne prosječne snage izvora energije kako bi energetska potreba industrijske zone u određenom satu bila zadovoljena. Funkcija se može zapisati:

$$ceq_h(P_h) = P_{bio,h} + P_{pan,h} + P_{bat,h} + P_{mre,h} - P_{opt,h}$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izraz označava:

$$P_{opt,h} \quad - \quad \text{prosječna potrebna snaga u satu,} \quad \frac{kWh}{h}$$

Funkcija ograničenja  $c(x) \leq 0$ , funkcija je koja daje ograničenje da se baterija ne prepuni ili isprazni u negativnu vrijednost. S donje strane pražnjenje baterije izjednačeno je s 0 kWh, a s gornje strane punjenje je izjednačeno s kapacitetom baterije. Kako bi se matematički zapisalo ograničenje potrebno je definirati funkciju koja daje negativne vrijednosti za raspon napunjenosti baterije od 0 do kapaciteta baterije. Jednadžba ograničenja baterije prikazana je u nastavku:

$$c(E_{bat,h}) = \left( \left( \arctan \left( \frac{E_{bat,h} - 1.557 \cdot 1607 \cdot \frac{E_{bat,c}}{1000}}{1607 \cdot \frac{E_{bat,c}}{1000}} \right) \right)^2 - 1 \right) \cdot 100.$$

U prethodnoj jednadžbi prikazani izrazi označavaju:

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

$E_{bat,c}$  - kapacitet baterije,  $kWh$ .

Trenutno stanje napunjenosti baterije definira se u odnosu na stanje napunjenosti u prethodnom trenutku i stanju punjenja/praznjenja. Punjenje je definirano kao pražnjenje negativne vrijednosti. Jednadžba koja opisuje stanje napunjenosti baterije je:

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

Raspon prosječne snage izvora energije u satu definiran je ograničenjem  $lb \leq x \leq ub$ . Kod bioplinskog postrojenja definirani raspon je 0 – 500 kW, kod fotonaponske elektrane 0 kW - *maximalna snaga elektrane u satu*, kod baterije -500 – 500 kW, kod mreže 0 – 1500 kW. Pretpostavljena napunjenost baterije u početnom trenutku iznosi 60% kapaciteta.

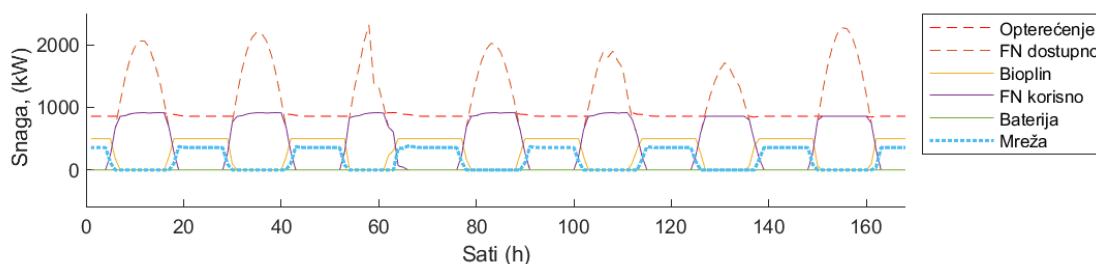
U prilogu C nalazi se prikaz koda zapisanog u programu *Matlab*.

### 7.3 Rezultati modela optimizacije opskrbe industrijske zone

Model se proveo u uvjetima opskrbe bez baterije i sa baterijama kapacitete 1000 kWh, 2000 kWh, 3000 kWh, 4000kWh, 5000 kWh, 6000 kWh kroz razdoblje tjedna u veljači i tjedna u srpnju. Model je za svaki od slučajeva pokazao najbolji mogući način vođenja opskrbe kako bi se troškovi energije sveli na minimum.

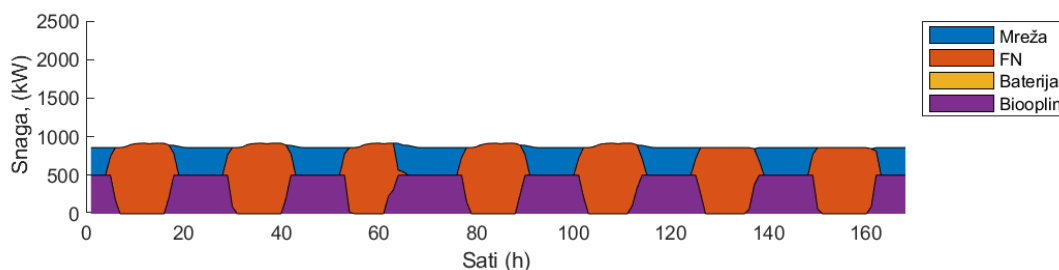
Upravljanje opskrbom bit će prikazano na primjeru opskrbe bez instalirane baterije i opskrbe s instaliranom baterijom kapaciteta 5 MWh. Ostali izvedeni modeli energetske opskrbe prikazani su dijagramima u prilogu D.

### 7.3.1 Srpanj, baterija = 0 kWh



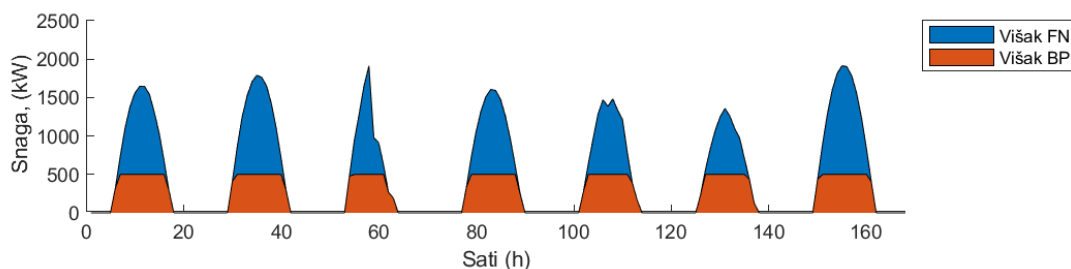
Slika 43 Upravljanje opskrbom, srpanj, bat = 0 kWh

Dijagram na slici 43 prikazuje snage izvora energije spojene na elektroenergetsku mrežu industrijske zone, trenutno opterećenje zone i dostupnu snagu iz fotonaponske elektrane u tjednu mjeseca srpnja. Može se uočiti kako je slijed dobivanja energije u svakom danu jednak. Zbog nedostupnosti energije iz fotonaponske elektrane, tijekom noći, iz bioplinskog postrojenja preuzima se sva dostupna energija, ostatak potrebne energije pokriva se iz mreže. Dolaskom dana povećava se snaga na fotonaponskim panelima, pa energija iz mreže više nije potrebna. Zbog manje cijene energije dobivene iz fotonaponske elektrane smanjuje se udio energije iz bioplinskog postrojenja. Opskrba industrijske zone po vrsti izvora prikazana je slikom 44.



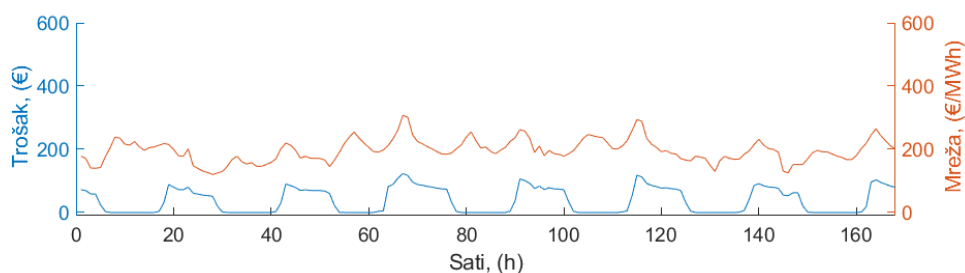
Slika 44 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat = 0 kWh

Udio iskorištene energije fotonaponske elektrane povećao se, međutim on je povećan na račun smanjenja korištenja energije dobivene iz bioplinskog postrojenja. Ukoliko postoji dovoljno sirovine za proizvodnju bioplina, ukupna neiskorištena energija u okviru zone i dalje ostaje jednaka. Energijom koja nije iskorištena unutar industrijske zone agregator može trgovati na tržištu električne energije. Slika 45 prikazuje dostupnu snagu postrojenja koja nije iskorištena u okviru industrijske zone. Ukupna energija koja ne može biti iskorištena u zoni tijekom tjedna u srpnju iznosi 86.661 kWh.



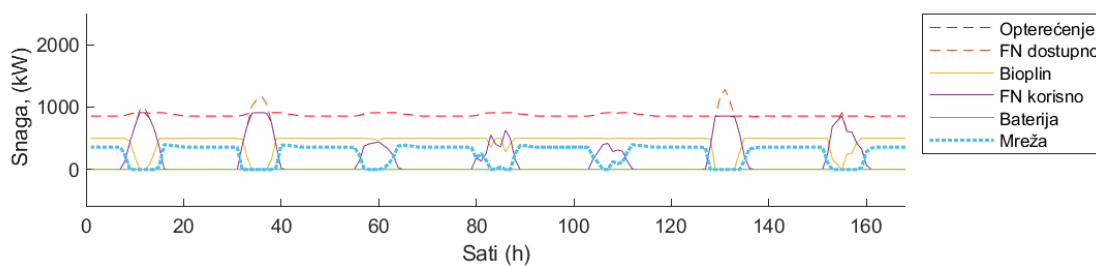
Slika 45 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, srpanj, bat=0 kWh

Trošak opskrbe energijom najveći je u vrijeme noći kad se koristi energija iz mreže. S obzirom da je cijena energije jeftinija za vrijeme noći ostvaren je minimalni mogući tjedni trošak 6.261 €. Trošak opskrbe prikazan je slikom 46.



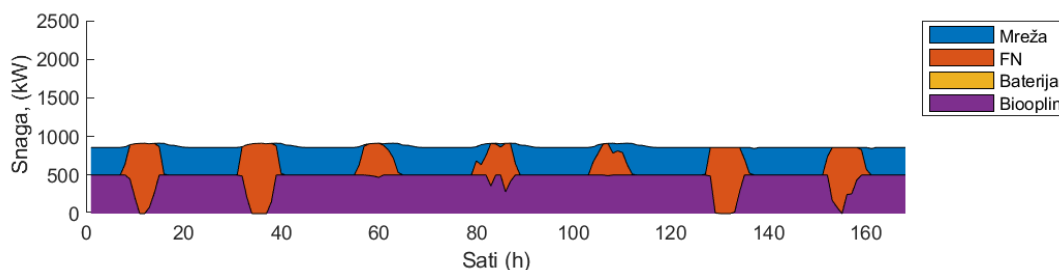
Slika 46 Trošak opskrbe, srpanj, bat=0 kWh

### 7.3.1 Veljača, baterija = 0 kWh



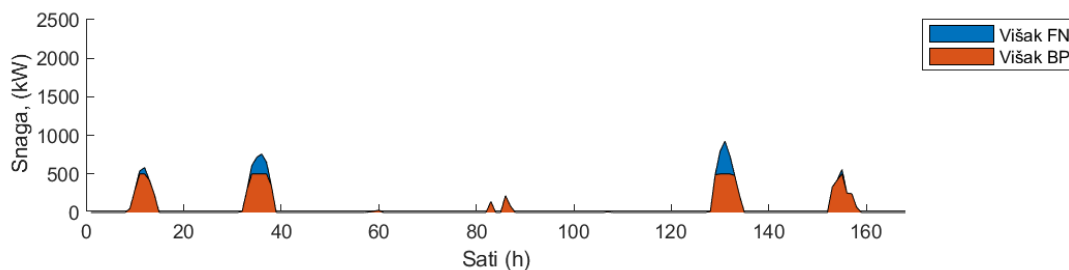
Slika 47 Upravljanje opskrbom, veljača, bat = 0 kWh

Sličan uzorak upravljanja opskrbom, kao u prethodnom primjeru tjedna u srpnju, moguće je vidjeti na slici 47 za tjedan u veljači. Udio energije iz fotonaponske elektrane ponovo je povećan na račun smanjenja korištenja energije dobivene iz bioplinskog postrojenja. Opskrba industrijske zone po vrsti izvora prikazana je slikom 48.



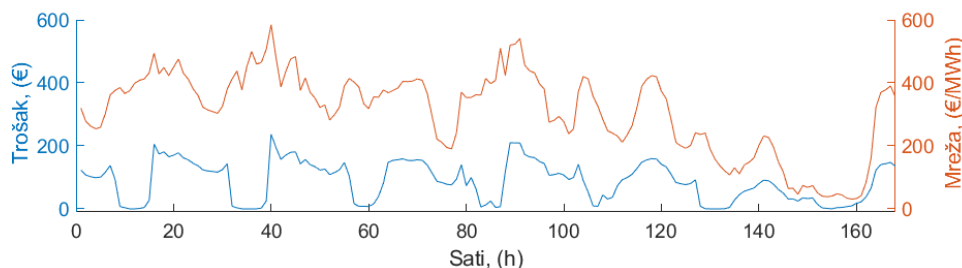
Slika 48 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat =0 kWh

Zbog znatno manje proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane manje je i neiskorištene energije. Ukupna energija koja ne može biti iskorištena u zoni tijekom tjedna u veljači iznosi 11.538 kWh. Slika 49 prikazuje dostupnu snagu postrojenja koja nije iskorištena u okviru industrijske zone.



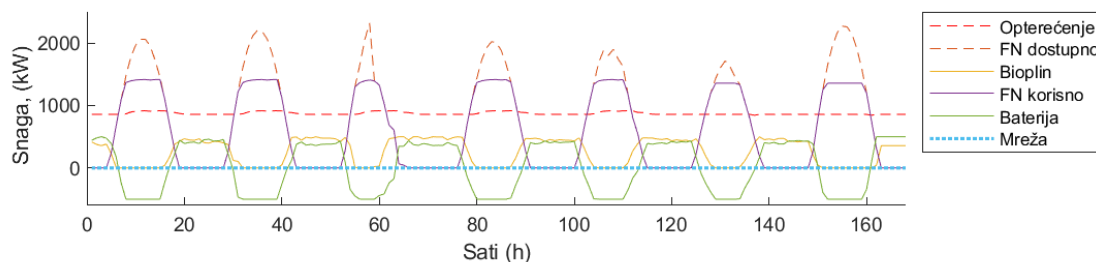
Slika 49 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, veljača, bat=0 kWh

Trošak opskrbe električnom energijom znatno je veći tijekom tjedna u veljači nego tijekom tjedna u srpnju. Razlog tome su više cijene preuzimanja električne energije iz mreže i manja količina proizvedene energije iz fotonaponskih elektrana. Ukupni trošak tijekom tjedna u veljači iznosi 14.727 €, troškovi tijekom svakog sata prikazani su dijagramom na slici 50.



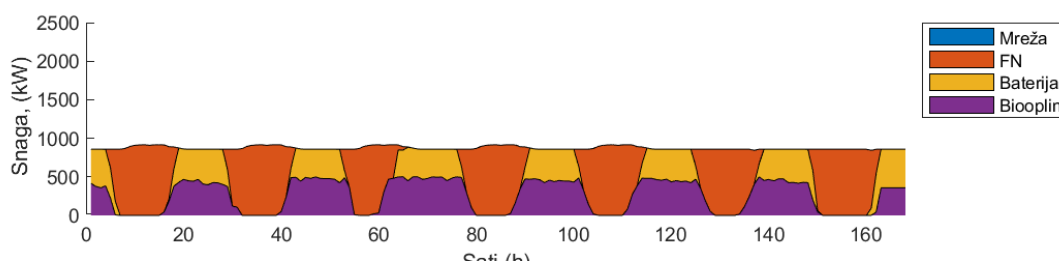
Slika 50 Trošak opskrbe, veljača, bat = 0 kWh

### 7.3.2 Srpanj, baterija = 5 MWh



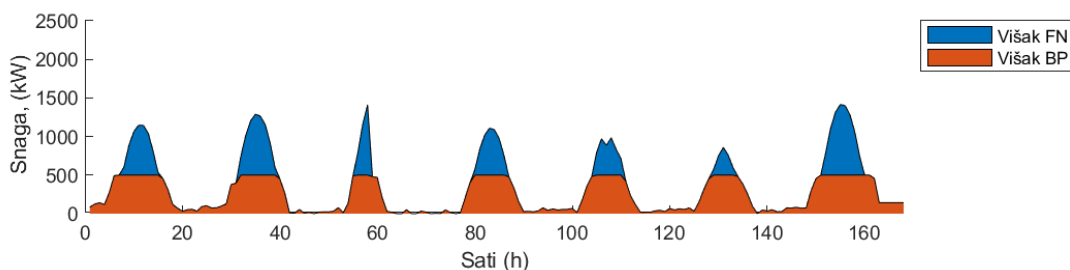
Slika 51 Upravljanje opskrbom, srpanj, bat = 5000 kWh

Slika 51 prikazuje slijed upravljanja energetske opskrbe u slučaju instalirane baterije snage 5 MWh. U početom trenutku, dok traje noć, energija se u potpunosti pokriva iz baterije i bioplinskog postrojenja. Dolaskom dana povećava se snaga fotonaponske elektrane. Dio energije fotonaponske elektrane koristi se direktno za pogon industrijske zone, dok se drugi dio koristi za punjenje baterije. Zalaskom sunca nema više proizvodnje energije u fotonaponskom sustavu pa se u rad ponovo uključuje bioplinsko postrojenje i baterija. Energija tijekom dana pohranjena u bateriji u sprezi s energijom dobivenom iz bioplinskog postrojenja dostatna je za osiguravanje otopnog rada industrijske zone tijekom cijelog tjedna. Da tijekom tjedna nije potrebna energija iz mreže jasno je prikazano dijagramom, na slici 52.



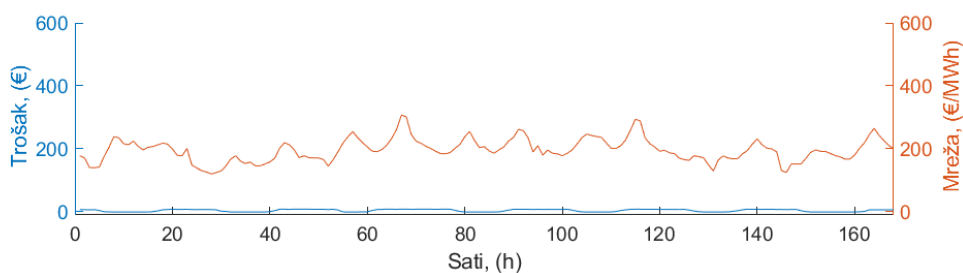
Slika 52 Opskrba industrijske zone, srpanj, bat = 5000 kWh

Iako instalirana baterija omogućava otočni rad industrijske zone dio proizvedene energije i dalje ostaje ne iskorišten. Potencijalno proizvedena energija koja nije iskorištena unutar industrijske zone prikazana je dijagramom na slici 53. Ukupna neiskorištena energija u okviru industrijske zone tijekom tjedna iznosi u srpnju iznosi 60.804 kWh.



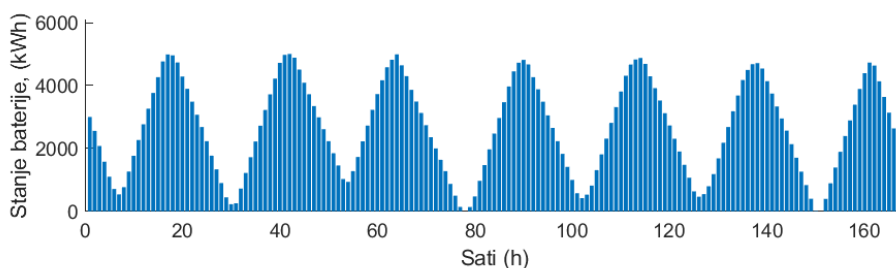
Slika 53 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, srpanj, bat=5000 kWh

Dijagram na slici 54 prikazuje trošak opskrbe energijom. Iz dijagram je očito kako se instaliranjem baterije u sustav energetske opskrbe zone trošak višestruko smanjio. Trošak tijekom srpnja iznosi 718 €, što je skoro 9 puta manji trošak nego u slučaju rada bez baterije.



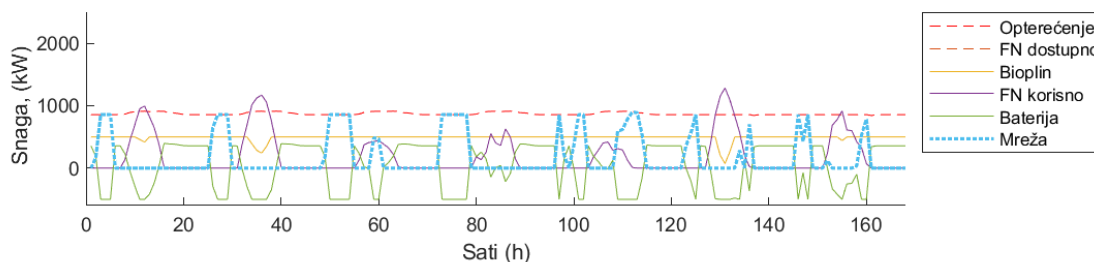
Slika 54 Trošak opskrbe, veljača, bat = 0 kWh

Slika 55 prikazuje stanje napunjenosti baterije tijekom veljače. Baterija tijekom svakog dana u srpnju puni se do maksimuma koristeći energiju proizvedenu iz fotonaponske elektrane.



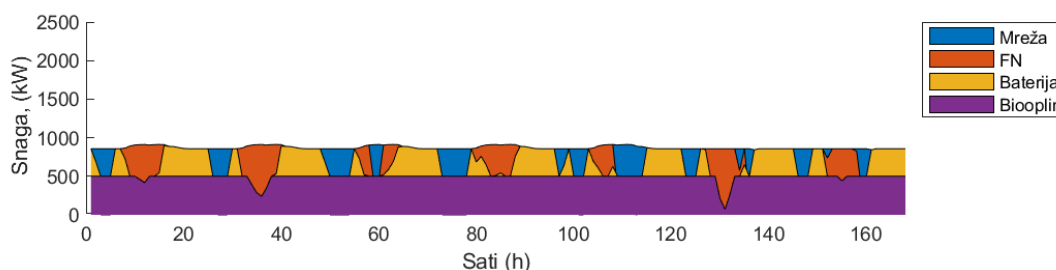
Slika 55 Napunjenost baterije, veljača, bat = 5000 kWh

### 7.3.3 Veljača, baterija = 5 MWh



Slika 56 Upravljanje opskrbom, veljača, bat = 5000 kWh

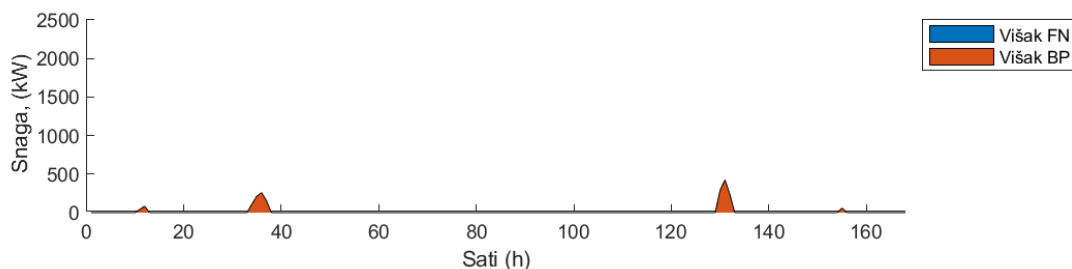
Na slici 56 može se uočiti bitno različito upravljanje opskrbom nego u prije prikazanim dijagramima upravljanja opskrbom. Za razliku od prijašnjeg slučaja gdje se baterija u potpunosti punila iz energije dobivene iz fotonaponske elektrane, baterija u ovom slučaju puni se i iz mreže. U početnom trenutku opskrba zone vrši se iz baterije i bioplinskog postrojenja. U sljedećim satima opskrba zone je pokrivena energijom iz bioplinskog postrojenja i energijom iz mreže. Usljed jeftine energije iz mreže, mreža se u tim satima koristi i za punjenje baterije. U juturnjim satima, prije početka proizvodnje energije iz fotonaponske elektrane, cijena energije iz mreže raste, pa se opskrba ponovo vrši iz baterije i biooplinskog postrojenja. Dolaskom dana baterija ponovo prelazi u režim punjenja, ali ovaj put energijom iz fotonaponske elektrane. U satima najveće proizvodnje energije iz fotonaponske elektrane dolazi do blagog smanjenja rada bioplinskog postrojenja na mreži zone kako bi se ostvarila maksimalna iskorištenost energije fotonaponske elektrane. Zalaskom Sunca ponovo dolazi do aktiviranja baterije. Ista logika opskrbe energijom primjenjuje se i u ostatku tjedna. Niska cijena energije u mreži koristi se kako bi se baterija napunila usljed nedostatka energije proizvedene iz fotonaponske elektrane i koristi se u trenucima kad je cijena energije visoka. Industrijska zona u pojedinim djelovima tjedna ostvaruje otočni rad, dok je u drugim djelovima tjedna potrebna i opskrba putem mreže, što se vidi na slici 57.



Slika 57 Opskrba industrijske zone, veljača, bat = 5000 kWh

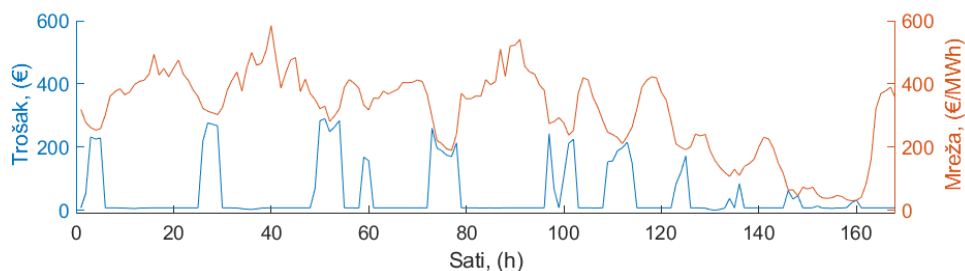


Usprkos manjku energije iz fotonaponskog sustava za ostvarenje otočnog rada, tijekom tjedna nastaje i određeni višak. U ovom tjednu, višak iznosi 1.872 kWh.



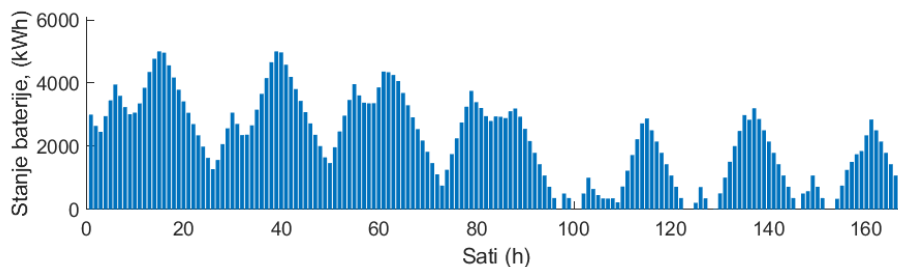
Slika 58 Neiskorištena dostupna snaga u zoni, veljača, bat=5000 kWh

Na slici 58 jasno se vidi kako najveći troškovi nastaju kad je cijena energije u mreži najmanja.



Slika 59 Trošak opskrbe, veljača, bat = 5000 kWh

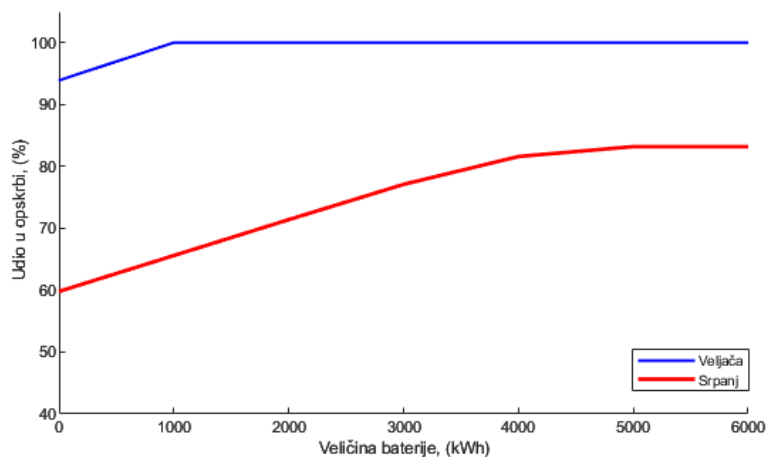
Slika 60 prikazuje stanje napunjenosti baterije tijekom tjedna. Moguće je vidjeti kako se baterija puni do kraja samo u prva dva dana, dok se do kraja prazni tek nakon četvrtog dana. Razlog tome je nedostatak energije proizvedene iz fotonaponskog sustava i kratki periodi jeftine energije iz mreže.



Slika 60 Napunjenost baterije, veljača, bat = 5000 kWh

## 7.4 Utjecaj fleksibilne opskrbe

Povećavanjem veličine baterije dolazi do rasta udjela iskorištene solarne energije u energetske opskrbe zone. Tokom tjedna u veljači udio iskorištene solarne energije za opskrbu zone dolazi do 100% već nakon instaliranja baterije od 1000 kWh. Razlog tome su ostvareni mali viškovi solarne energije tijekom tjedna u veljači. Za vrijeme tjedna u srpnju udio iskorištene solarne energije za opskrbu raste od 60% (bez baterije) do 83.2% (s baterijom 5 MWh). Daljnjim povećanjem veličine baterije ne dolazi do bitnog povećanja udjela budući da je snaga punjenja i pražnjenja ograničena na 500 kW. Odnos udjela iskorištene energije fotonaponske elektrane i veličine baterije za tjedan u veljači i tjedan u srpnju prikazan je dijagramom na slici 61.

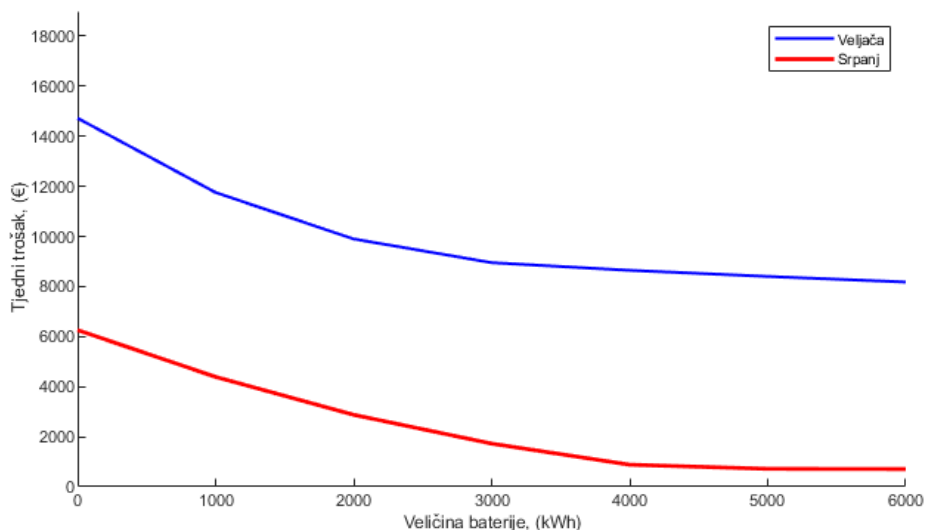


Slika 61 Iskorištena snaga FN sustava u opskrbi zone

Ostvareni viškovi iz fotonaponskih elektrana i bioplinskog postrojenja agregator može prodavati na tržištu čime dolazi do maksimalne iskorištenosti proizvedene energije. Instaliranjem baterije veličine 5 MWh dolazi do smanjenja vršne snage proizvodnje s 2000 kW na 1400 kW čime se smanjuje opterećenje vodova. Kako bi se dodatno smanjila vršna snaga proizvodnje, u obzir se može uzeti instaliranje druge baterije za smanjenje vršnog opterećenja ili se viškovi energije mogu koristiti na druge prikladne načine opisane prethodno u radu.

Promatra li se trošak na tjednoj razini, njegov iznos se smanjuje povećanjem veličine baterije. Do veličine baterije od 4 MWh mogu se primijetiti značajnije uštede, nakon čega su promjene u veličini troška sve manje izražene. Trošak u srpnju sustava s baterijom 5MWh čini 12% troškova sustava bez instalirane baterije, dok u veljači je to 57%. U apsolutnim

iznosima ostvarena ušteda tijekom srpnja iznosi 5543 €, dok tijekom veljače ostvarena ušteda iznosi 6322 €. Slika 61 prikazuje iznos tjednog troška u ovisnosti o veličini instalirane baterije.



Slika 62 Tjedni trošak u ovisnosti o veličini baterije

## 7.5 Procjena isplativosti instaliranja baterijskog sustava

Kako bi se ocijenila isplativost provodi se jednostavni proračun razdoblja povrata investicije. Utvrđeni iznosi ostvarene uštede u tjednu veljače iznosi 6322 €, u tjednu srpnja iznosi 5543 €. Ako navedene iznose preračunamo u godišnju uštedu tako da svaki od iznosa pomnožimo s 26 tjedana dolazi se do godišnje uštede u iznosu od 308.490 €.

Prema podacima s mrežne stranice [45] cijena baterije proizvođača Tesla, kapaciteta 3 MWh košta \$1.215.800. Ekstrapolirali se cijena na bateriju kapaciteta 5MWh i preračuna u eure, cijena baterije iznosi 1.931.724 €. Iz priloženih podataka računa se razdoblje povrata.

$$\text{Jednostavni povrat} = \frac{\text{cijena investicije}}{\text{godišnja ušteda}} = \frac{1.931.724}{309.712} = 6.26 \text{ godina}$$

Kako je već rečeno u poglavlju 1.4, rastom udjela OIE prosječna cijena električne energije 2025. može pasti do cijene 120 €/MWh [13]. Pad cijena uzrokuje i duži period povrata investicije u baterijske sustave i investicija u energetska postrojenja općenito. S obzirom na pad cijena proizvodnih postrojenja OIE u slijedećem razdoblju trebat će potaknuti izgradnju sustava pohrane energije.

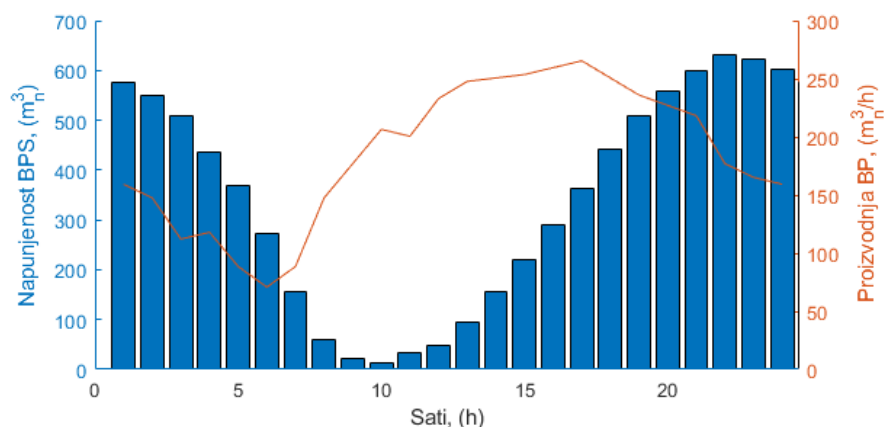
## 7.6 Sirovine bioplinskog postrojenja i punjenje spremnika.

Na temelju podataka o proizvodnji električne i toplinske energije prikazanih u poglavlju 6.2, podataka o proizvodnji bioplina po sirovinama [43] i ogrijevne vrijednosti moguće je dobiti potrebne količine sirovina za predmetno bioplinsko postrojenje. Izračunate potrebne godišnje količine sirovine prikazane su tablicom 3.

Tablica 3 Podaci o proizvodnji bioplinskog postrojenja

Proizvodnja električne energije	4.100 MWh
Masa sirovina za proizvodnju	15.255 t
Biootpad	2.888 t
Ostaci hrane	12.204 t
Ostaci iz separatora masti	762 t
Raspoloživa količina toplinske energije	4.346 MWh

Kako bi se dobila potrebna veličina spremnika bioplinskog postrojenja i približno previdio tijek proizvodnje bioplina napravljen je model napunjenosti spremnika. Intenzitet proizvodnje bioplina uzet je prema [46]. Pretpostavljeno je da se fermentor dohranjuje 10 sati počevši od sedam ujutro. Izračunata dnevna potreba za bioplinom iznosi  $4459 \text{ m}_n^3$ , dok satna potreba iznosi  $185,77 \text{ m}_n^3$ . Slikom 63 prikazana je napunjenost bioplinskog spremnika tijekom dana i odgovarajuća proizvodnja bioplina. Minimalna zapremnina spremnika za prikazanu proizvodnju bioplina iznosi  $631 \text{ m}_n^3$ .



Slika 63 Napunjenost bioplinskog spremnika

## 8 ZAKLJUČAK

Iz prikazanih podataka o opskrbi industrijske zone uočava se da su pojedini korisnici nositelji većine energetske potrebe industrijske zone: 92% potrebe za električnom energijom čini podatkovni centar, 99% potrebe za toplinskom energijom čini tvornica kartonske industrije, dok 62% potreba za rashladnom energijom čini hladnjača. Tako veliki udijeli mogu donijeti nestabilnost u upravljanju (ako dođe do zaustavljanja rada velikog potrošača), ali relativno konstantna energetska potreba velikih potrošača sustav čini predvidljivim.

Bioplinsko postrojenje proizvodi električnu i toplinsku energiju radeći konstantno pri nazivnoj snazi. Toplinskom energijom bioplinskog postrojenja može se namiriti do 50% potreba kartonske industrije za parom. Električnom energijom proizvedenom iz bioplinskog postrojenja upravlja agregator. Kako bi se održala minimalna cijena električne energije unutar zone agregator u vrijeme izobilja energije iz fotonaponske elektrane, električnu energiju bioplinskog postrojenja (troškovno) usmjerava u mrežu. Uz sudjelovanje baterije, agregator time može omogućiti povećanje udjela jeftine električne energije iz fotonaponske elektrane unutar zone. Prema modelu, udio iskorištenja energije iz fotonaponske elektrane u zoni u tjednu srpnja može narasti do 83,2%, a u tjednu veljače na 100%.

Instaliranje baterije može omogućiti otočni rad industrijske zone i pruža mogućnost iskorištavanja jeftine energije iz mreže. Baterija doprinosi većem iskorištavanju energije iz fotonaponske elektrane i smanjuje vršnu snagu viška koji nastaje unutar zone. Smanjenjem vršne snage (modelom prikazano 30% smanjenja) može se omogućiti da se energija u potpunosti koristi prodavanjem na tržištu. I na prikazanom primjeru uočava se kako će za potpuni prelazak na obnovljive izvore energije biti nužno ulagati u baterijske sustave.

Iako su modeli potrošnje i fleksibilne opskrbe ovog diplomskog rada zadani uz mnoga pojednostavljenja, modeli mogu dati dojam o stvarnim potrebama i mogućim rješenjima unutar sustava. S obzirom da dobivene rezultate, ovaj rad može biti motiv za detaljnije analize u stvarnim sustavima.

## LITERATURA

- [1] [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal\\_hr](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_hr)
- [2] Ł. Topolewski, Relationship between Energy Consumption and Economic Growth in European Countries: Evidence from Dynamic Panel Data Analysis. MDPI, 2021.
- [3] <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita?time=2015..latest>.
- [4] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>.
- [5] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Final\\_energy\\_consumption\\_by\\_sector\\_EU\\_2019.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Final_energy_consumption_by_sector_EU_2019.png).
- [6] E. Taibi, T. Nikolakakis, L. Gutierrez, C. Fernandez, J. Kiviluoma, T. Lindroos i S. Rissanen, Power system flexibility for the energy transition: Overview for policy makers. IRENA, 2018.
- [7] <https://www.solarpaces.org/dlr-finds-cst-is-ideal-renewable-to-decarbonize-german-industry/>.
- [8] <https://polarnightenergy.fi/news/2022/7/5/the-first-commercial-sand-based-thermal-energy-storage-in-the-world-is-in-operation-bbc-news-visited-polar-night-energy>.
- [9] Vodič za razvoj i provedbu obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj. EnergoVizija, Zagreb, 2021.
- [10] <https://www.hrote.hr/povlasteni-proizvodjac>.
- [11] N. Duić i A. Čurković, Energetska tržišta: Uvodno predavanje, 2021..
- [12] <https://www.hrote.hr/eko-bilancna-grupa>.

- 
- [13] <https://www.poslovnih.hr/trzista/struja-bi-mogla-znatno-pojeftiniti-poznato-pod-kojim-uvjetima-ce-se-to-dogoditi-4366395>.
- [14] <https://www.cropex.hr/hr/>.
- [15] Izvješće o uravnoteženju za 2020. i 2021. godinu, HOPS, 2022.
- [16] T. Bowen, . I. Chernyakhovskiy, K. Xu,, . S. Gadzanku i K. Coney , USAID GRID-SCALE ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES PRIMER. National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [17] [https://www.ema.gov.sg/Demand\\_Side\\_Management.aspx](https://www.ema.gov.sg/Demand_Side_Management.aspx).
- [18] Zakon o tržištu električnom energijom, *Narodne novine*, 2021.
- [19] G. Saether, P. Crespo del Gradno i S. Zaferanlouei, Peer-to-peer electricity trading in an industrial site: Value of buildings, 2021.
- [20] <https://quartier-strom.ch/index.php/en/2020/08/17/final-report-on-project-quartierstrom/>.
- [21] [powerledger.io](https://powerledger.io) <https://www.powerledger.io/>.
- [22] [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry_en).
- [23] <https://intilion.com/en/new-research-project-inzell-launched/>.
- [24] L. Majdandžić, Fotonaponski sustavi, priručnik, Srednja škola Oroslavlje.
- [25] Izvješće o komunalnom otpadu za 2019. godinu, Ministarstvo gospodarstva i održavog razvoj, Zavod za zaštitu okoliša i prirode.
- [26] Rješenje za Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023. - 2028. g. Ministarstvo gospodarstva i održavog razvoja, Zagreb, 2022..
- [27] Z. Morvaj, D. Gvozdanec i Ž. Tomšić, Sustavno gospodarenje energijom i upravljanje utjecajima na okoliš u industriji, Zagreb: Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, 2016..
- [28] Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Dairy Processing Industry: An, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, 2011.

- 
- [29] <https://www.attenbablercommodities.com/index.php/2019/09/17/eu-28-milk-production-update-sep-19/>.
- [30] <https://theengineeringmindset.com/cooling-load-calculation-cold-room/>.
- [31] Y. A. Cengel i A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer, New York: McGraw-Hill Education, 2020.
- [32] <https://mpgi.gov.hr/pristup-informacijama-16/zakoni-i-ostali-propisi/podrucje-energetske-ucinkovitosti/meteoroloski-podaci-primjenuju-se-od-1-sijecnja-2016/4830>.
- [33] D. Derežić i V. Vučetić, Tendencija povećanja srednje temperature tla. *Hrvatski meteorološki časopis*.
- [34] [https://www.tekoprefrigeration.com/cold-room/?gclid=Cj0KCQjwteOaBhDuARIsADBqReiDlbQhzZerPdRfTtKzLXRGf\\_m-kyf5sNXoGB7RkeTw3qcxbZw32gaAk1sEALw\\_wcB](https://www.tekoprefrigeration.com/cold-room/?gclid=Cj0KCQjwteOaBhDuARIsADBqReiDlbQhzZerPdRfTtKzLXRGf_m-kyf5sNXoGB7RkeTw3qcxbZw32gaAk1sEALw_wcB).
- [35] <https://gospodarski.hr/rubrike/ostalo/prilog-broja-kako-proizvesti-pivo/>.
- [36] J. Conduah, K. Kusakana i P. A. Hohne, Energy Efficiency Improvements in Microbrewery in South Africa, u *Central University of Technology*, Bloemfontein.
- [37] Energy Usage, GHG REduction, Efficiency and Load Management Manual, Brewers Association.
- [38] <https://www.ttb.gov/statistics/ttb-beer-2021-statistics>
- [39] T. Hyoung Kim, S. Ho Tae, S. Joon Suk, G. Ford i K. Kyek Yang, An Optimization System for Concrete Life Cycle Cost and Related CO2 Emissions. MDPI, Hanyang , 2016.
- [40] R. Ghatikar, A. M. Piette, K. Sydney Fujita i A. Mckane, Demand response and open automated demand response opportunities for data centers. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [41] [https://trilj.hr/wp-content/uploads/2020/07/ELABORAT-ZASTITE-OKOLISA-ZA-POSTUPAK-OCJENE-O-POTREBI-PROCJENE-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ZA-ZAHVAT\\_Postrojenj.pdf](https://trilj.hr/wp-content/uploads/2020/07/ELABORAT-ZASTITE-OKOLISA-ZA-POSTUPAK-OCJENE-O-POTREBI-PROCJENE-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ZA-ZAHVAT_Postrojenj.pdf).



- [42] <http://www.ece.northwestern.edu/local-apps/matlabhelp/toolbox/optim/fmincon.html>.
- [43] D. Lončar, VES 2021/22 Bioplin, Zagreb, 2021/22.
- [44] E. Mauky, S. Weinerich, M. Dotzauer i H. F. Jacobi, Expanding the flexibility of biogas plants – substrate management, schedule synthesis and economic assessment.
- [45] <https://electrek.co/2021/07/26/tesla-reveals-megapack-prices/>.
- [46] T. Persson, J. Murphy, A. K. Jannasch, E. Ahern, J. Liebetrau, M. Trommler i J. Toya, A perspective on the potential role of biogas in smart energy grids. IEA Bioenergy, 2014.

## **PRILOZI**

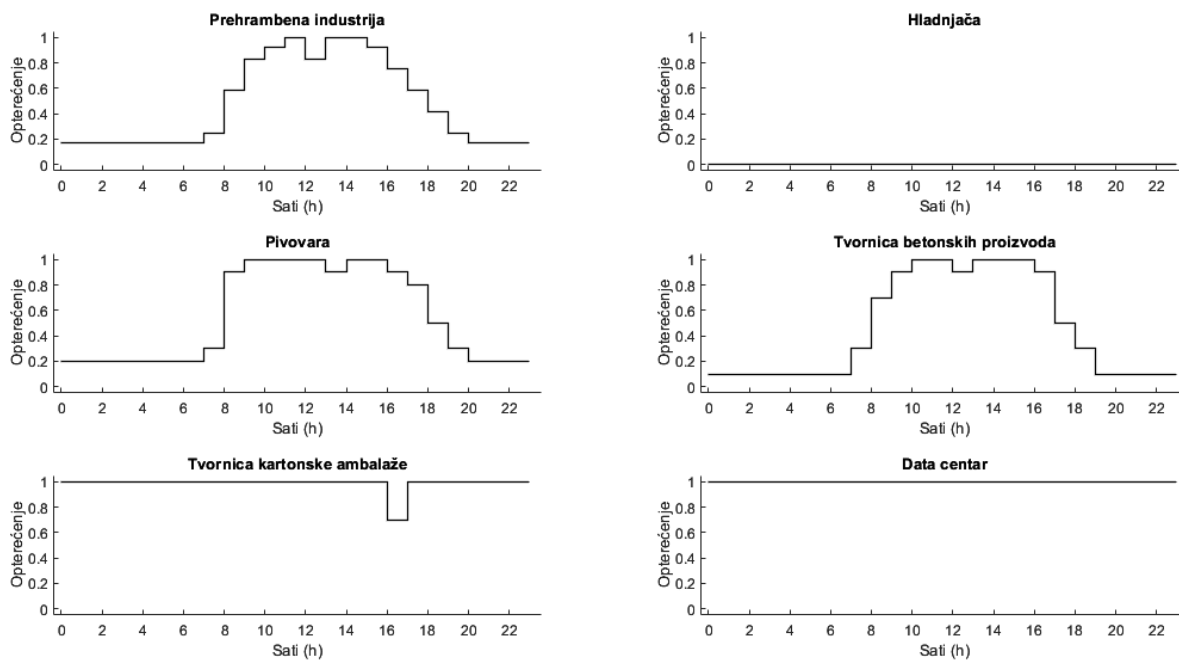
- I. Prilog A – Dnevna, tjedna i sezonska opterećenja energetske opskrbe pojedinih industrija
- II. Prilog B – Rezultati simulacije solarnog sustava u programu *PVSol*
- III. Prilog C – *Matlab* optimizacija
- IV. Prilog D – Rezultati simulacije modela fleksibilne opskrbe električnom energijom

## **Prilog A – Dnevna, tjedna i sezonska opterećenja energetske opskrbe pojedinih industrija**

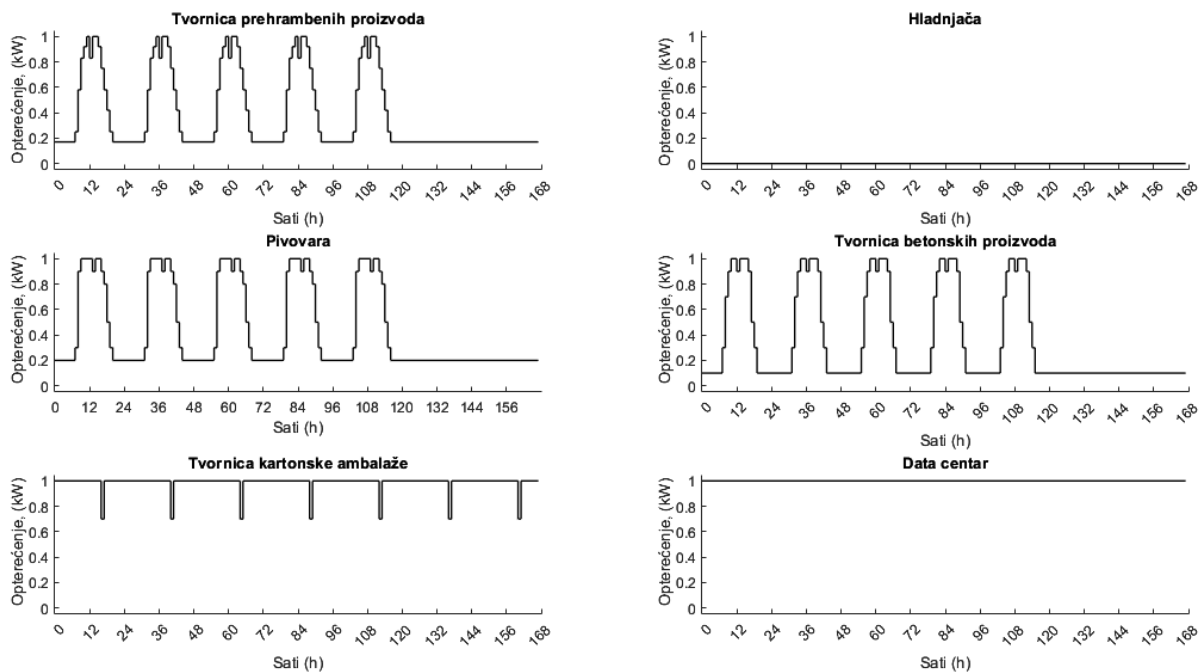
U ovom prilogu prikazani su rezultati dobiveni postupcima opisanim u petom poglavlju. Slika 64 prikazuje relativna dnevna opterećenja električne energije svih korisnika industrijske zone. Spajanjem relativnih dnevnih opterećenja u tjedna opterećenja dobivaju se dijagrami prikazani slikom 65. Preračunavanjem relativnih opterećenja u apsolutna opterećenja za mjesec veljaču i srpanj dobiju se dijagrami apsolutnih opterećenja prikazani na slikama 66 i 67. Zbrajanjem apsolutnih opterećenja korisnika zone moguće je dobiti ukupna opterećenja u mjesecu veljači i mjesecu srpnju za cijelu zonu. Rezultati opterećenja cijele zone prikazani su slikom 68. Slikom 69 prikazana su apsolutna opterećenja zone s ucrtanim trenutnim snagama fotonaponske elektrane.

Na isti način kao i dijagrami opterećenja električne energije, dobivena su toplinska opterećenja i rashladna opterećenja. Slika 70 prikazuje relativna dnevna opterećenja toplinske energije za svakog pojedinog korisnika industrijske zone. Slikom 71 prikazana su relativna tjedna opterećenja toplinske energije iz kojih su izračunata apsolutna tjedna opterećenja u mjesecu veljači i srpnju koja su prikazana na slikama 72 i 73, Na slici 74 vide se apsolutna opterećenje toplinske energije zone u tjednu veljače i tjednu srpnja.

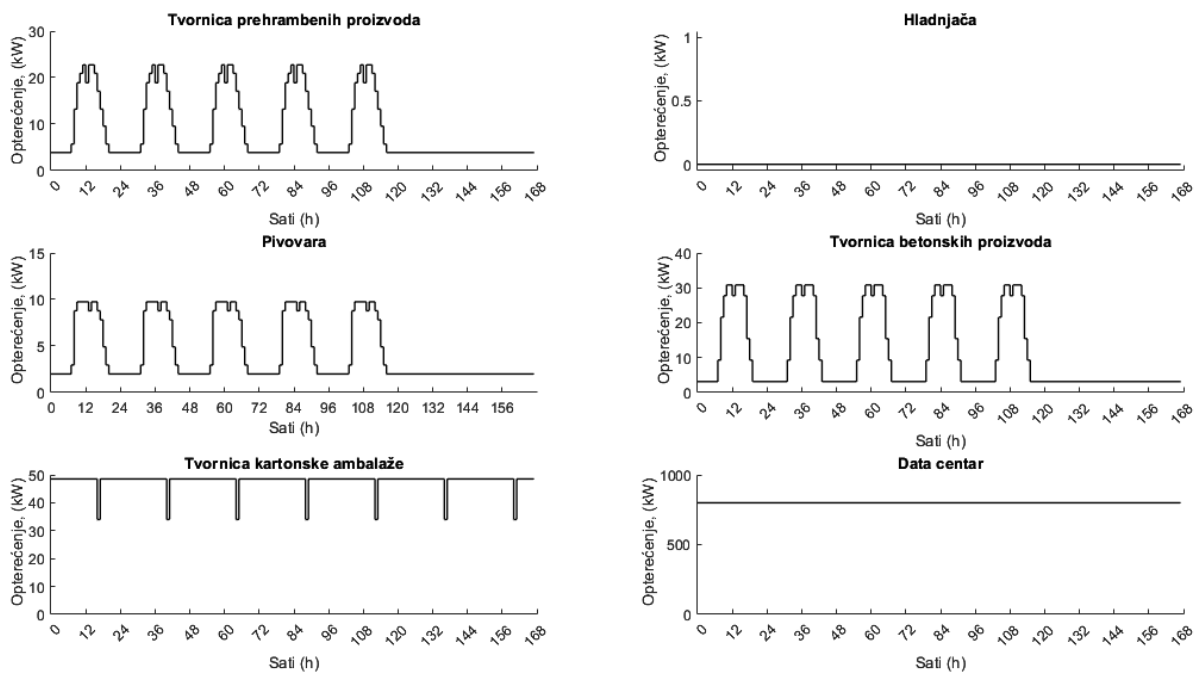
Rashladna opterećenja prikazana su istim redoslijedom. Slika 75 prikazuje relativna dnevna rashladna opterećenja, slika 76 prikazuje relativna tjedna opterećenja, a slikama 77 i 78 prikazana su apsolutna tjedna rashladna opterećenja svakog korisnika zone. Na slici 79 dijagramom je prikazano ukupno apsolutno opterećenje industrijske zone rashladnom energijom.



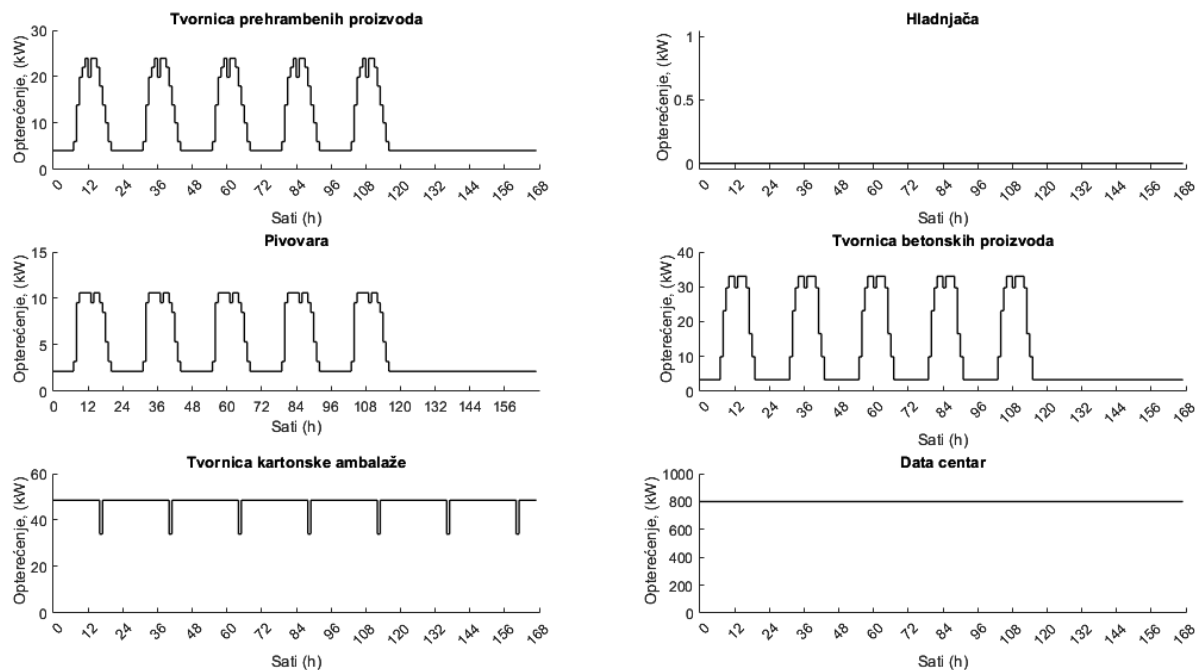
Slika 64 Relativna dnevna opterećenja, električna energija



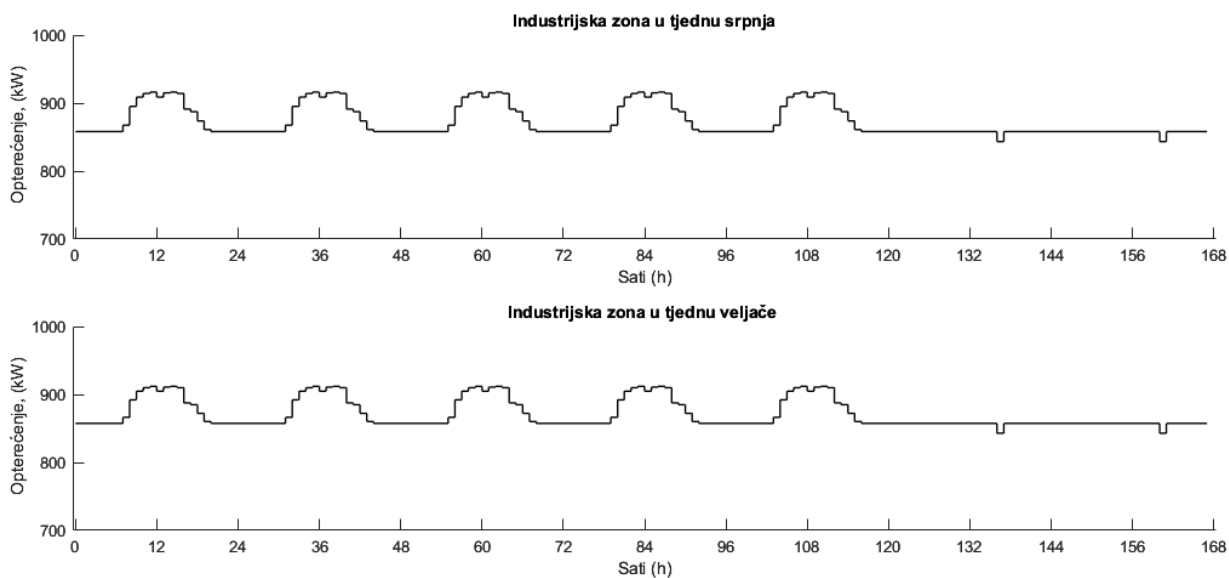
Slika 65 Relativna tjedna opterećenja, električna energija



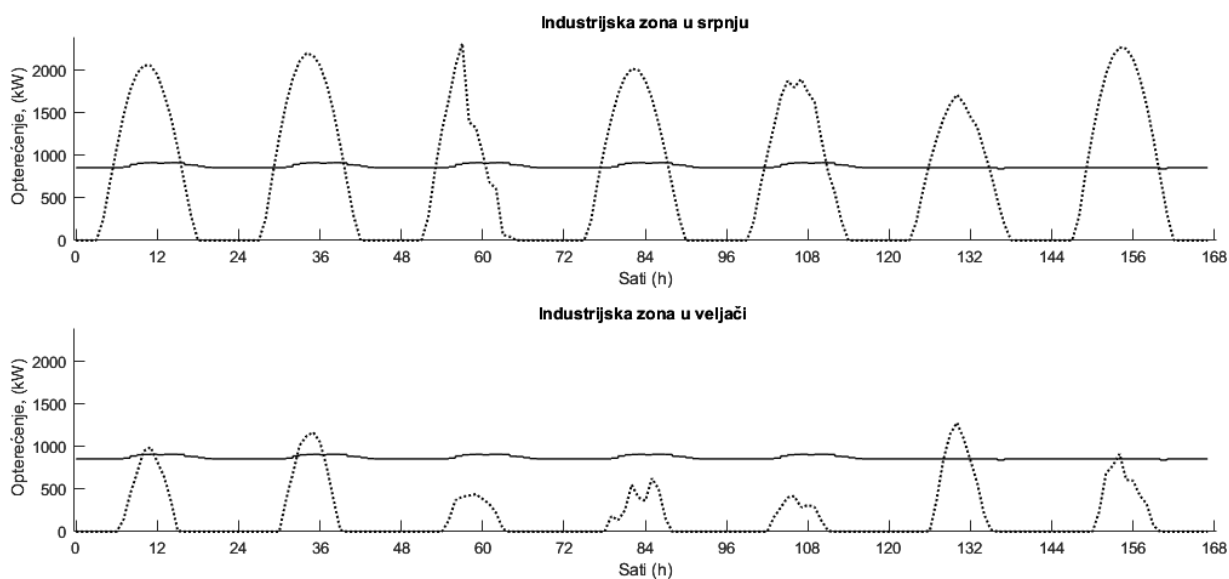
Slika 66 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, električna energija



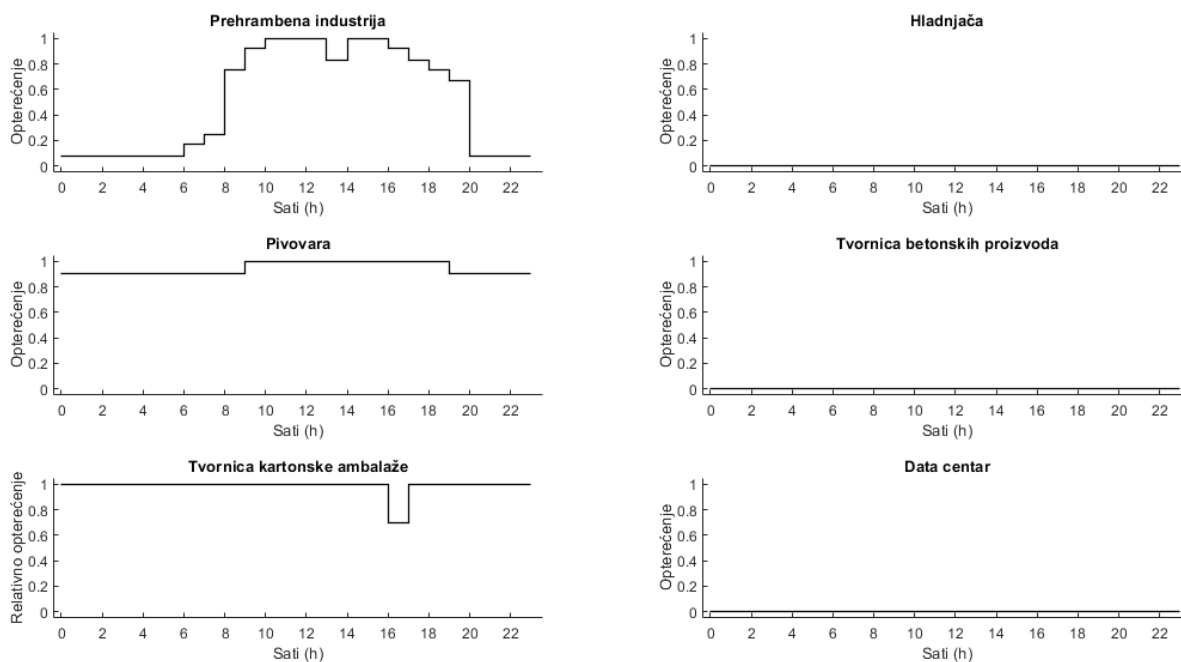
Slika 67 Apsolutna opterećenja u tjednu srpnja, električna energija



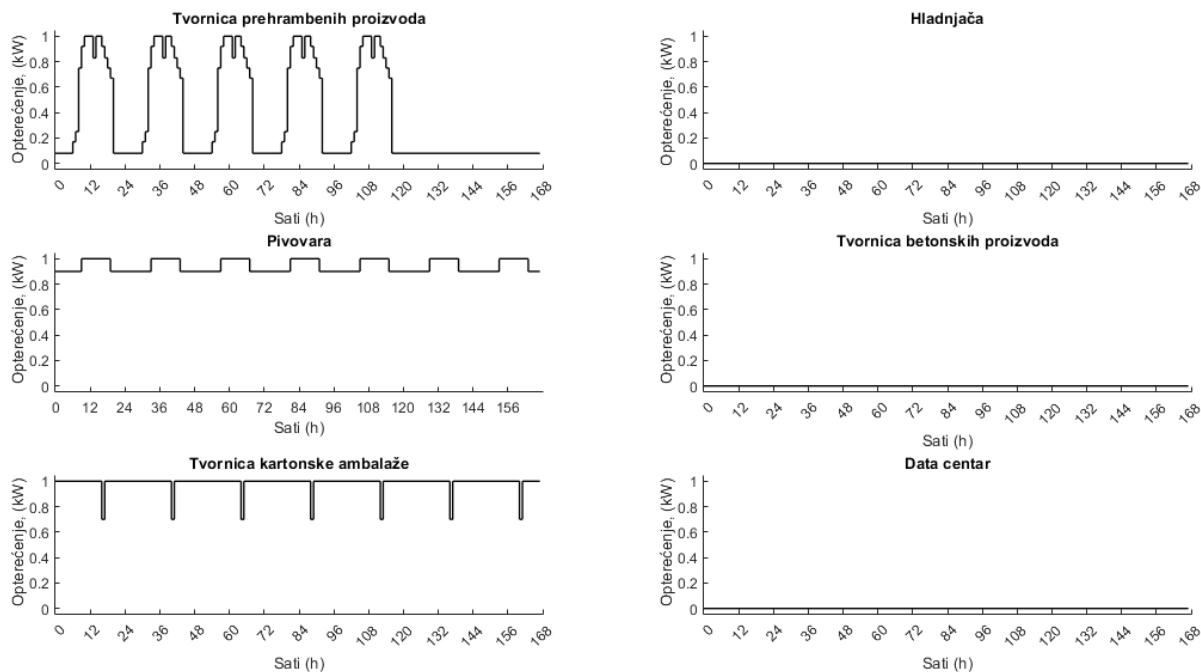
Slika 68 Apsolutno opterećenje u zoni, električna energija



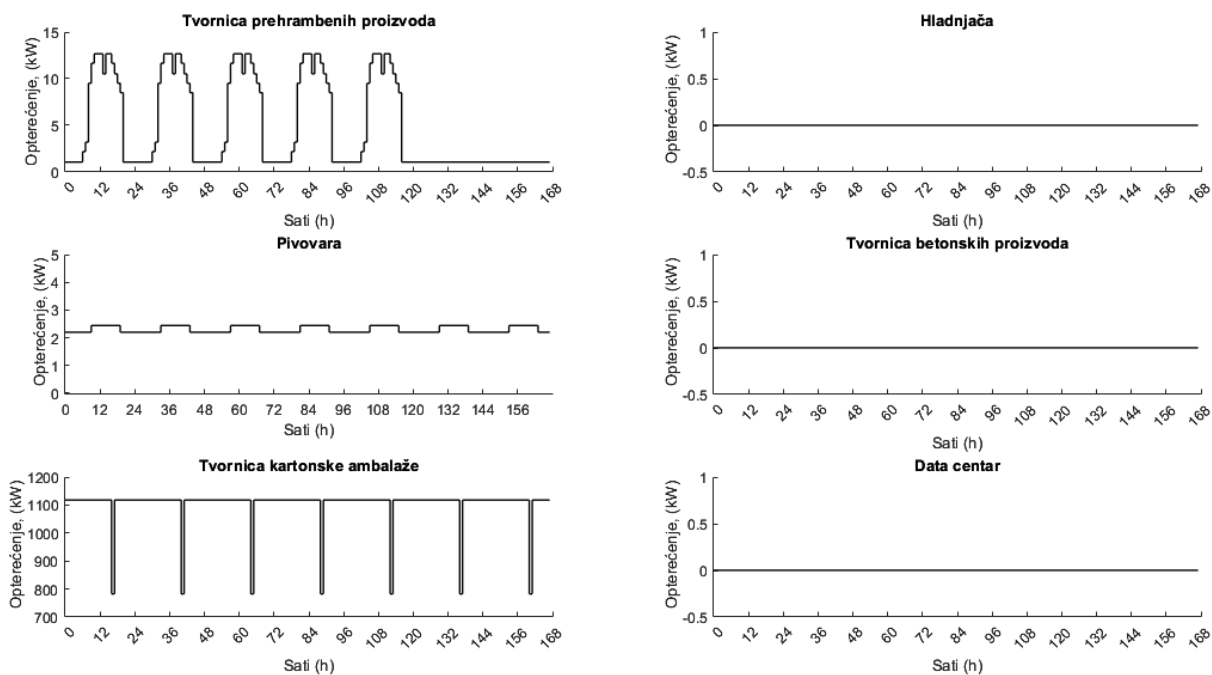
Slika 69 Apsolutno opterećenje zone i proizvodnja iz FN elektrane, električna energija



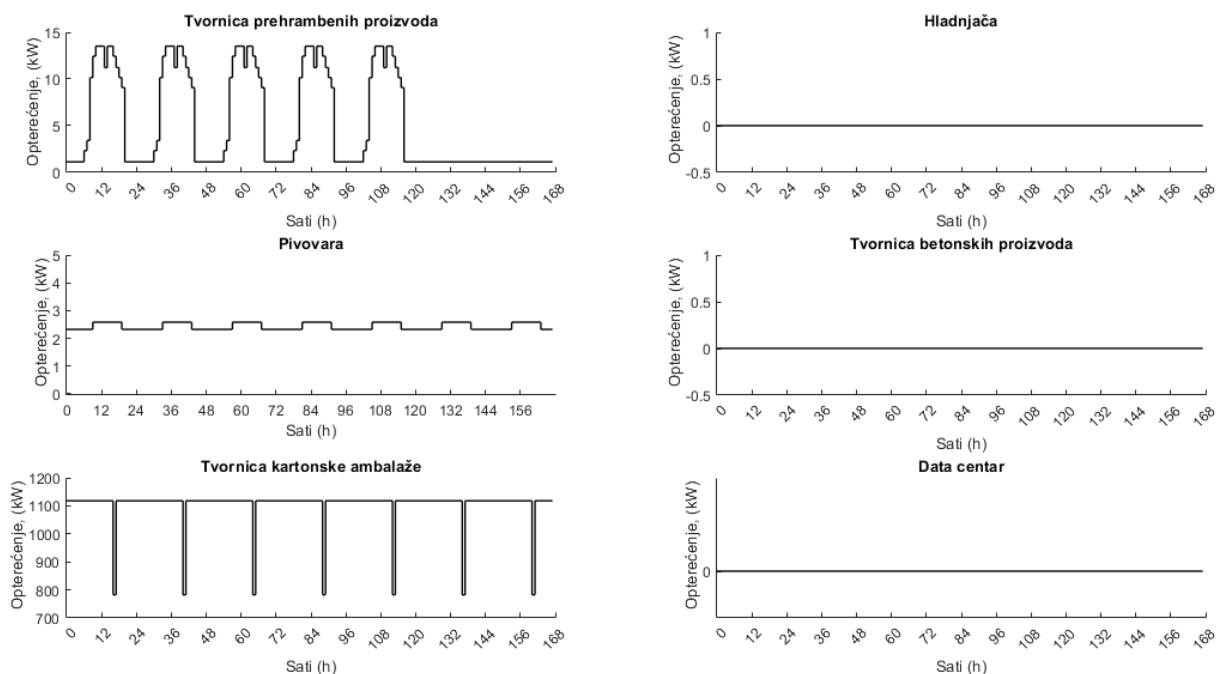
Slika 70 Relativna dnevna opterećenja, toplinska energija



Slika 71 Relativna tjedna opterećenja, toplinska energija

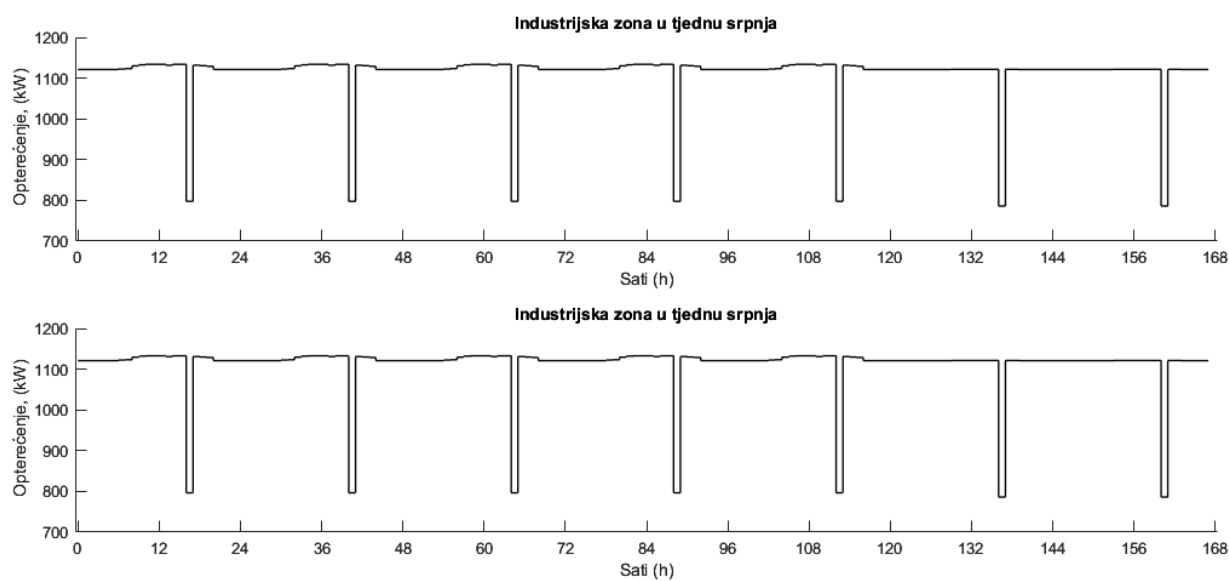


Slika 72 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, toplinska energija

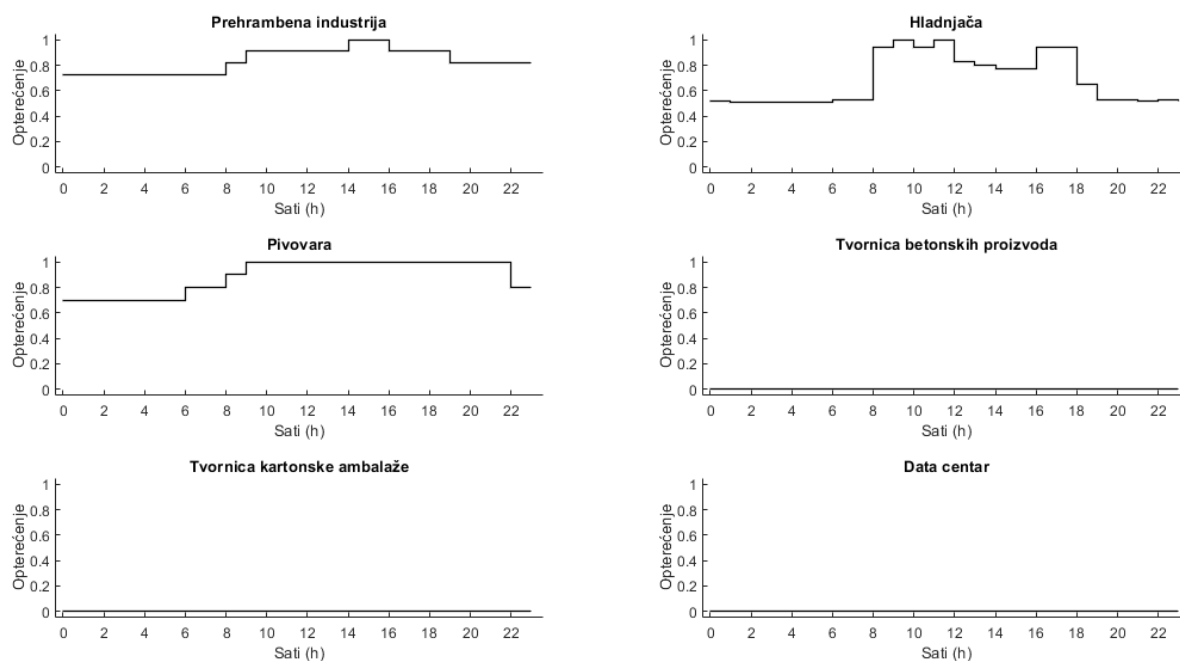


Slika 73 Apsolutna opterećenja u srpnju u tjednu srpnja

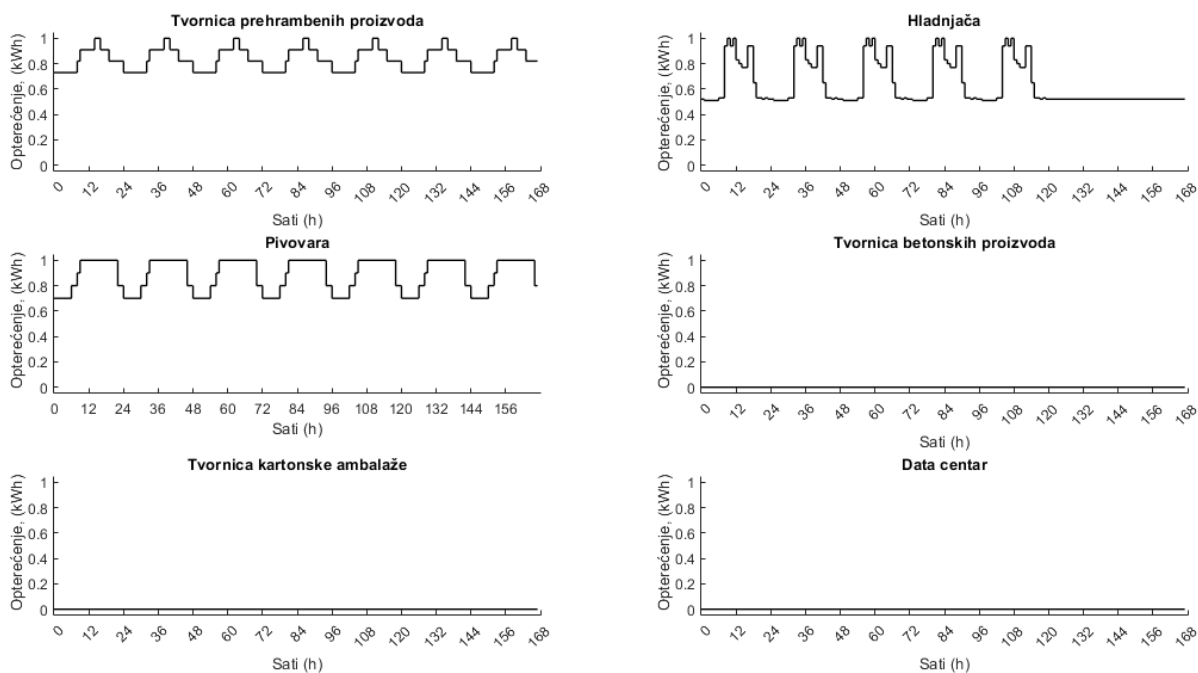




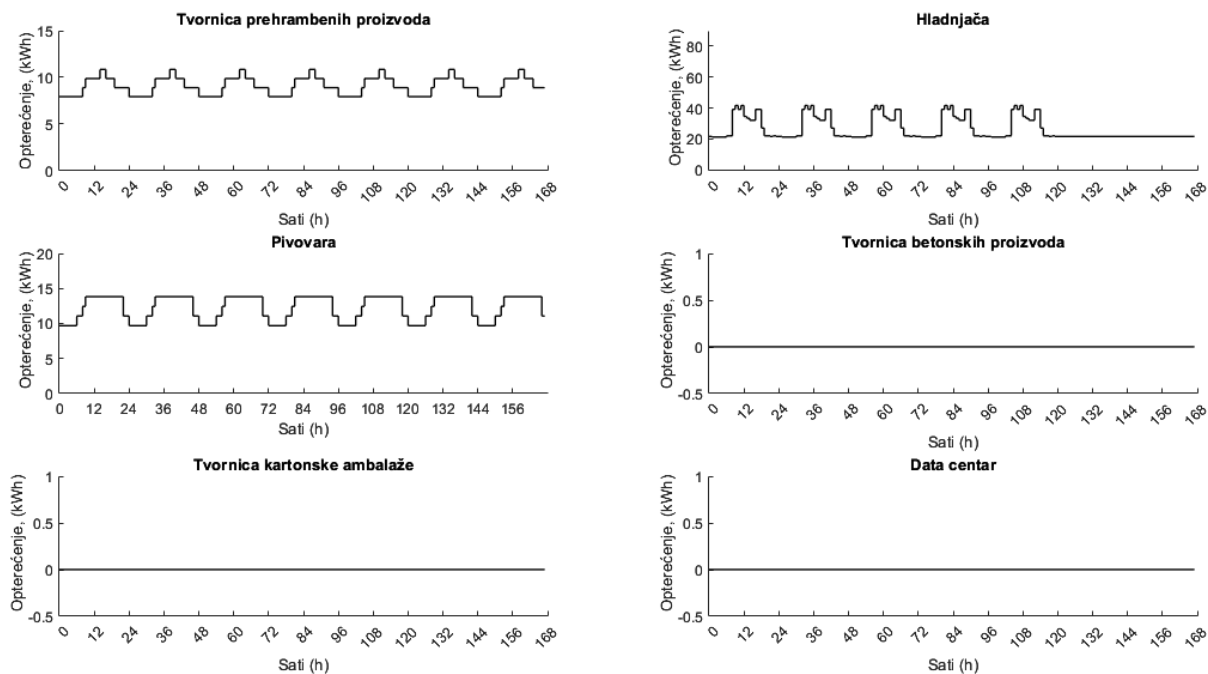
Slika 74 Apsolutno opterećenje u tjednu srpnja, toplinska energija



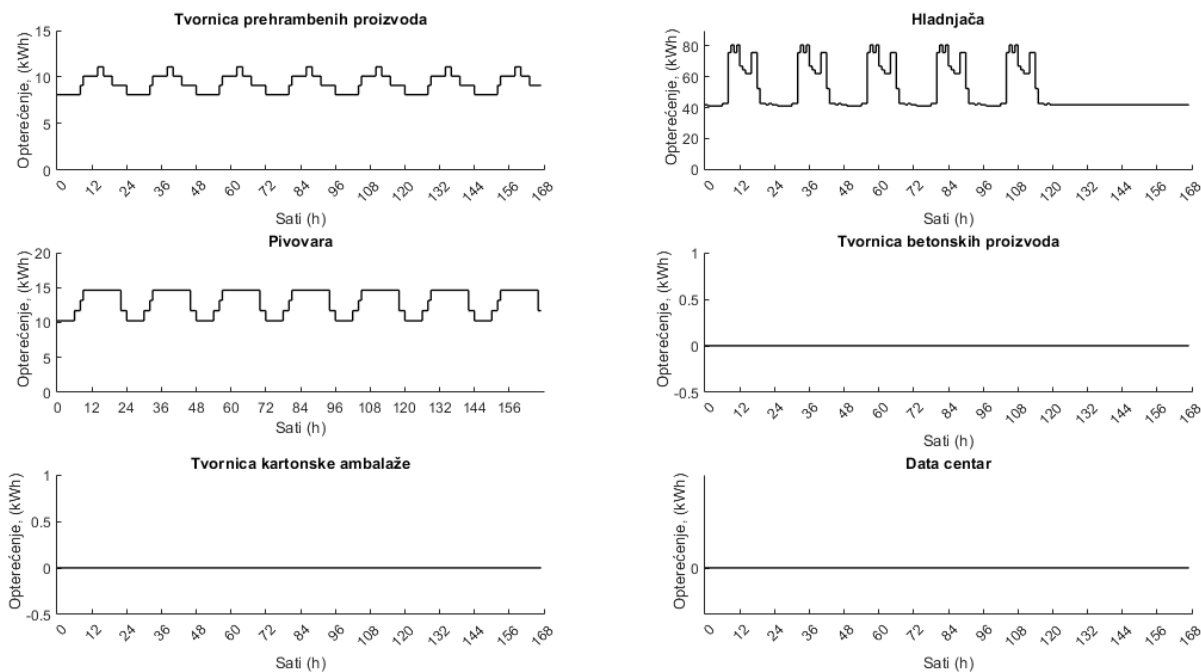
Slika 75 Relativna dnevna opterećenja, rashladna energija



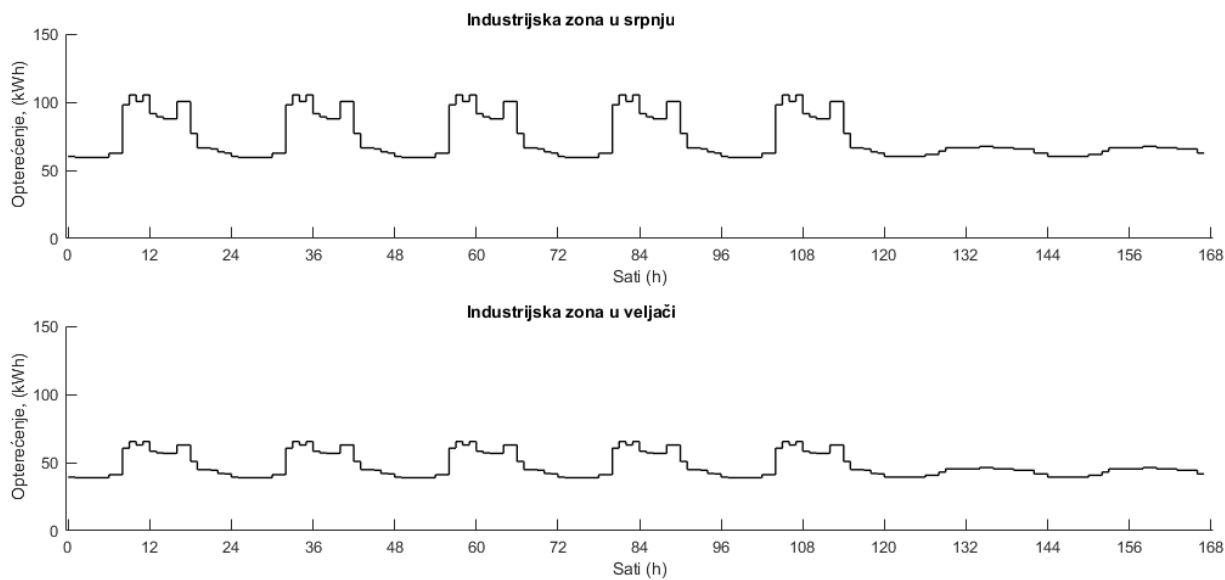
Slika 76 Relativna tjedna opterećenja, rashladna energija



Slika 77 Apsolutna opterećenja u tjednu veljače, rashladna energija



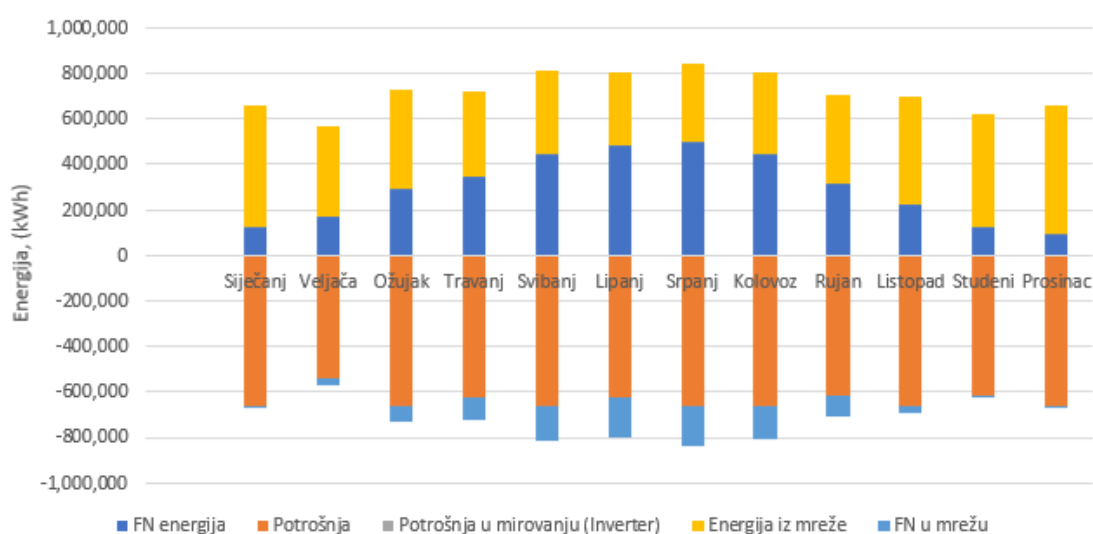
Slika 78 Apsolutna opterećenja u tjednu srpnja, rashladna energija



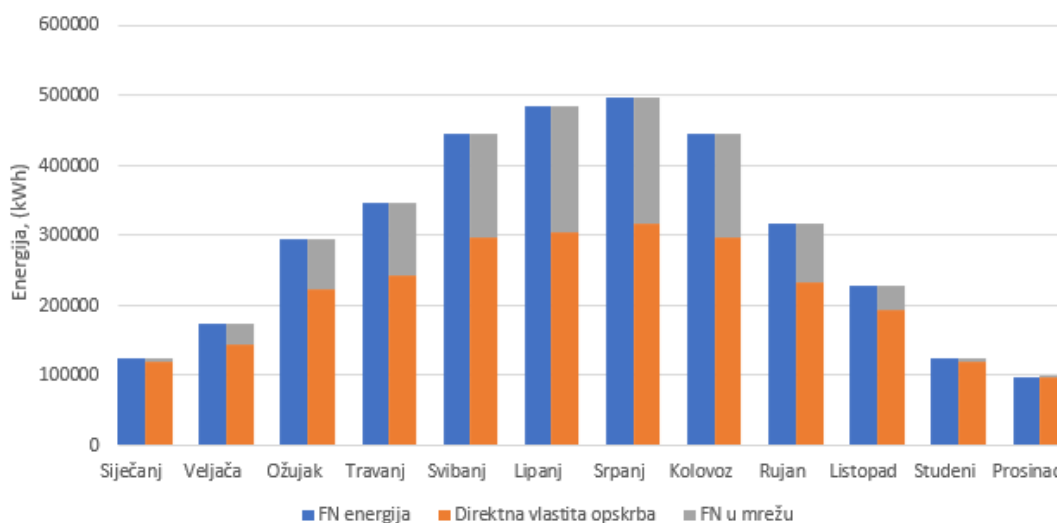
Slika 79 Apsolutno opterećenje zone, rashladna energija

## Prilog B– Rezultati simulacije modela solarnog sustava u programu PVSol

Prilog B prikazuje rezultate dobivene simulacijom modela solarnog sustava izrađenog u programu PVSol. Napravljeni model ne pretpostavlja fleksibilnu opskrbu ni računa energiju koju je moguće dobiti iz bioplinskog postrojenja. Slika 80 prikazuje koliko se energije iz fotonaponskog sustava preuzima direktno za potrošnju unutar zone, koliko se predaje u mrežu i koliko treba nadoknaditi energije iz mreže da bi se pokrile energetske potrebe zone. Slika 81 prikazuje količinu proizvedene energije iz fotonaponskog sustava usporedo s količinom preuzete energije prema mjestu preuzimanja.



Slika 80 Predviđena proizvodnja iz FN elektrane i potreba za energijom



Slika 81 Upotreba energije iz fotonapona

## Prilog C– Matlab optimizacija

Prilog C prikazuje programski kod za optimizaciju troška energetske opskrbe. Slika 82 prikazuje *fmincon* metodu za optimizaciju preko koje se poziva funkcija „*Trosak*“ i funkcija „*ogranicenja*“. Funkcija „*Trosak*“ je funkcija za koju je potrebno pronaći minimum, prikazana je slikom 83. Slikom 84 prikazana je funkcija „*ogranicenja*“ u kojoj su upisana ograničenja punjenja baterije i ograničenje jednakosti energetske potrebe i proizvodnje.



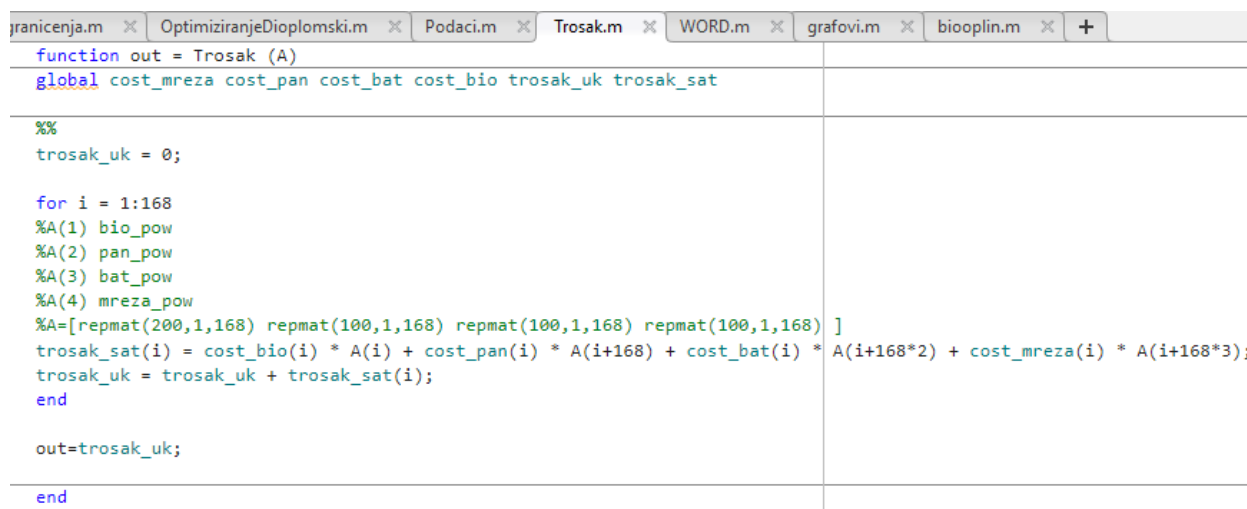
```

clear;
clc;
global uk_struja pan_p cost_mreza bat_trenutno trosak_uk bat_cap trosak_sat bio_pow

fun=@Trosak;
x0=[repmat(220,1,168) pan_p(1:168) repmat(0,1,168) repmat(100,1,168) ];
A=[];
b=[];
Aeq=[];
beq=[];
%A(1) bio_pow
%A(2) pan_pow
%A(3) bat_pow
%A(4) mreza_pow
lb=[repmat(0,1,168) repmat(0,1,168) repmat(-500,1,168) repmat(0,1,168)];
ub=[repmat(500,1,168) pan_p(1:168) repmat(500,1,168) repmat(1500,1,168)];
nonlcon=@ogranicenja;
MyValue=4*10e5;
Myit=4000;
options = optimoptions('fmincon','Display','iter','Algorithm','sqp','MaxFunctionEvaluations',MyValue,'MaxIterations',Myit);
x = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options);

```

Slika 82 Fmincon metoda



```

function out = Trosak (A)
global cost_mreza cost_pan cost_bat cost_bio trosak_uk trosak_sat

%%
trosak_uk = 0;

for i = 1:168
%A(1) bio_pow
%A(2) pan_pow
%A(3) bat_pow
%A(4) mreza_pow
%A=[repmat(200,1,168) repmat(100,1,168) repmat(100,1,168) repmat(100,1,168) ]
trosak_sat(i) = cost_bio(i) * A(i) + cost_pan(i) * A(i+168) + cost_bat(i) * A(i+168*2) + cost_mreza(i) * A(i+168*3);
trosak_uk = trosak_uk + trosak_sat(i);
end

out=trosak_uk;

end

```

Slika 83 Funkcija „*Trosak*“

```
ranicenja.m * x OptimiziranjeDiplomski.m x Podaci.m x Trosak.m x WORD.m x grafovi.m x biooplin.m x +
function [c,ceq]= ogranicenja(x)

global uk_struja bat_capbat_trenutno

bat_trenutno(1)=bat_cap*0.60;

for i=1:168
%A(1) bio_pow
%A(2) pan_pow
%A(3) bat_pow
%A(4) mreza_pow
    ceq(i)=x(i)+x(i+168)+x(i+168*2)+x(i+168*3)-uk_struja(i);

    bat_trenutno(i + 1) = bat_trenutno(i) - x(i+168*2);

    c(i)= ((atan( (bat_trenutno(i+1) - 1.557 * 1607 * bat_cap / 5000) / (1607 *bat_cap / 5000) )) ^2 -1) * 100;
    % c(i)=bat_cap; %%kad nema baterije
end
```

Slika 84 Funkcija „ogranicenja“

## **Prilog D – Rezultati simulacije modela fleksibilne opskrbe električnom energijom**

U ovom prilogu prikazani su rezultati modela optimizacije fleksibilne opskrbe električnom energijom industrijske zone. Na svakoj od sljedećih slika redom su prikazani:

- dijagram upravljanja opskrbom zone,
- dijagram opskrbe zone,
- dijagram neiskorištene dostupne snage unutar zone,
- dijagram troškova,
- dijagram napunjenosti baterije.

Dijagram upravljanja opskrbom prikazuje kako je potrebno voditi upravljanje da bi se ostvarili minimalni troškove za dani tjedan. Dijagram opskrbe zone prikazuje u kojem trenutku koja snaga i iz kojeg izvora se koristi za opskrbu zone. Dijagram neiskorištene dostupne snage unutar zone prikazuje koliko je snage i iz kojeg izvora dostupno za trgovanje van zone ili pohranu. Dijagram troškova na lijevoj ordinati prikazuje veličinu troška tokom određenog sata dok na desnoj ordinati je prikazana cijena električne energije koju je moguće dobiti iz mreže. Posljednji dijagram pokazuje trenutno stanje napunjenosti baterije.

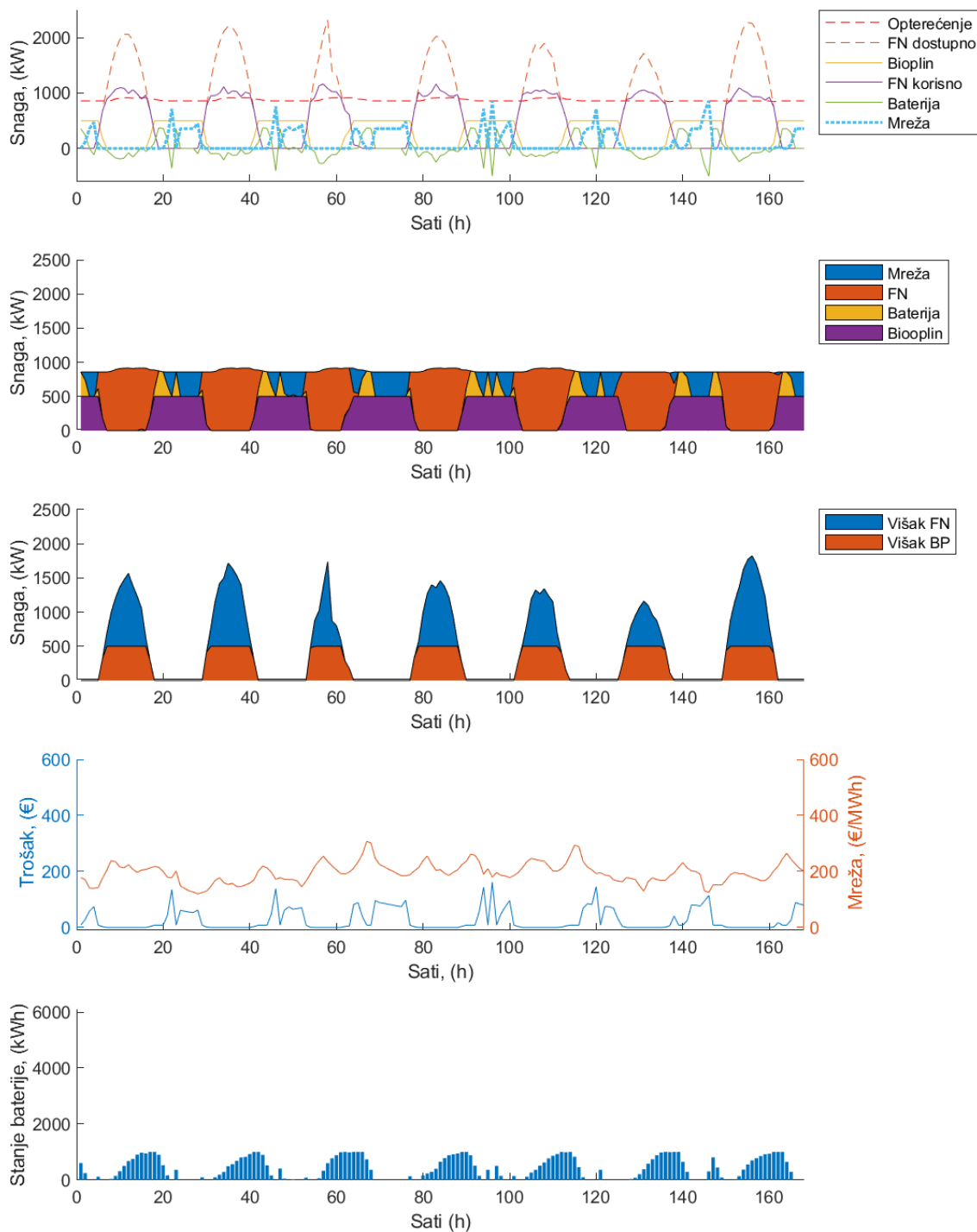
Slike 85 i 86 prikazuju rezultate modela u slučaju instalirane baterije veličine 1000 kWh u tjednu mjeseca srpnja i mjeseca veljače.

Slike 87 i 88 prikazuju rezultate modela u slučaju instalirane baterije veličine 2000 kWh u tjednu mjeseca srpnja i mjeseca veljače.

Slike 89 i 90 prikazuju rezultate modela u slučaju instalirane baterije veličine 3000 kWh u tjednu mjeseca srpnja i mjeseca veljače.

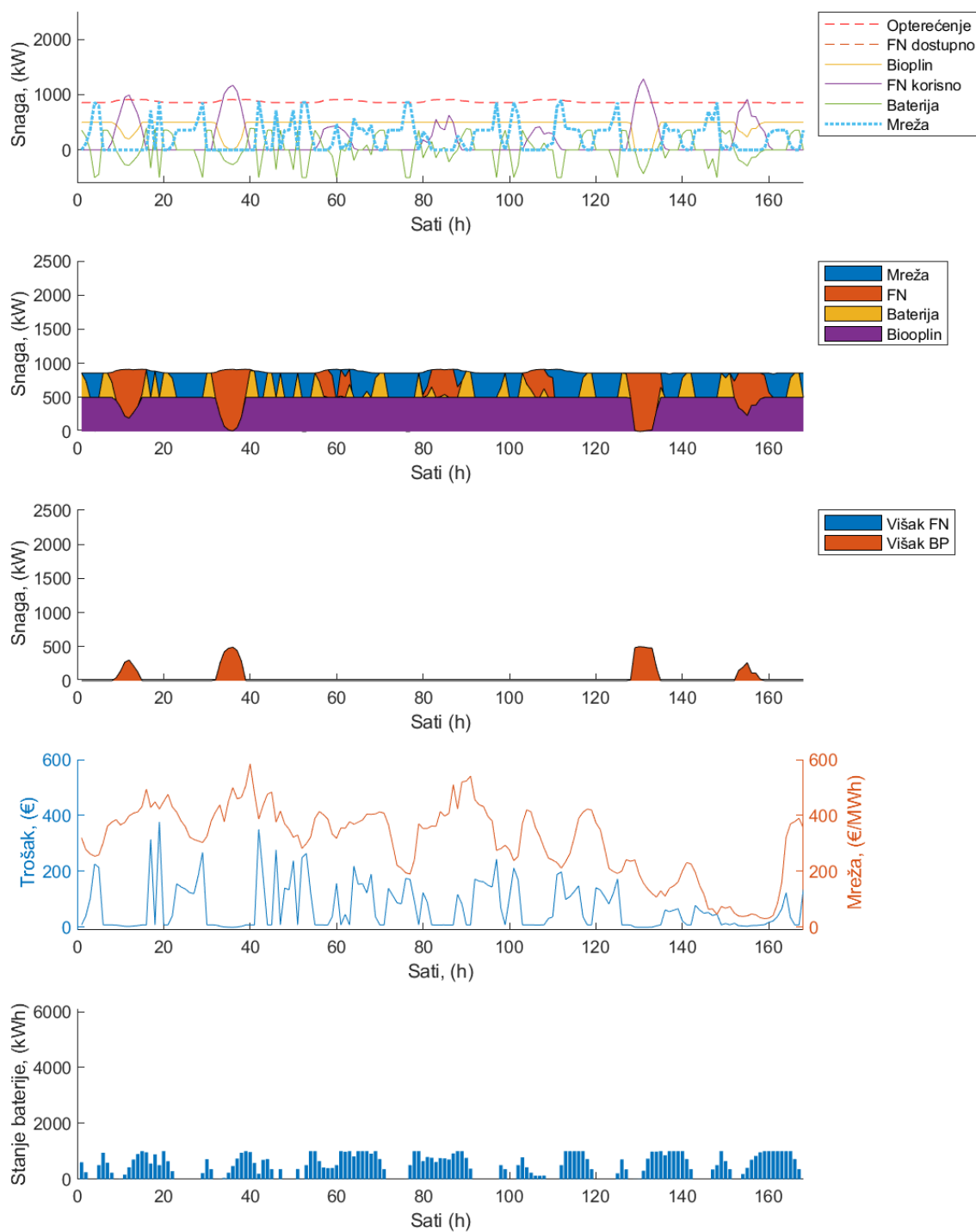
Slike 91 i 92 prikazuju rezultate modela u slučaju instalirane baterije veličine 4000 kWh u tjednu mjeseca srpnja i mjeseca veljače.

Slike 93 i 94 prikazuju rezultate modela u slučaju instalirane baterije veličine 6000 kWh u tjednu mjeseca srpnja i mjeseca veljače.

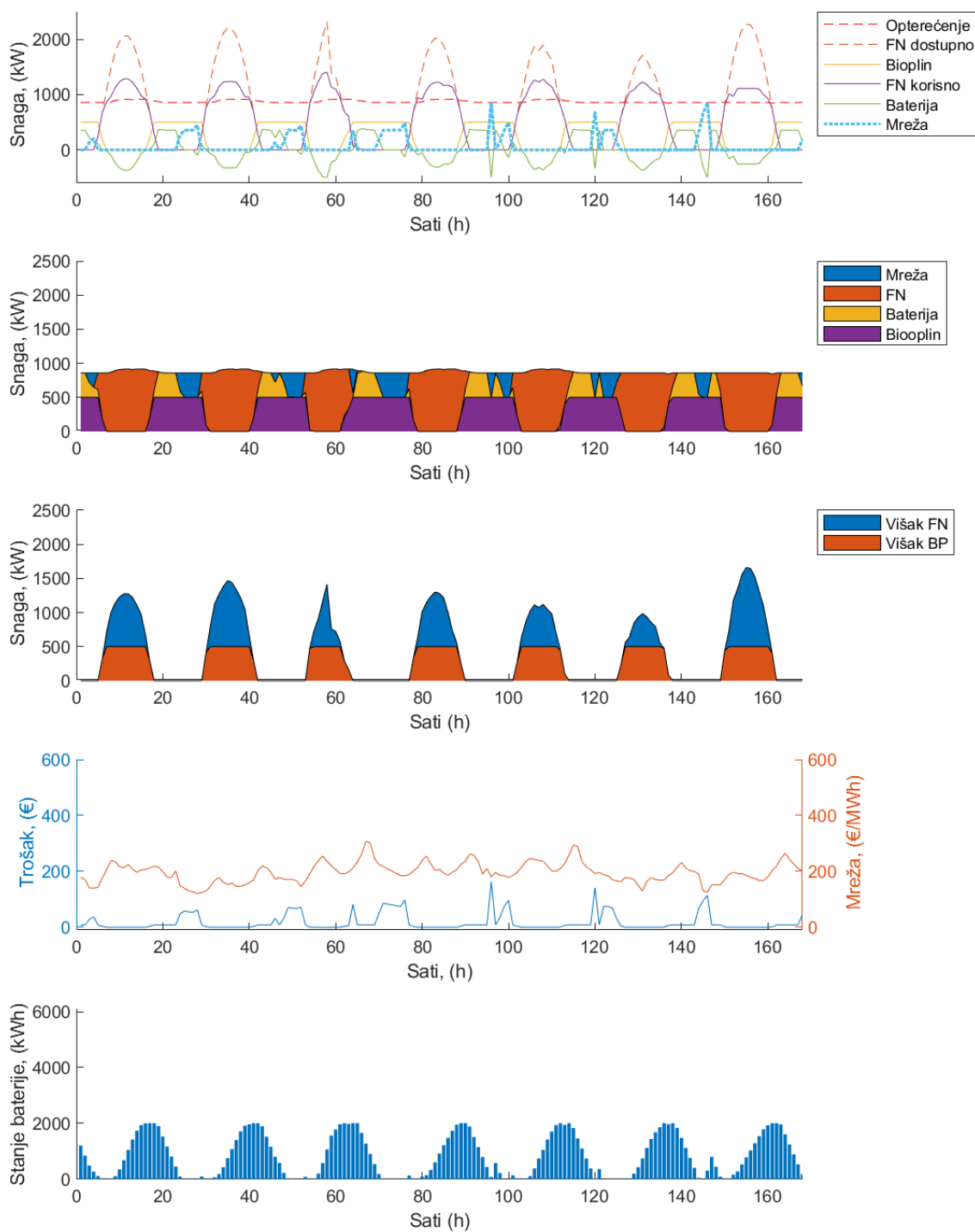


Slika 85 Srpanj, bat = 1000 kWh

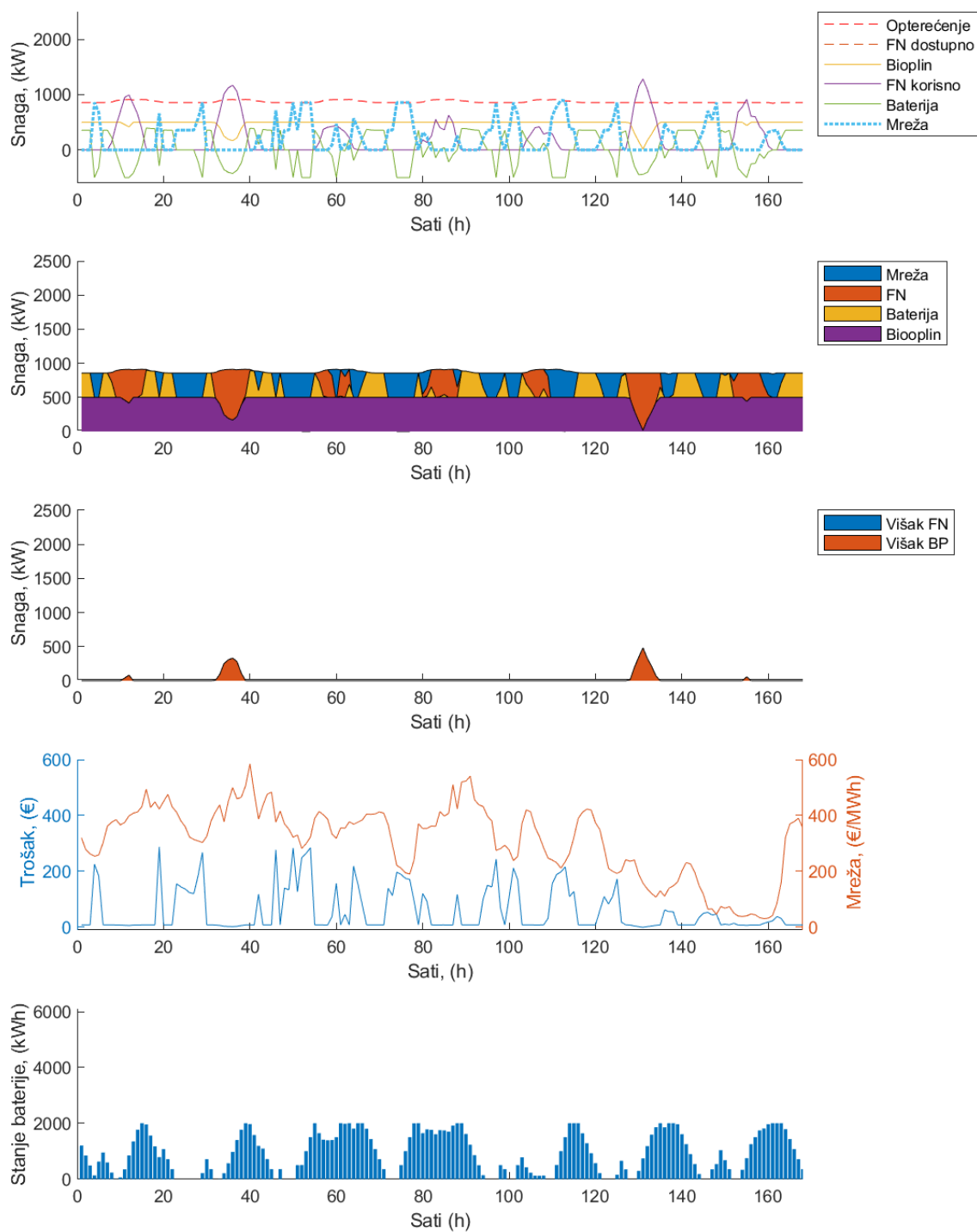




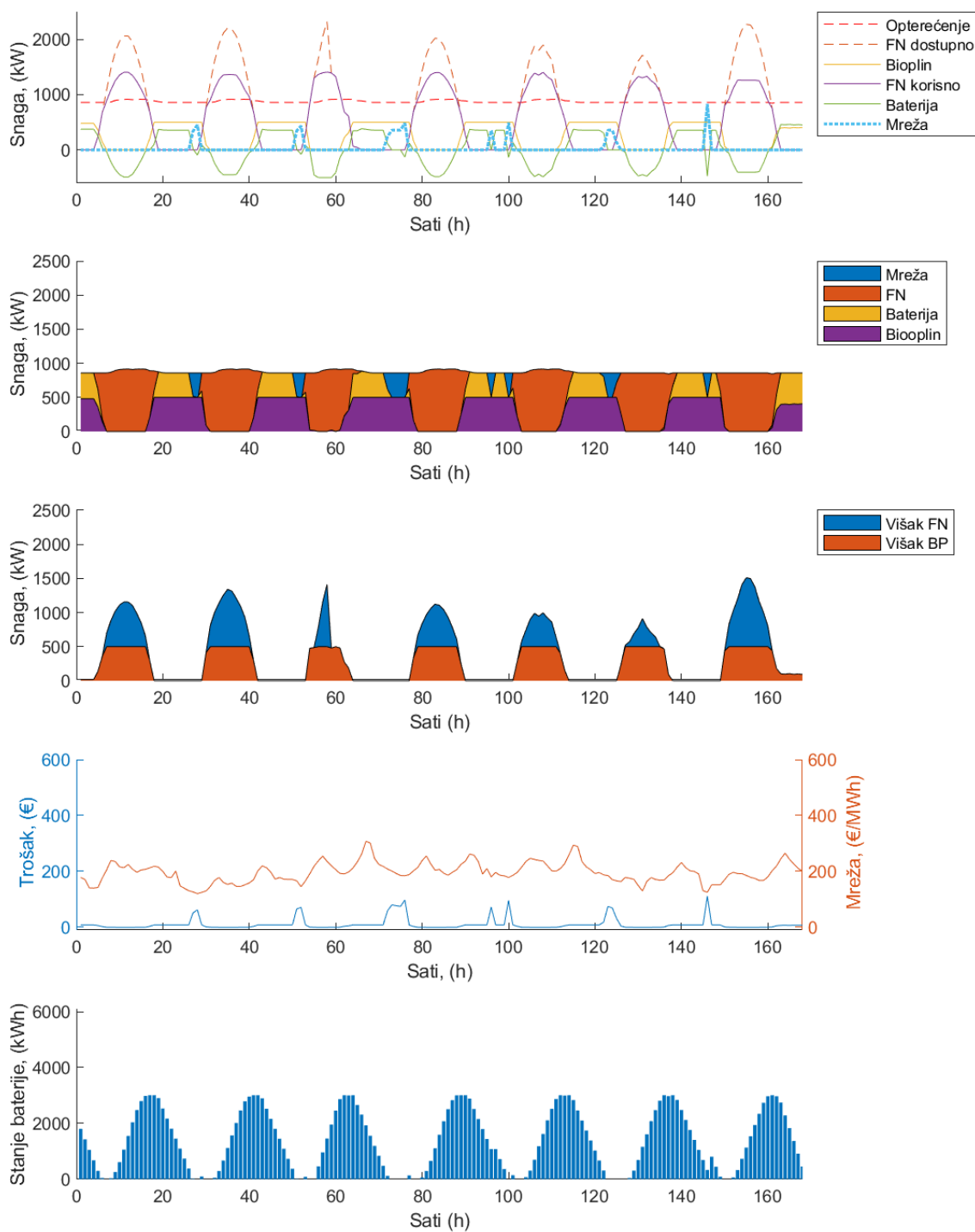
Slika 86 Veljača, bat = 1000 kWh



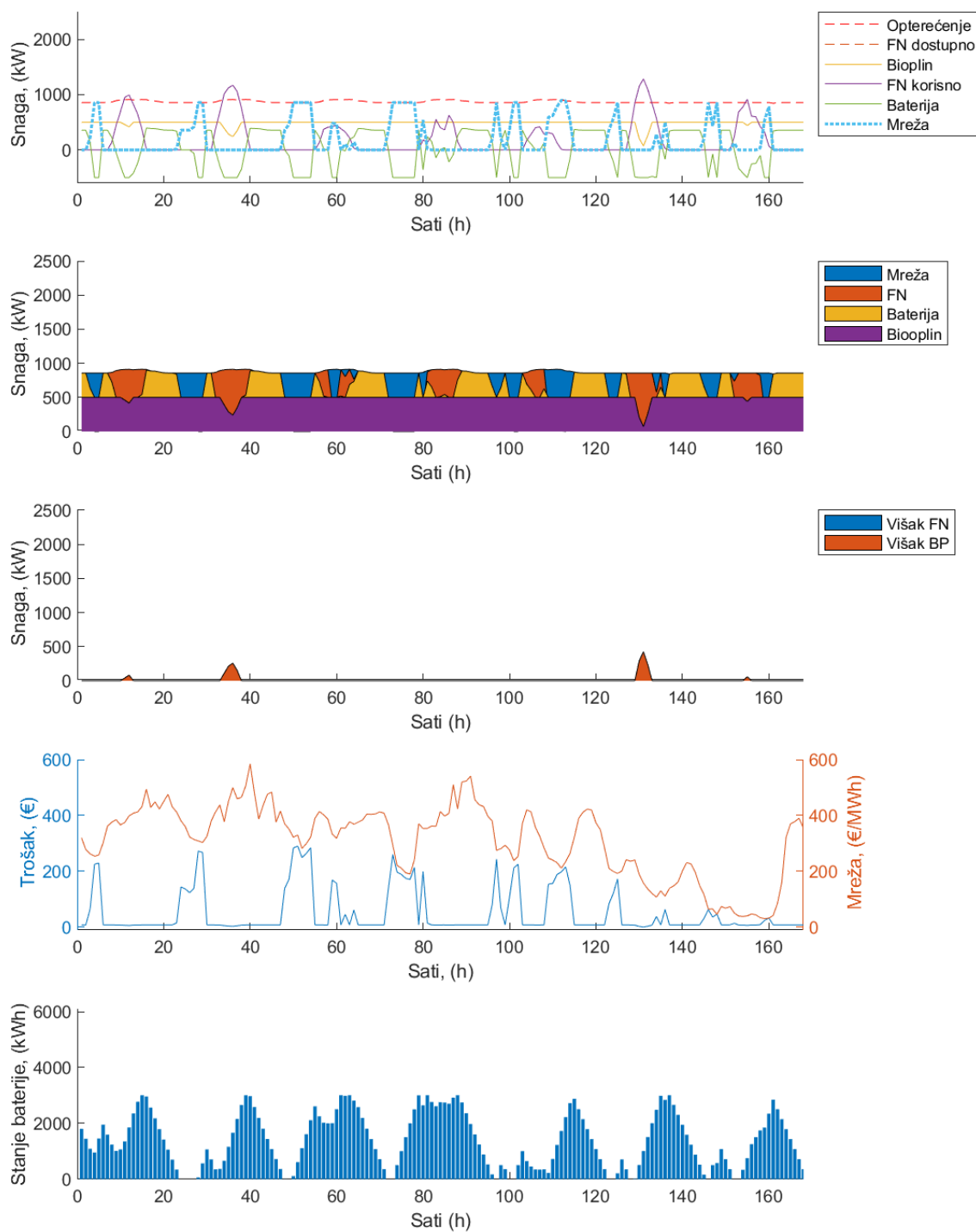
Slika 87 Srpanj, bat = 2000 kWh



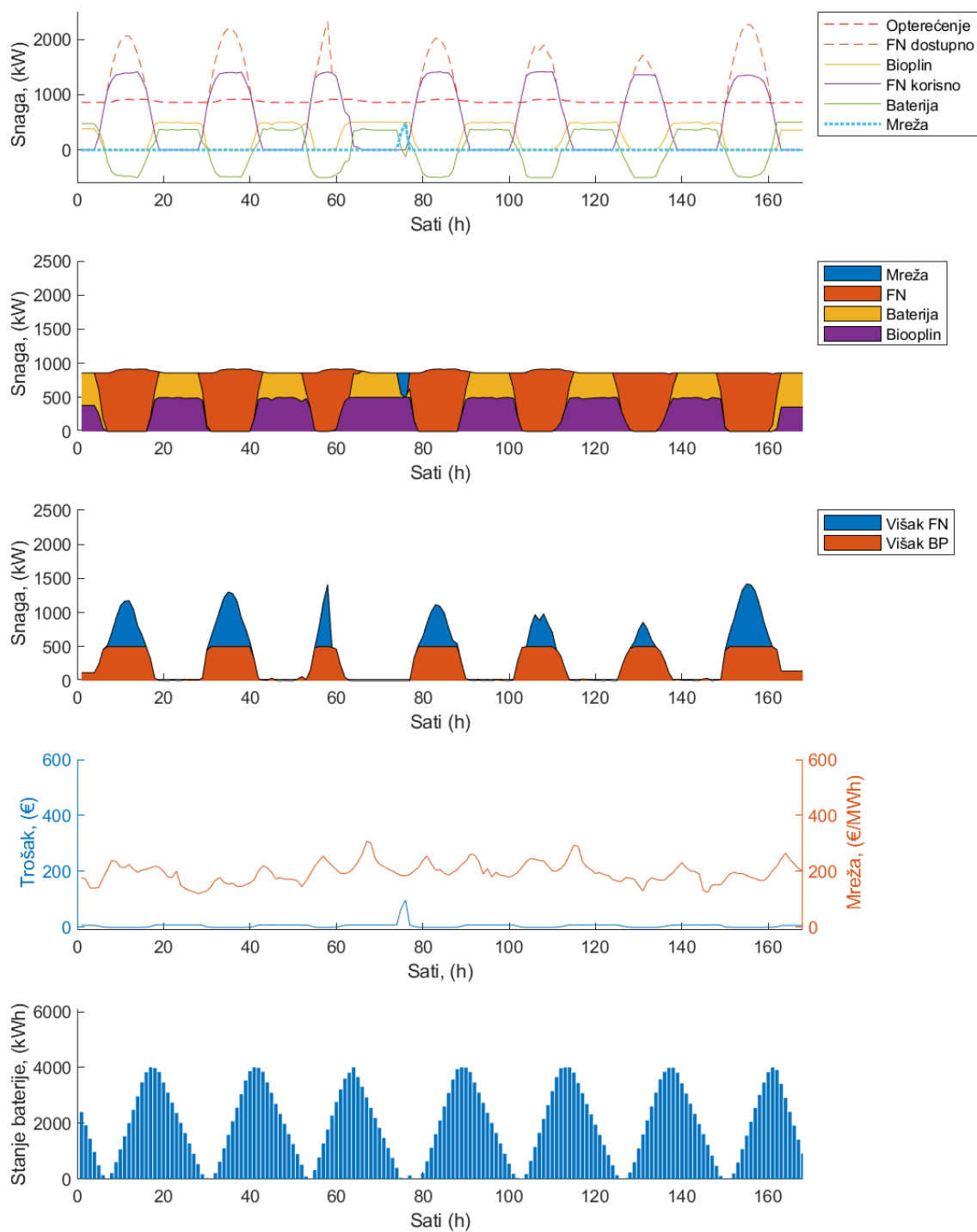
Slika 88 Veljača, bat = 2000 kWh



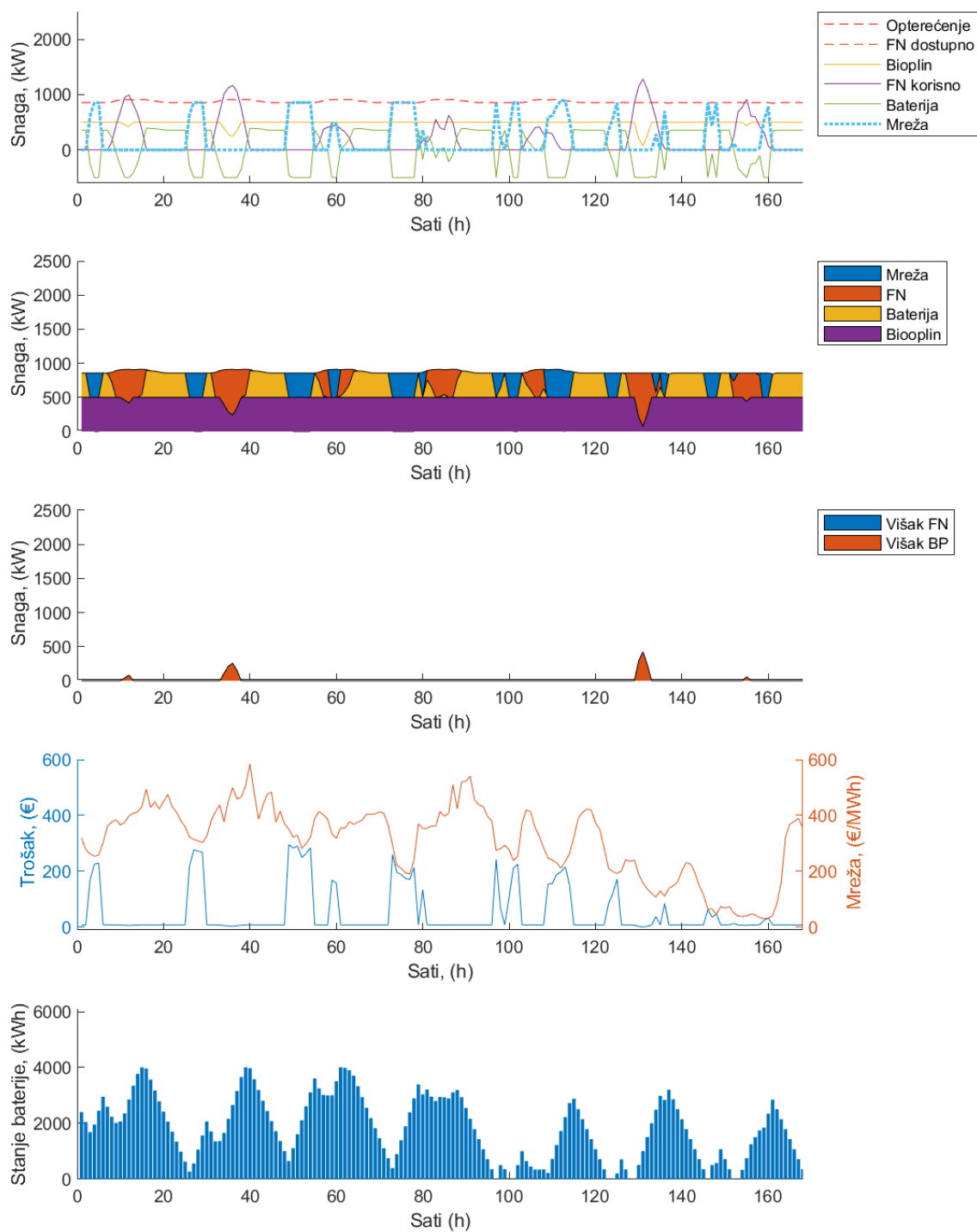
Slika 89 Srpanj, bat = 3000 kWh



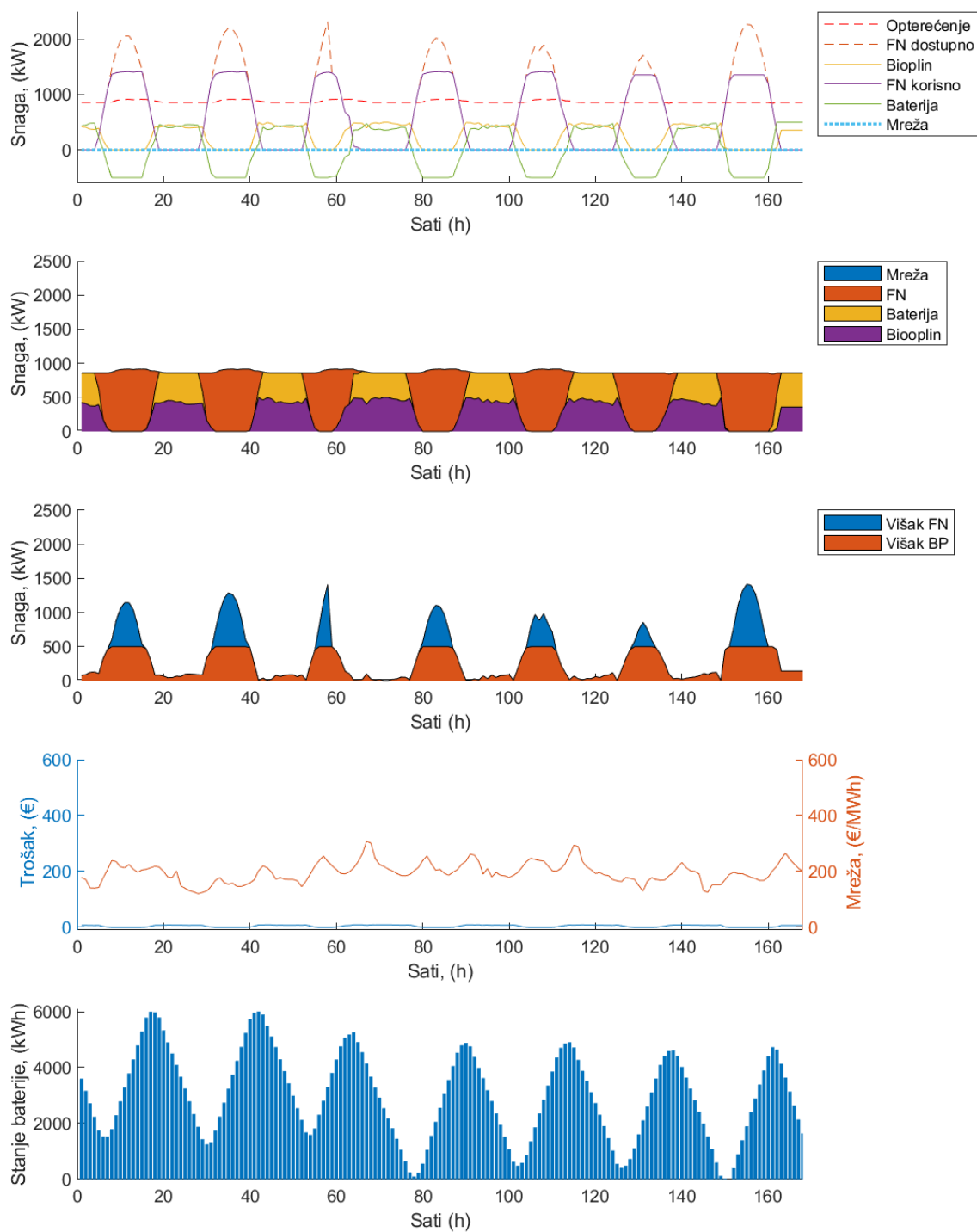
Slika 90 Veljača, bat = 3000 kWh



Slika 91 Srpanj, bat = 4000 kWh

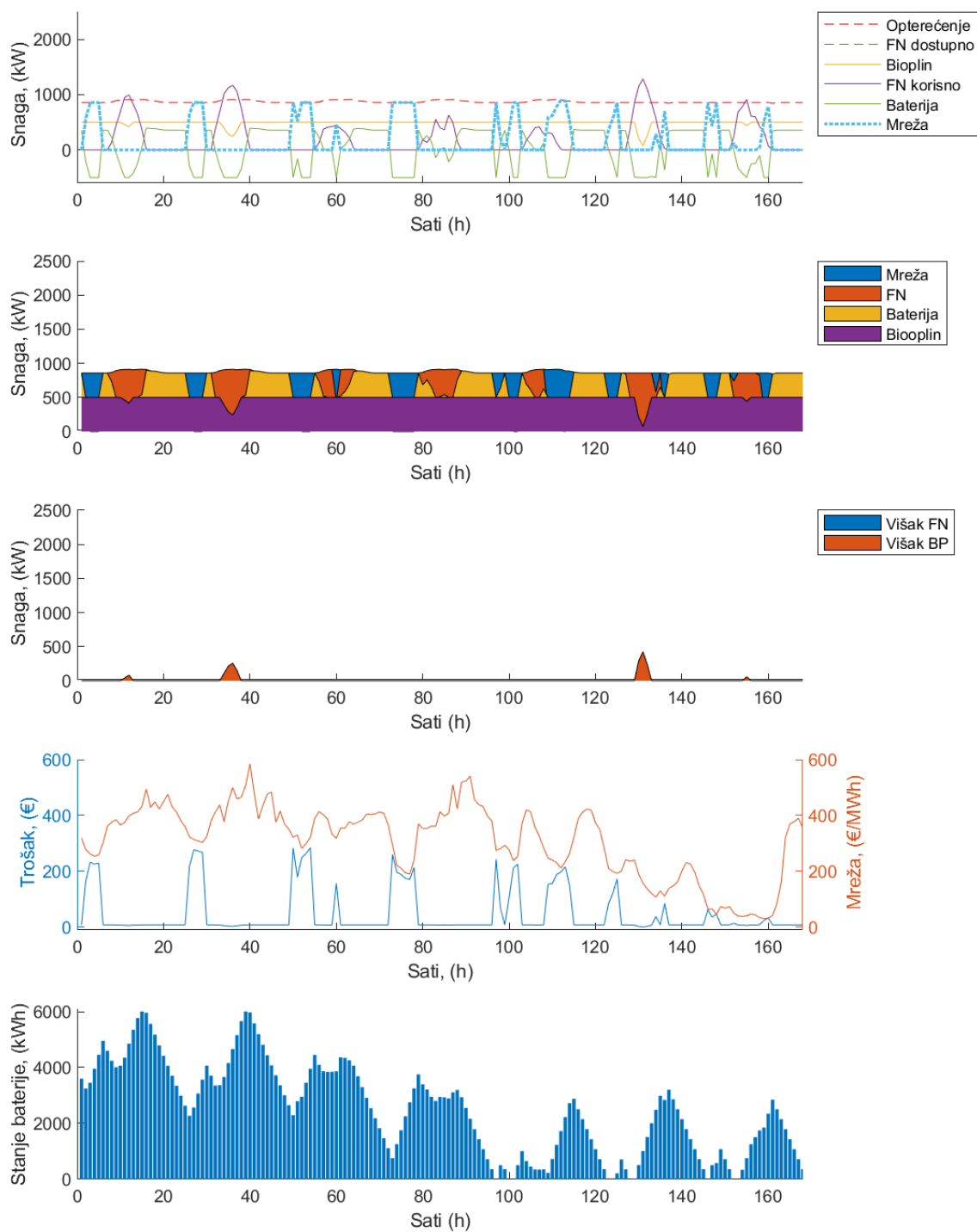


Slika 92 Veljača, bat = 4000 kWh



Slika 93 Srpanj, bat = 6000 kWh





Slika 94 Veljača, bat = 6000 kWh