

# Modeliranje fleksibilnih energetske zajednice

---

Milas, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:215754>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 80

# MODELIRANJE FLEKSIBILNIH ENERGETSKIH ZAJEDNICA

Ivan Milas

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 80

# MODELIRANJE FLEKSIBILNIH ENERGETSKIH ZAJEDNICA

Ivan Milas

Zagreb, lipanj 2024.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 80

Pristupnik: **Ivan Milas (0036525292)**  
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija  
Profil: Elektroenergetika  
Mentor: prof. dr. sc. Marko Delimar

Zadatak: **Modeliranje fleksibilnih energetske zajednice**

### Opis zadatka:

Europska unija podupire formiranje energetske zajednice kao jedan od načina za povećanje udjela obnovljivih izvora energije i smanjenje ukupnih energetske troškova, dok time istovremeno potiče krajnje korisnike kao aktivne sudionike na tržištu električne energije. Energetske zajednice često uključuju različite potrošače, poput kućanstava i poduzetništava, koji posjeduju fotonaponske elektrane i baterijske spremnike te upravljive električne uređaje. Vaš je zadatak, u teorijskom dijelu, napraviti pregled modela za upravljanje energetske zajednicama te modela energetske sustava korištenih u zajednicama. Naglasak stavite na modele upravljanja potrošnjom pojedinih članova te cijele energetske zajednice. U praktičnom dijelu rada, vaš je zadatak napraviti model upravljanja energetske zajednicom čiji članovi koriste fotonaponske elektrane, baterijske spremnike te upravljive uređaje poput dizalica topline i električnih vozila. Model je potrebno evaluirati na karakterističnim scenarijima potrošnje i proizvodnje električne energije te interpretirati kako profili potrošnje i cijene električne energije (za kućanstva ili poduzetništvo) utječu na fleksibilnost i troškove električne energije zajednice.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.



Sadržaj	
Uvod .....	10
1. Energetska zajednica.....	12
1.1. Energetske zajednice u svijetu.....	12
1.2. Energetske zajednice u Hrvatskoj .....	13
2. Pregled modela energetske zajednice .....	15
2.1. Podjela s obzirom na ekonomski model .....	15
2.2. Podjela modela s obzirom na model naplaćivanja električne energije i ostalih usluga .....	17
2.3. Podjela modela s obzirom na funkcije cilja energetske zajednice 18	
2.4. Podjela modela s obzirom na modeliranje energetske sustava .	18
2.4.1. Modeli solarnih panela .....	19
2.4.2. Modeli baterijskih spremnika .....	19
2.4.3. Modeli upravljanja potrošnjom.....	19
3. Model Energetske zajednice .....	22
3.1. Cilj modela .....	22
3.2. Korišteni programi .....	22
3.3. Izgled zajednice.....	23
3.4. Funkcija cilja.....	23
3.5. Ekonomski model zajednice .....	24
3.5.1. Model P2P trgovanja.....	25
3.6. Model baterijskog sustava.....	26
3.7. Model Solarnih panela.....	28
3.8. Model potrošnje.....	29
3.8.1. Model dizalice topline (upravljiva potrošnja tipa A).....	29

3.8.2.	Model uređaja s pomičnim vremenom potrošnje (potrošnja tipa B)	34
3.8.3.	Model neupravljive potrošnje (uređaji tipa C)	35
4.	Rezultati simulacije	36
4.1.	Simulacija modela sa svim prisutnim elementima (Scenarij 1)	36
4.1.1.	Scenarij 1: Dizalica topline	37
4.1.2.	Scenarij 1: Trošila tipa B	39
4.1.3.	Scenarij 1: Baterijski spremnik	40
4.1.4.	Scenarij 1:P2P trgovanje	41
4.1.5.	Scenarij 1: Analiza potrošnje	43
4.2.	Scenarij 2: Simulacija bez upravljive potrošnje	45
4.2.1.	Izmjene u odnosu na Scenarij 1	46
4.3.	Scenarij 3:Simulacija bez baterijskog spremnika i upravljive potrošnje	48
4.4.	Simulacije u različitim godišnjim dobima	50
4.5.	Simulacija s trotarifnim naplaćivanjem električne energije	52
4.6.	Usporedba rezultata	54
	Zaključak	56
	Literatura	57
	Sažetak	59
	Abstract	60
	Skraćenice	61
	Dodatak A	62

## Popis tablica

Tablica 3.1: Korišteni skupovi u modelu.....	23
Tablica 3.2: Kontinuirane i binarne varijable ekonomskog modela .....	24
Tablica 3.3: Parametri ekonomskog modela.....	24
Tablica 3.4: Kontinuirane i binarne varijable i parametri modela P2P trgovanja .....	25
Tablica 3.5: Kontinuirane i binarne varijable modela baterijskog spremnika .....	27
Tablica 3.6: Parametri modela baterijskog spremnika .....	27
Tablica 3.7: Parametri za izračun proizvodnje PV sustava i temperature zraka .....	29
Tablica 3.8: Kontinuirane i binarne varijable modela dizalice topline .....	32
Tablica 3.9: Parametri modela dizalice topline.....	32
Tablica 3.10: Kontinuirane i binarne varijable modela potrošnje tipa B ....	34
Tablica 3.11: Parametri modela potrošnje tipa B .....	35
Tablica 3.12: Kontinuirane varijable potrebne za postavljanje uvjeta balansa energije .....	36
Tablica 4.1: Parametri modela Scenarija 1. ....	37
Tablica 4.2: Promijenjeni parametri za modeliranje potrošnje u Scenariju 2 .....	45
Tablica 1: Parametri temperatura rada dizalica topline za svaku simulaciju .....	62
Tablica 2: Parametri mogućih vremena rada uređaja tipa B za svaku simulaciju .....	63



---

## Popis slika

Slika 2.1: Podjela energetske zajednice s obzirom na ekonomski model [4]	16
Slika 2.2: Vrste odziva potrošnje [5]	20
Slika 4.1: Atmosferska temperatura oko svakog kućanstva tokom zime..	38
Slika 4.2: Grafovi rezultata simulacije rada dizalice topline za Scenarij 1	39
Slika 4.3: Vrijeme rada uređaja tipa B za Scenarij 1	40
Slika 4.4: Grafovi aktivnost punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika i njegovo stanje napunjenosti za Scenarij 1	41
Slika 4.5: Proizvodnja električne energije iz solarnih panela	42
Slika 4.6: P2P razmjena električne energije za Scenarij 1	43
Slika 4.7: Graf ukupne potrošnje električne energije energetske zajednice za Scenarij 1	44
Slika 4.8: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču za Scenarij 1	45
Slika 4.9: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču u Scenariju 2	46
Slika 4.10: Graf potrošnje električne energije dizalice topline za Scenarij 2	47
Slika 4.11: P2P razmjena električna energija Scenarij 2	48
Slika 4.12: Graf ukupne potrošnje električne energije svakog člana energetske zajednice u Scenariju 3	49
Slika 4.13: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču u Scenariju 3	49
Slika 4.14: Temperatura zraka i proizvodnja iz PV-a za svako kućanstvo u svakom karakterističnom godišnjem dobu	50
Slika 4.15: Razmjena električne energije P2P između kućanstava za vrijeme prijelaznog razdoblja	51
Slika 4.16: Razmjena električne energije P2P između kućanstava za vrijeme ljeta	52
Slika 4.17: Električna energija preuzeta od opskrbljivača pri trotarifnom naplaćivanju električne energije	53

---

Slika 4.18: Potrošnja električne energije dizalice topline pri trotarifnom naplaćivanju električne energije .....	53
Slika 4.19: Stanje napunjenosti baterijski spremnika kroz dan pri trotarifnom naplaćivanju električne energije .....	54
Slika 4.20: Usporedba ukupnih troškova energetske zajednice s obzirom na modele naplaćivanja, godišnja doba i Scenarije.....	55

---

## Uvod

Europska unija podupire formiranje energetske zajednice kao metodu za povećanje udjela obnovljivih izvora energije i smanjenje ukupnih energetske troškova. Ova inicijativa također potiče krajnje korisnike da postanu aktivni sudionici na tržištu električne energije. Energetske zajednice obično se sastoje od različitih potrošača, poput kućanstava i poduzetništava, koji posjeduju solarne panele, sustave za pohranu energije i upravljive električne uređaje.

Energetske zajednice dobivaju na važnosti zbog sve veće potražnje za električnom energijom i unaprjeđenja tehnologija distribuiranih izvora energije (DIE). DIE, kao što su solarni paneli i vjetroturbine, pružaju održiv način proizvodnje električne energije, ali također postavljaju izazove zbog svoje nepredvidljivosti i intermitentne prirode. Ova nepredvidljivost može dovesti do nestabilnosti mreže i zagušenja vodova osobito kada vršna potražnja za električnom energijom ne odgovara vršnoj proizvodnji iz obnovljivih izvora.

Kako bi se pripomoglo rješavanju ovog izazova, energetske zajednice mogu posjedovati upravljivu potrošnju i sustave za pohranu energije. Upravljiva potrošnja daje mogućnost korištenja strategija za utjecanje na način na koji potrošači koriste električnu energiju, s ciljem uštede i veće učinkovitosti. Sustavi za pohranu energije, najčešće su to baterijski spremnici, omogućuju pohranu viška energije proizvedene iz obnovljivih izvora, koja se kasnije može koristiti kada potražnja premašuje proizvodnju. Ovi sustavi mogu značajno poboljšati vlastitu potrošnju električne energije proizvedene iz fotonaponskih panela (PV) i smanjiti neravnotežu između opskrbe i potražnje u elektroenergetskom sustavu. Sustavi za pohranu energije također se mogu koristiti za arbitražu, tj. kupnju električne energije od opskrbljivača kada je cijena niska te prodaju natrag opskrbljivaču kada je cijena visoka ili vlastitu potrošnju pohranjene električne energije za vrijeme visoke cijene električne energije.

Praktični dio ovog rada uključuje razvoj modela upravljanja energetske zajednicom koja koristi PV sustave, sustave za pohranu energije i upravljive

---

uređaje poput dizalica topline i električnih vozila (EV). Ovaj model implementiran je u programskom jeziku Python koristeći knjižnice kao što su Pandas, gurobipy i pvlb. Model je evaluiran s obzirom na karakteristične scenarije potrošnje i proizvodnje električne energije, modele naplaćivanja električne energije i godišnja doba, te je analizirano kako dani čimbenici utječu na fleksibilnost i troškove električne energije zajednice.

---

# 1. Energetska zajednica

Energetske zajednice predstavljaju udruženja koja omogućuju građanima, poduzećima i lokalnim upravama da zajednički proizvode, upravljaju i troše električnu energiju, osobito onu proizvedenu iz obnovljivih izvora energije. Njihov cilj je omogućiti lokalnu proizvodnju električne energije, povećati energetske učinkovitost, smanjiti emisije stakleničkih plinova i smanjiti troškove električne energije za svoje članove. S njima bi ostvarili održivi razvoj, ekonomske uštede kroz zajedničku proizvodnju i međusobno dijeljenje resursa. Potreba za energetske zajednicama proizlazi iz distribuirane prirode potrošnje u elektroenergetskom sustavu, potrebe za smanjenjem opterećenja na prijenosnim i distribucijskim mrežama, omogućavanja lokalnim zajednicama kontrolu nad potrošnjom i proizvodnjom energije, ostvarivanja značajnih ušteda smanjenjem troškova električne energije te zelenijim energetske miksom. Promicanjem obnovljivih izvora energije, energetske zajednice smanjuju negativan utjecaj na okoliš i doprinose globalnim ciljevima smanjenja emisija. Kroz suradnju, ove zajednice mogu postići značajne koristi za svoje članove, cijeli elektroenergetski sustav i cijelu zajednicu. Energetske zajednice kao takve nas približavaju prema održivoj, zelenoj te energetske učinkovitoj budućnosti.

## 1.1. Energetske zajednice u svijetu

Na globalnoj razini, energetske zajednice se koriste za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i promicanje korištenja obnovljivih izvora energije. U mnogim zemljama, uključujući Sjedinjene Američke Države, Kanadu i Australiju, energetske zajednice postaju sve prisutnije zahvaljujući zakonodavnim okvirima i financijskim poticajima koji omogućuju lokalnim zajednicama da bolje upravljaju svojom proizvodnjom i potrošnjom. Ove zajednice često uključuju projekte koji sadržavaju neki oblik obnovljivog izvora energije te uređaje za pohranu energije, poput baterijskih spremnika.

Pariškim sporazumom 2015. godine predstavljen je zajednički akcijski plan s ciljem ograničenja globalnog zatopljenja. Njime su se vlade mnogih zemalja

---

obvezale držati prosječan porast temperature na ispod 2 °C u odnosu na predindustrijsko doba te nastaviti s naporima da se taj porast zadrži i na ispod 1.5 °C [1].

U Europskoj uniji 2019. godine energetske zajednice su paketom mjera nazvanim „Čista energija za sve Europljane“ dobile značajnu potporu. Taj paket mjera uvodi definicije za pojmove kao što su „Zajednice obnovljivih izvora energije“ i „Građanske energetske zajednice“. Njime energetske zajednice u Europskoj uniji imaju pravo djelovati kao pravne osobe koje se mogu baviti raznim aktivnostima u području energetike kao što su proizvodnja, distribucija, opskrba, potrošnja i skladištenje energije. S pravnog aspekta mogu se smatrati udrugama, partnerstvima, neprofitnim organizacijama ili društvima s ograničenom odgovornošću te je njihov primarni cilj pružanje ekoloških, ekonomskih ili socijalnih koristi za svoje članove i lokalnu zajednicu [2].

## **1.2. Energetske zajednice u Hrvatskoj**

U Hrvatskoj, energetske zajednice su pravne osobe upisane u registar udruga i trenutno mogu djelovati jedino u obliku udruge. Ove zajednice omogućuju udruživanje potrošača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora, maksimizirajući iskoristivost električne energije i dijeljenje energije među članovima, što rezultira nižim računima za električnu energiju. Također, omogućuju udruživanje potrošača koji ne posjeduju vlastite elektrane, ali žele koristiti energiju iz obnovljivih izvora.

Od 5. ožujka 2024. godine, u Hrvatskoj je osnovana prva energetska zajednica „Moja energetska zajednica – MEC“ u općini Rugvica, Zagrebačka županija, koja uključuje četiri obiteljske kuće sa solarnom elektranom snage 3,6 kW, očekujući godišnju proizvodnju od oko 4.000 kWh. Također, pokrenuta je inicijativa za osnivanje energetske zajednice u Ivanić-Gradu u sklopu projekta LOGYCO, koji vodi Društvo za oblikovanje održivog razvoja (DOOR).

Unatoč tim inicijativama, postoje značajna ograničenja i prepreke za djelovanje energetskih zajednica u Hrvatskoj. Osnivanje zajednice zahtijeva dobivanje

---

dozvole od Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA), uz predaju 18 dokumenata i plaćanje naknade od 995,42 €. Dodatno, zakon nalaže zapošljavanje jedne osobe na puno radno vrijeme, što predstavlja veliku prepreku za manje zajednice [3].

---

## 2. Pregled modela energetske zajednice

U ovom djelu rada fokus će biti stavljen na pregled načina dizajna energetske zajednice kako bi se steklo bolje razumijevanje i identificirali najbolji trendovi za unaprjeđenje modela energetske zajednice. Modele dijelimo s obzirom na:

- Ekonomske modele
- Modele naplaćivanja električne energije i ostalih usluga
- Funkcije cilja energetske zajednice
- Načine modeliranja energetske sustava

### 2.1. Podjela s obzirom na ekonomski model

S obzirom na državu u koju su smještene, energetske zajednice imaju različite pravne strukture koje im daju različita prava i obaveze, u Europskoj uniji svaka država članica ima pravo donijeti vlastite zakone vezane uz energetske zajednice sve dok su oni u skladu s direktivama donesenim od strane Europske unije. S obzirom na to kako članovi zajednice međusobno djeluju postoji 6 prepoznatljivih modela [4].:

- Zajednice s kupcima s vlastitom proizvodnjom,
- Zajednice s kolektivnom proizvodnjom,
- Zajednice s agregatorom
- Zajednica sponzorirana od nezavisne stranke,
- Zajednice s lokalnim energetske tržištem i kooperativne zajednice

Model zajednice s kupcima s vlastitom proizvodnjom sastoji se od pojedinaca koji svi kupuju i proizvode električnu energiju, te dijele višak proizvedene energije. Svoje prednosti ostvaruju kroz jeftinije cijene preko grupnih kupnji, državnih poticaja te pristupa tržištu usluga fleksibilnosti.

U modelu kolektivne proizvodnje članovi zajednice dijele proizvodne sustave (najčešće PV-e) i sustave za pohranu energije (baterijske spremnike). Investicije i benefiti se dijele među članovima. Benefiti uključuju smanjenje troškova električne energije, mogući prihodi od prodaje viškova i mogući državni poticaji.

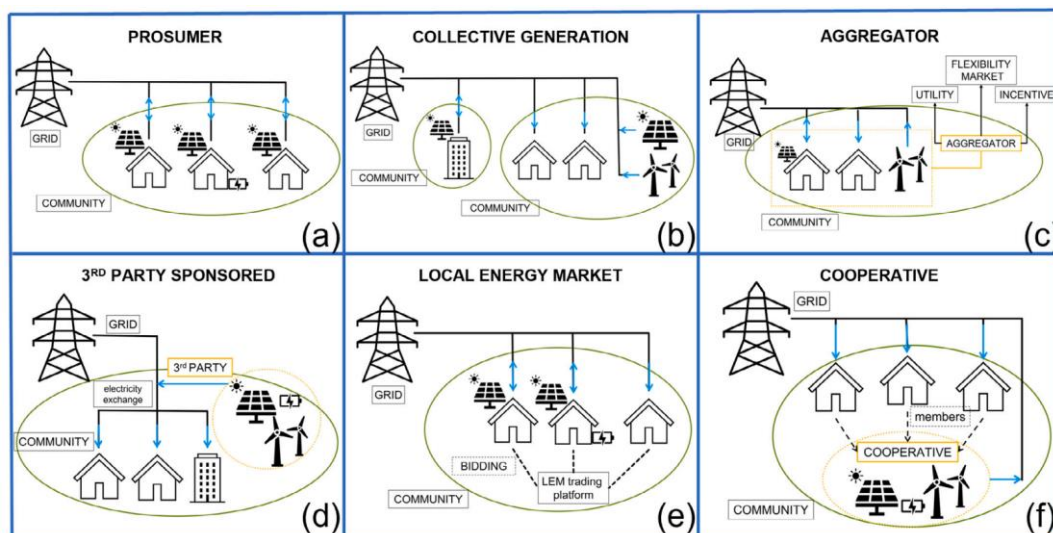


Model zajednice s agregatorom podrazumijeva da stranka nazvana agregator grupira korisnike koji mogu biti proizvođači, potrošači ili kupci s vlastitom proizvodnjom. Agregator tako, s većim brojem članova, može ispregovarati povoljnije uvjete za svoje članove i ostvariti pristup tržištu usluga fleksibilnosti ostvarujući prihode za sebe i svoje članove.

Zajednice sponzorirane od strane nezavisne stranke smatramo sve one zajednice koje su osnovane od strane javnih institucija ili privatnih kompanija radi ostvarenja ekonomskih ili društvenih ciljeva. U ovakvoj zajednici osnivačke stranke zadržavaju vlasništvo nad imovinom zajednice i ostvaruju prihode preko naknada i poticaja dok članovi obično imaju benefite u aspektu nižih cijena električne energije.

U zajednicama s lokalnim energetska tržištem članovi međusobno dijele proizvedenu električnu energiju preko uzajamnog trgovanja („Peer to Peer“ (P2P)). Uvjete trgovanja kao što je cijena mogu međusobno dogovarati. Benefiti su povoljnije cijene unutar zajednice u odnosu na javno tržište (i za prodavače i za kupce).

U kooperativnim energetska zajednicama svi članovi su suvlasnici i sudjeluju u njezinom financiranju i upravljanju. Prihodi se ili reinvestiraju natrag u zajednicu ili dijele među članovima.



Slika 2.1: Podjela energetska zajednica s obzirom na ekonomski model

---

## 2.2. Podjela modela s obzirom na model naplaćivanja električne energije i ostalih usluga

Cilj modela naplaćivanja električne energije je kreiranje transparentnih cjenovnih signala koji će odražavati stvarno stanje sustava i potrebu za smanjenjem ili povećanjem potrošnje. Profitabilnost energetske zajednice uvelike ovisi o modeliranju cijena električne energije te je ovaj aspekt vezan uz zakonska rješenja zemlje u kojoj se energetska zajednica nalazi. Modele cijena razvrstavamo na 3 skupine: fiksna cijena, cijena s obzirom na vrijeme korištenja i dinamična cijena.

Model fiksnih cijena podrazumijeva da sudionici plaćaju konstantnu cijenu za potrošenu električnu energiju i primaju konstantnu naknadu za proizvedenu električnu energiju neovisno o stanju u mreži ili vremenu potrošnje i proizvodnje. Ovakav model je nefleksibilan i ne daje poticaj članovima zajednice da promjene svoje navike ili investiraju u upravljivu potrošnju.

U modelu cijena s obzirom na vrijeme korištenja, cijene variraju u ovisnosti o dobu dana potičući potrošnju tijekom manje opterećenih sati u danu i odvrćući od potrošnje tijekom više opterećenih sati. Modeli mogu biti dvotarifni kao što je u Hrvatskoj ili još više tarifni koji svojim višim rasponom cijena bolje nagrađuje fleksibilnost krajnjih korisnika.

Model dinamičkih cijena prati tržište, tj. s obzirom na ponudu, potražnju i mrežne uvjete prilagođava cijenu električne energije u stvarnom vremenu. Primjer dinamičkih cijena je Danska gdje korisnik plaća tržišnu cijenu električne energije uvećanu za neku fiksnu naknadu. Ovaj model najbolje potiče efikasnu i ekonomičnu potrošnju energije i unaprjeđuje stabilnost mreže, ali trenutno zbog svoje kompleksnosti i manjka potrebne infrastrukture može biti problem za implementaciju u energetske zajednice u Hrvatskoj.

Osim cjenovnog modela, upravljanje potrošnjom se može vršiti i poticajno, što podrazumijeva poticaje za iduće akcije:

- Direktno upravljane potrošnjom
- Smanjenje potrošnje

- 
- Kratkotrajni prekid potrošnje

Najčešće te poticajne naknade nudi operator prijenosnog sustava, operator distribucijskog sustava ili agregator.

### **2.3. Podjela modela s obzirom na funkcije cilja energetske zajednice**

Funkcija cilja u modelima energetskih zajednica usmjeruje modele prema ostvarenju određenih ciljeva. Dijelimo ih na četiri skupine:

- Ekonomske
- Ekološke
- Tehničke
- Socijalne

Ekonomski orijentirane funkcije cilja u fokus stavljaju smanjenje troškova zajednice i povećanje profita.

Ekološki orijentirane funkcije cilja maksimiziraju korištenje energije dobivene iz obnovljivih izvora energije i smanjuju CO<sub>2</sub> emisije.

Tehničke funkcije cilja povećavaju samostalnost energetske zajednice maksimizirajući vlastitu potrošnju, optimizirajući pohranu energije i upravljajući potrošnjom.

Socijalne funkcije cilja teže poboljšanju sveukupne kvalitete života svojih članova preko smanjenja troškova za električnu energiju i financiranjem projekata.

### **2.4. Podjela modela s obzirom na modeliranje energetskih sustava**

Modeli energetskih zajednica sastoje se od više manjih matematičkih modela koji predstavljaju različite dijelove energetskih zajednica kao što su PV, baterijski spremnici, dizalice topline, EV, vjetroturbine itd.. Svaki od ovih elemenata može se modelirati na više načina i s različitim nivoa kompleksnosti, ovisno o svrsi modela.

---

### **2.4.1. Modeli solarnih panela**

Solarni paneli su najpopularniji distribuirani obnovljivi izvor energije zbog svoje dostupnosti i jednostavnosti. Možemo ih modelirati na više načina, što uključuje:

- Javno dostupne simulacijske alate poput PVGIS-a
- Analitičke metode
- Izravna mjerenja

### **2.4.2. Modeli baterijskih spremnika**

Baterijski spremnici su ključni dio energetske zajednice zbog svoje mogućnosti skladištenja energije. Najrašireniji korišten tip je Litij-ionska baterija zbog svoje sve niže cijene, velike raširenosti i gustoće energije. Možemo je modelirati preko više nivoa kompleksnosti od najjednostavnijeg idealnog modela koji zanemaruje sve gubitke u bateriji do uključivanja efikasnosti punjenja i pražnjenja koji indiciraju koliki postotak energije gubimo prilikom punjenja i pražnjenja baterije. Njihova efikasnost obično iznosi od 95 % do 98 %. Precizniji modeli uključuju i efikasnost samopražnjenja uzrokovanu malim gubicima energije tijekom vremena dok baterija stoji napunjena, osim efikasnosti, u obzir možemo uzeti i efekte degradacije. Degradacija predstavlja postupno smanjenje kapaciteta baterije uzrokovanog uporabom i starenjem. U modelima se izračunava empirijski uzimajući u obzir cikluse i brzinu punjenja i pražnjenja, temperaturu i starenje ili se dodaje kao dodatni trošak. Također se baterijski spremnici, poput PV-a, mogu modelirati koristeći simulacijske alate.

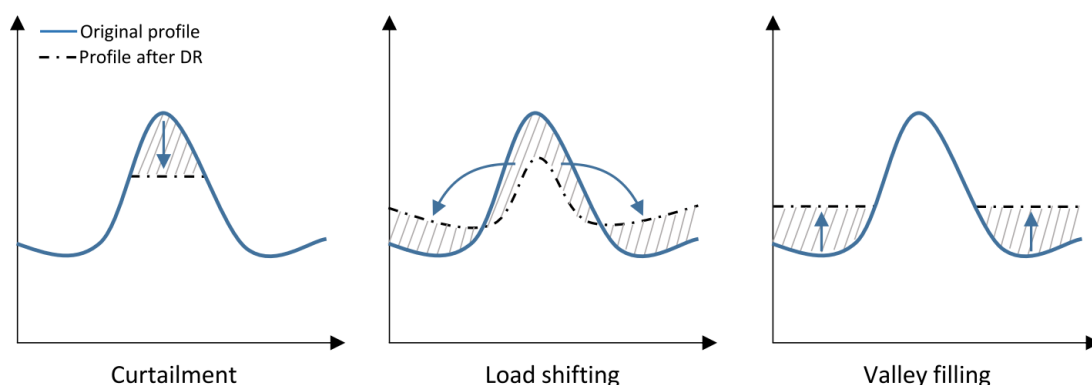
### **2.4.3. Modeli upravljanja potrošnjom**

Kod modeliranja fleksibilnih energetske zajednice ključno je upravljanje sa strane potražnje (demand-side management (DMS)), ono predstavlja široki spektar aktivnosti koje se koriste u svrhu mijenjanja obrazaca potrošnje energije. DMS se dijeli na dvije skupine: energetska efikasnost i upravljanje potrošnjom (demand response (DR)). Promjene uzrokovane energetskom efikasnošću su obično trajne, stoga iako su i dalje bitne sa stajališta energetske zajednice za fleksibilnosti bitniji je DR. DR definiramo kao bilo

---

kakvu promjenu u korištenju električne energije od strane krajnjeg korisnika koja se razlikuje od njegovih regularnih aktivnosti, a potaknuta je promjenom cijene električne energije u vremenu ili nekom danom naknadom od strane agregatora ili operatora prienosnog ili distribucijskog sustava [5]. Postoje 3 prepoznatljiva načina na koji DR može biti ostvaren, a to su :

- Smanjenje potrošne (Curtailment)- Najprije, potrošač može smanjiti potrošnju tijekom sati maksimalne potražnje električne energije ne mijenjajući potrošnju van tog perioda. Primjer toga može biti mijenjanje temperature termostata.
- Premještanje potrošnje (Load shifting)- Potom, potrošač može smanjiti potrošnju tijekom maksimalne potražnje premještajući je u periode niske potrošnje, primjer tome predstavlja odgađanje paljenja perilica za rublje ili punjenja EV.
- Povećanje potrošnje (Valley filling)- Kao treću mogućnost imamo podizanje potrošnje za vrijeme niske potrošnje, razlog potrebe za takvom akcijom mogao bi biti prekomjerna proizvodnja koju se ne može ili neisplati ugaziti kao što su neke elektrane na ugljen i nuklearne elektrane.



Slika 2.2: Vrste odziva potrošnje [5]

S obzirom na navedeno modeli potrošnje se razvrstavaju na 3 skupine [6]:

- a) Trošila tipa A su vrste uređaja s mogućnošću regulacije temperature prostora ili vode radi ljudske ugone. U ovu kategoriju mogu spadati klima uređaji, dizalice topline, ventilacija i električni bojleri. Njihova fleksibilnost proizlazi iz

---

mogućnosti privremenog smanjenja, povećanja ili čak gašenja potrošnje zadržavajući i dalje tražene nivoe temperature.

- b) Trošila tipa B su vrste uređaja čije trenutno izvršenje nije nužno i može biti maksimalno odgođeno za neko zadano vrijeme. Primjer ovakvih trošila su perilice, sušilice, punjači za EV.
- c) Trošila tipa C nisu upravljiva jer imaju neupravljiva vremena kretanja i zaustavljanja i neupravljiv iznos snage. Primjer ovakvih trošila su svjetla, električni štednjaci, televizije, stolna računala, pećnice, internetski ruteri itd..

---

## 3. Model Energetske zajednice

### 3.1. Cilj modela

Cilj modela predstavljenog u ovom dijelu rada bit će ispitivanje isplativosti energetske zajednice i njihove fleksibilnosti. Energetskim zajednicama fleksibilnost pružaju uređaji s mogućnošću skladištenja energije ili uređaji s mogućnošću promjene svoje potrošnje/proizvodnje električne energije. Najčešće su to baterije i upravljiva potrošnja, stoga će se model u nastavku posebno fokusirati na te elemente. Zajednica je modelirana kao mješovito cjelobrojna linearno programiranje (MILP) koje nam kao rješenje daje optimalan raspored potrošnje, plan upravljanja baterijom, plan razmjene električne energije između članova te između svakog člana i opskrbljivača.

U modelu su korišteni podmodeli dijelova energetske zajednice koji računaju potrošnju i proizvodnju energije na petnaestominutnoj razini.

### 3.2. Korišteni programi

Model ove energetske zajednice napravljen je u programskom jeziku Python. Python je objektno orijentirani programski jezik opće namjene, vrlo svestran i koristi se za raznovrsne primjene uključujući i znanstvene izračune. Njegova najveća prednost je velika zajednica korisnika koja stvara veliku i raznovrsnu količinu dodatnih biblioteka i alata što omogućuje brži razvoj novih aplikacija. U izradi ovog modela posebno su pripomogle biblioteke Pandas i Gurobipy.

Biblioteka Pandas koristi se za učitavanje, analizu, manipulaciju, agregiranje i vizualizaciju podataka. Ona omogućuje rad s podacima u obliku DataFrame tablica te obradu i ekstrakciju podataka iz .xls i .csv datoteka.

Gurobi je optimizacijski solver koji se koristi pri rješavanju složenih matematičkih problema kao što su linearno programiranje, cjelobrojno programiranje, MILP, kvadratno programiranje, itd.. Za integraciju Gurobi solvera u python okruženje korištena je Gurobipy biblioteka. U danom modelu koristimo MILP zbog kombinacije više kontinuiranih i binarnih varijabli. Gurobi

je idealan izbor za rješavanje ovakvih problema, radi svoje učinkovitosti i kratkog vremena pronalaska optimalnog rješenja za modele s velikim brojem kontinuiranih i binarnih varijabli, poput ovog.

### 3.3. Izgled zajednice

Zajednica u ovom radu sastoji se od četiri člana. Sva četiri člana smatraju se kućanstvima. Ovisno o izvršavanoj simulaciji članovi će imati različite elemente pod koje mogu spadati dizalice topline, upravljiva potrošnja, mogućnost P2P trgovanja, PV i baterijski spremnici. U nastavku bit će opisan model svakog od ovih elemenata energetske zajednice.

### 3.4. Funkcija cilja

Funkcija cilja označava koja je svrha modela, u ovom radu to je minimizacija troškova cijele zajednice, izražena je s pomoću jednadžbe (1).

$$f_{cilj} = \min(C_{tot}) \quad (1)$$

Gdje  $C_{tot}$  predstavlja troškove cijele zajednice te se dobiva iz (2). Izračunava se zbrajanjem svih razmjena električne energije između kućanstava i opskrbljivača pomnoženih odgovarajućom cijenom, također je potrebno dodati troškove degradacije baterije.

$$C_{tot} = \sum_{i \in K} (\sum_{h \in H} [(Sell_{i,h} \times \pi_{Sell_i}) + (Buy_{i,h} \times \pi_{Buy_i}) + Cdeg_{i,h}]) ; (i \in K, h \in H) \quad (2)$$

Tablica 3.1: Korišteni skupovi u modelu

Oznaka	Naziv	Veličina skupa
K	Skup sudionika energetske zajednice	4
H	Skup vremenskih trenutaka	96



### 3.5. Ekonomski model zajednice

Kako bi model bio ispravan potrebno je kreirati niz ograničenja da bi rješenje bilo realno izvedivo. Prvo je opisana razmjena između člana energetske zajednice i opskrbljivača električnom energijom, za koju nejednadžbe (3) i (4) limitiraju maksimalnu i minimalnu moguću energiju razmijenjenu energiju s opskrbljivačem:

$$Buy_{i,h} \leq MaxCapacity \times XBuy_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (3)$$

$$Sell_{i,h} \leq MaxCapacity \times XSell_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (4)$$

Ograničenje (5) onemogućuje kupnju i prodaju električne energije u istom periodu.

$$XBuy_{i,h} + XSell_{i,h} \leq 1,; (i \in K, h \in H) \quad (5)$$

Tablica 3.2: Kontinuirane i binarne varijable ekonomskog modela

Oznaka	Naziv
$C_{tot}$	Ukupni troškovi zajednice
$Sell_{i,h}$	Prodaja energije opskrbljivaču
$XSell_{i,h}$	Binarna varijabla za prodaju energije opskrbljivaču
$Buy_{i,h}$	Kupnja energije od opskrbljivača
$XBuy_{i,h}$	Binarna varijabla za kupnju energije od opskrbljivača

Tablica 3.3: Parametri ekonomskog modela

Oznaka	Naziv	Vrijednost
$\pi_{Buy_h}$	Cijena kupljene energije	Viša tarifa: 0.146 €/kWh
		Niža tarifa: 0.073 €/kWh
$\pi_{Sell_h}$	Cijena prodane energije	Viša tarifa: 0.13 €/kWh
		Niža tarifa: 0.066 €/kWh

<i>MaxCapacity</i>	Maksimalna količina, povučene ili predane, energije u jednom vremenskom periodu	5.5kWh
--------------------	---	--------

### 3.5.1. Model P2P trgovanja

Kako bi u energetske zajednici tijekom međusobnog trgovanja i kupci i prodavači bili u profitu cijena energije kupljena iz energetske zajednice koju označavamo s  $\pi p_{2p}$  računa se kao aritmetička sredina cijene kupnje i prodaje električne energije za vrijeme danog vremenskog perioda, matematički je ovaj postupak opisan jednadžbom (6).

$$\pi p_{2p_i} = \frac{(\pi Buy_i + \pi Sell_i)}{2}; (i \in K) \quad (6)$$

Analogno ograničenjima (3), (4) i (5) ograničenja (7), (8) i (9) imaju istu svrhu samo se odnose na P2P razmjenu.

$$Buy_{p_{2p_{i,j,h}}} \leq MaxCapacity \times XBuy_{p_{2p_{i,j,h}}}; ((i,j) \in K, i \neq j, h \in H) \quad (7)$$

$$Sell_{p_{2p_{i,j,h}}} \leq MaxCapacity \times XSell_{p_{2p_{i,j,h}}}; ((i,j) \in K, i \neq j, h \in H) \quad (8)$$

$$XBuy_{p_{2p_{i,j,h}}} + XSell_{p_{2p_{i,j,h}}} \leq 1; ((i,j) \in K, i \neq j, h \in H) \quad (9)$$

Ograničenje (10) onemogućuje istovremeno kupovanje energije od opskrbljivača i prodaju na P2P tržištu.

$$XBuy_{i,h} + XSell_{p_{2p_{i,j,h}}} \leq 1; ((i,j) \in K, i \neq j, h \in H) \quad (10)$$

Tablica 3.4: Kontinuirane i binarne varijable i parametri modela P2P trgovanja

Oznaka	Naziv
$\pi p_{2p_h}$	Cijena energije u P2P razmjeni
$Sell_{p_{2p_{i,j,h}}}$	Prodaja energije unutar zajednice (P2P)
$XSell_{p_{2p_{i,j,h}}}$	Binarna varijabla za P2P prodaju energije
$Buy_{p_{2p_{i,j,h}}}$	Kupnja energije unutar zajednice (P2P)

$XBuyp2p_{i,j,h}$	Binarna varijabla za P2P kupljenu energije
-------------------	--

### 3.6. Model baterijskog sustava

U ovom radu baterijski sustav modeliramo kao element modela koji može pohranjivati energiju, ima efikasnost punjenja i pražnjenja, a degradacija je modelirana kao trošak. Jednadžba (11) zadaje inicijalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika.

$$SoC_{i,0} = StartSoC; (i \in K) \quad (11)$$

Ponovno, kao za prethodna dva modela ograničavamo maksimalnu snagu punjenja i pražnjenja te onemogućujemo punjenje i pražnjenje u istom periodu.

$$(XBch_{i,h} + XBdis_{i,h}) \leq 1; (i \in K, h \in H) \quad (12)$$

$$Bch_{i,h} \leq MaxBch \times XBch_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (13)$$

$$Bdis_{i,h} \leq MaxBdis \times XBdis_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (14)$$

Također je potrebno postaviti i uvjet za maksimalnu i minimalnu količinu energije koju baterijski spremnik može držati u nekom vremenskom trenutku što je obavljeno pomoću ograničenja (15) i (16):

$$SoC_{i,h} \leq MaxB_k; (i \in K, h \in H) \quad (15)$$

$$SoC_{i,h} \geq MinB_k; (i \in K, h \in H) \quad (16)$$

Jednadžba (17) izračunava stanje napunjenosti baterijskog spremnika u nekom vremenskom trenutku kao funkciju stanja napunjenosti prethodnog vremenskog trenutka umanjenog ili uvećanog za energiju koju smo koju smo izvadili tj. stavili u bateriju. U ovoj jednadžbi također uključujemo efikasnost jer se dio energije izgubi u punjenju baterije, a dio u pražnjenju.

$$SoC_{i,h} = SoC_{i,(h-1)} + Bch_{i,h} * \eta_{ch} - \frac{Bdis_{i,h}}{\eta_{dis}}; (i \in K, h \in H) \quad (17)$$

Trošak degradacije baterijskog spremnika, uzrokovan punjenjem, pražnjenjem i kalendarskim starenjem, nije zanemariv i u praksi je nelinearan.

U ovom modelu degradacija se procjenjuje linearnim modelom kako slijedi [12]:

$$Cdeg_{i,h} = (Bch_{i,h} + Bdis_{i,h}) \times \pi deg ; (i \in K, h \in H) \quad (18)$$

Gdje  $\pi deg$  predstavlja trošak degradacije po jedinici energije punjenja ili pražnjenja baterijskog spremnika.

Tablica 3.5: Kontinuirane i binarne varijable modela baterijskog spremnika

Oznaka	Naziv
$SoC_{i,j}$	Stanje napunjenosti baterije
$SoCStart$	Početno stanje napunjenosti baterije
$Bch_{i,h}$	Energija napunjena u bateriju kućanstva i u vremenskom periodu h
$XBch_{i,h}$	Binarna varijabla za punjenje baterije
$Bdis_{i,h}$	Energija ispražnjena iz baterije kućanstva i u vremenskom periodu h
$XBdis_{i,h}$	Binarna varijabla za pražnjenje baterije
$Cdeg_{i,h}$	Trošak degradacije baterijskog spremnika

Tablica 3.6: Parametri modela baterijskog spremnika

Oznaka	Naziv	Vrijednost
$MaxB_{k=1,2}$	Maksimalna količina energije u bateriji	14 kWh
$MinB_{k=1,2}$	Minimalna količina energije u bateriji	0.5 kWh
$SoCStart$	Početno stanje napunjenosti baterije	0.5 kWh (0%)
$\eta_{ch}$	Efikasnost punjenja baterije	94.87 %
$MaxBch$	Maksimalna količina energije napunjene u bateriju u jednom vremenskom periodu	1.25 kWh

$\eta_{dis}$	Efikasnost pražnjenja baterije	94.87 %
$MaxBdis_{i,h}$	Maksimalna količina energije ispražnjene iz bateriju u jednom vremenskom periodu	1.25 kWh
$\pi_{deg}$	Trošak degradacije baterije	0.01 €/kWh

Specifikacije baterijskog spremnika uzete su iz specifikacija Tesla PowerWall baterijskog spremnika [13].

### 3.7. Model Solarnih panela

Za model PV-a u ovom radu korišten je simulacijski alat PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). PVGIS je alat razvijen od strane Europske unije koji omogućava pristup podacima o sunčevom ozračenju, temperaturi zraka diljem svijeta u velikom vremenskom rasponu. Također, ima mogućnost modeliranja PV sustava s pomoću specifičnih parametara poput nagiba panela, azimuta, tipa korištene solarne čilije i maksimalne snage sustava. Odličan je za određivanje solarnih potencijala područja i stoga pomaže preciznom planiranju i optimizaciji PV sustava.

Pvlib je Python biblioteka koja olakšava analizu i modeliranje PV sustava s pomoću niza funkcija za prikupljanje, analizu i manipulaciju podataka. U ovom modelu korištena je jedna od takvih funkcija pod nazivom *get\_pvgis\_hourly* koja omogućuje preuzimanje satnih podataka o sunčevom zračenju i temperaturi za određenu lokaciju. Kako bi se dobili traženi rezultati, u slučaju ovog modela to su bili proizvodnja električne energije iz PV-a i temperatura zraka, ovoj funkciji potrebni su sljedeći ulazi: lokacija, početak i kraj simulacije, maksimalna snaga PV sustava, mjesto ugradbe, gubitci i nagib panela. Ova funkcija kao rezultat daje izračunate vrijednosti proizvodnje električne energije iz PV-a i temperature zraka (zajedno s još nekolicinom vrijednosti koje su nepotrebne s gledišta ovog modela) na satnoj razini. Za ovaj model potrebne su petnaestominutne vrijednost proizvedene električne energije i temperature zraka, stoga se dani rezultati proizvedene električne energije dijele sa  $\Delta h$  i interpoliraju, dok se vrijednost temperature zraka samo interpoliraju. U tablici

---

3.7 nalaze se parametri potrebni za izračun proizvedene električne energije iz solarnih panela i temperature zraka za svakog člana zajednice (vrijednosti koje nisu navede, ostavljene su kao predefimirane vrijednosti korištene funkcije).

Tablica 3.7: Parametri za izračun proizvodnje PV sustava i temperature zraka

Član	Geografska duljina	Geografska širina	Instalirana snaga PV-a	Način ugradnje
1	45.816000	15.974500	3 kW	Krov kuće
2	45.816113	15.974427	6 kW	Krov kuće
3	45.816870	15.968230	0 kW	-
4	45.817070	15.967850	0 kW	-

### 3.8. Model potrošnje

Potrošnja ove energetske zajednice, kao i u većini modernih kućanstava, sastoji se od raznovrsne potrošnje. Neke s mogućnošću upravljanja i neke bez, stoga kao što je bilo objašnjeno u teorijskom dijelu rada, potrošnju dijelimo u tri skupine. U prvoj skupini nalazi se dizalica topline i ona predstavlja trošila tipa A, u drugu skupinu spadaju perilica rublja i punjač za EV, dok se u treću skupinu svrstava sva ostala neupravljiva potrošnja.

#### 3.8.1. Model dizalice topline (upravljiva potrošnja tipa A)

Dizalice topline su energetske efikasni uređaji koji imaju sposobnost hlađenja i zagrijavanja vode i prostora. Razlikuju se od tradicionalnih načina zagrijavanja prostora po tome što umjesto paljenja primarnih energenata za dobivanje topline koriste lijevokretni kružni proces. Uz pomoć manjih količina električne energije uzimaju toplinu iz jednog spremnika i predaju ga drugom, tj. za vrijeme zime hlade vanjski prostor i zagrijavaju unutarnji i obrnuto po ljeti.

U ovom radu korišten je pojednostavljeni model za izračun potrebne uložene električne energije pri održavanju željene temperature kućanstva.

Termalna energija potrebna za održavanje temperature kućanstva jednaka je energiji potrebnoj za pokrivanje razlike između temperature u trenutnom vremenskom periodu,  $Tr_{i,h}$  i temperature u prošlom vremenskom periodu,  $Tr_{i,h-1}$  nastale zbog toplinskih gubitaka uzrokovanih razlikom temperature unutar kućanstva i izvan kućanstva,  $Tatm_{i,h}$ . Masa zagrijanog zraka,  $md$  u kućanstvu izračunava se kao volumen kućanstva pomnožen s gustoćom zraka. Volumen kućanstva jednak je površini kućanstva pomnoženoj s visinom stropa. Zbog jednostavnosti, površina izložena vanjskoj temperaturi modelirana je kao jedna površina s istom  $U$  vrijednošću, nema razlike između vrsta zidova, prozora i vrata. Toplinska energija za grijanje kućanstva izračunata je prema zadanoj formuli, a koeficijent performansi dizalice topline ( $COP$ ) definira omjer između dobivene toplinske energije i uložene električne energije [8].

U modelu potrebno je postaviti inicijalne vrijednosti temperature kućanstva što je prikazano ograničenjem (19).

$$Tr_{i,0} = TrInitial_i; (i \in K) \quad (19)$$

Jednadžba (20) određuje potrebnu toplinsku snagu za zagrijavanje ili hlađenje kuće u danom vremenskom periodu.

$$Q_{i,h} = C \times md \times (Tr_{i,h} - Tr_{i,h-1}) \times 0.25 + Ad \times U \times (Tr_{i,h} - Tatm_{i,h-1}); (i \in K, h \in H) \quad (20)$$

Gdje su  $C$ ,  $Ad$  i  $U$  konstante, prvi dio izraza je također potrebno prilagoditi kako bi bio izražen preko snage, zato ga množimo s 0.25, a  $md$  izračunavamo kao:

$$md = V \times \rho \quad (21)$$

Gdje  $\rho$  predstavlja gustoću zraka, a  $V$  volumen zraka kućanstva. Uvjeti (22) i (23) osiguravaju da su tražene snage za hlađenje i grijanje pozitivne.

$$Q_{h,i,h} \geq Q_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (22)$$

$$Q_{c,i,h} \geq -Q_{i,h}; (i \in K, h \in H) \quad (23)$$

Pri izračunu potrebne električne energije za zagrijavanje prostora  $E_{h,i,h}$  koriste se funkcije (24) i (25) koje preko  $COP$  povezuju  $E_{h,i,h}$  i  $Q_{h,i,h}$ , pošto je  $Q_{h,i,h}$

predstavlja potrebnu toplinsku snagu u vatima (W), a  $COP$  je bezdimenzionalan, potrebno je izraz pomnožiti s  $\Delta h$  i podijeliti s 1000 kako bi dobili energiju u traženoj mjernoj jedinici, tj. kilovatsatima (kWh).

$$Eh_{i,h} == \frac{Qh_{i,h}}{COPh_h} \times \frac{\Delta h}{1000}; (i \in K, h \in H) \quad (24)$$

$$Ec_{i,h} == \frac{Qc_{i,h}}{COPc_h} \times \frac{\Delta h}{1000}; (i \in K, h \in H) \quad (25)$$

Kao što je ranije bilo rečeno,  $COP$  predstavlja efikasnost dizalice topline. Realni iznos  $COP$ -a računa se kao  $COP$  Carnotovog kružnog procesa koji se računa s pomoću temperature izvora topline  $T_{source}$  i temperature primatelja topline  $T_{sink}$  pomnoženog s koeficijentom efikasnosti  $\phi$ . Ova relacija vidljiva je u jednadžbi (26) [9].

$$COP_{real} == \phi \frac{T_{sink}}{T_{sink} - T_{source}} \quad (26)$$

Međutim, ovakva formulacija  $COP_{real}$  dovodi do nelinearnosti te posljedično puno većeg računalnog napora, stoga u ovom modelu koristi se linearizirana funkcija izračuna  $COP$ -a za grijanje,  $COPh_h$  i hlađenje,  $COPc_h$ . Izraženi su jednadžbama (27) i (28).  $COP_{ref}$  predstavlja referentnu vrijednost  $COP$ -a pri referentnoj temperaturi od 7 °C (280,15 K) i nagib funkcije  $m$  izračunat empirijski [10].

$$COPh_h = m \times (T_{atm_i} - 280.15) + COP_{refh} \quad (27)$$

$$COPc_h = -m \times (T_{atm_i} - 280.15) + COP_{refc} \quad (28)$$

Ograničenjima (29) i (30) osigurava se da dizalica topline ne može u jednom vremenskom periodu potrošiti više od maksimalne dopuštene količine energije, dok ograničenje (31) ne dopušta istovremeno grijanje i hlađenje.

$$Eh_{i,h} \leq Xh_{i,h} \times MaxEh; (i \in K, h \in H) \quad (29)$$

$$Ec_{i,h} \leq Xc_{i,h} \times MaxEc; (i \in K, h \in H) \quad (30)$$

$$Xh_{i,h} + Xc_{i,h} \leq 1; (i \in K, h \in H) \quad (31)$$



Temperatura kućanstva svakog korisnika u svakom vremenskom trenutku mora ostati između zadanih vrijednost, takvo ponašanje postizemo s ograničenjima (32) i (33).

$$Tr_{i,h} \geq T_{min_{i,h}}; (i \in K, h \in H) \quad (32)$$

$$Tr_{i,h} \leq T_{max_{i,h}}; (i \in K, h \in H) \quad (33)$$

Tablica 3.8: Kontinuirane i binarne varijable modela dizalice topline

Oznaka	Naziv
$Tr_{i,h}$	Temperatura u kućanstvu $i$ u trenutnom vremenskom periodu
$Q_{i,h}$	Toplinska energija kućanstva $i$ za održavanje temperature
$T_{atm_{i,h}}$	Temperatura vanjskog zraka oko kućanstva $i$ u vremenskom periodu $h$
$Q_{h_{i,h}}$	Toplinska energija grijanja kućanstva $i$ u trenutku $h$
$X_{h_{i,h}}$	Binarna varijabla uključenosti grijanja
$E_{h_{i,h}}$	Potrebna električna energija za grijanje prostora
$Cop_{h_{i,h}}$	Koeficijent efikasnosti dizalice topline za grijanje
$Q_{c_{i,h}}$	Toplinska energija hlađenja kućanstva $i$ u trenutku $h$
$X_{c_{i,h}}$	Binarna varijabla uključenosti hlađenja
$E_{c_{i,h}}$	Potrebna električna energija za grijanje prostora
$Cop_{c_{i,h}}$	Koeficijent efikasnosti dizalice topline za grijanje

Tablica 3.9: Parametri modela dizalice topline

Oznaka	Naziv	Iznos
$Tr_{Initial_i}$	Inicijalna temperatura kućanstva	19-23 °C
$C$	Toplinski kapacitet	1005 J/(kgK)

$md$	Masa zagrijanog zraka	460-490 kg
$Ad$	Površina kućanstva izložena vanjskoj temperaturi	100-150 m <sup>2</sup>
$U$	Koeficijent prolaza topline	0.36-0.373 W/m <sup>2</sup> K
$V$	Volumen zraka u kućanstvu	350-400 m <sup>3</sup>
$\rho$	Gustoća zraka	1.204 kg/m <sup>3</sup>
$m_h$	Nagib funkcije efikasnosti grijanja	0.08
$m_c$	Nagib funkcije efikasnosti hlađenja	0.08
$COP_{h_{ref}}$	Ref. vrijednost koeficijenta efikasnosti dizalice topline za grijanje	3.72
$COP_{c_{ref}}$	Ref. vrijednost koeficijenta efikasnosti dizalice topline za hlađenje	3.9
$MaxEc$	Maksimalna potrošena električna energija za hlađenje u jednom vremenskom periodu	1.775 kWh
$MaxEh$	Maksimalna potrošena električna energija za grijanje u jednom vremenskom periodu	2 kWh
$T_{mini}$	Minimalna dopuštena temperatura kućanstva	18.5-21 °C
$T_{maxi}$	Maksimalna dopuštena temperatura kućanstva	22-23.5 °C
$\Delta h$	Protekli vremenski period	¼ h

Parametri dizalice topline preuzeti su od uređaja PCA71 Heat Pump [14].

### 3.8.2. Model uređaja s pomičnim vremenom potrošnje (potrošnja tipa B)

Modelu s pomičnim vremenom potrošnje mogu pripadati razni uređaji poput punjača za EV, sušilice, perilice posuđa i perilice rublja. U ovom modelu razvrstavaju se u dvije skupine: neprekidni uređaji i uređaji s mogućnošću zaustavljanja. U neprekidne uređaje pripadaju perilice i sušila, oni imaju mogućnost izvršenja svojih zadataka u bilo kojoj ranije dopuštenoj skupini vremenskih trenutaka uz uvjet kada jednom započnu moraju se u potpunosti izvršiti. Potrebno je definirati snagu i vrijeme trajanja zadatka svakog uređaja i mogući vremenski prozor izvršavanja potrošnje uređaja. Svako kućanstvo proizvoljno podešava navedene specifikacije. Uvjet (34) osigurava da je vrijeme rada uređaja jednako zadanom traženom vremenu.

$$\sum_1^H xJb_{i,k,h} == Jb_{i,j}, (i \in K, k \in JB, h \in H) \quad (34)$$

Uvjet (35) onemogućuje upaljenost traženog uređaja van dopuštenog vremenskog prozora.

$$xJb_{i,k,h} == 0, (i \in K, k \in JB, h \in (H \setminus H_{work})) \quad (35)$$

Kako bi se osigurala neprekinutost rada ovih uređaja implementiramo ograničenja (36) i (37) kojima prvo nalazimo sat početka rada uređaja te potom osiguravamo da se uređaj ne ugasi sve dok ne odradi cijelo svoje vremensko zaduženje.

$$xJb_{start_{i,k,h}} == xJb_{i,k,h} - xJb_{i,k,h-1} (i \in K, k \in JB, h \in H) \quad (36)$$

$$xJb_{i,k,h:h+h_{work}} \geq xJb_{start_{i,k,h}}, (i \in K, k \in JB, h \in H) \quad (37)$$

Uređaji s mogućnošću zaustavljanja se modeliraju isto kao i neprekidni uređaji bez uvjeta (36) i (37). Takvo upravljivo trošilo u realnosti predstavlja punjač za EV.

Tablica 3.10: Kontinuirane i binarne varijable modela potrošnje tipa B

Oznaka	Naziv
$xJb_{ikh}$	Binarna varijabla upaljenosti uređaja tipa B

$Jb_{li}$	Tražena duljina rada uređaja tipa B
$H_{work}$	Skup vremenskih perioda za rad uređaja tipa B
$xJbstart_{i,k,h}$	Binarna varijabla pokretanja uređaja tipa B
$PJb$	Potrošena energija uređaja tipa B u jednom vremenskom periodu
$H_{work}$	Vremenski period rada uređaja

Tablica 3.11: Parametri modela potrošnje tipa B

Oznaka	Naziv	Vrijednost
$Jb$	Skup vrsta trošila tipa B	Veličina skupa: 2
$Jb_{i,1,h}$	Perilica rublja	$PJb_1= 0.5 \text{ kWh}$
		$Jb_{l1}=2 \text{ h}$
$Jb_{i,2,h}$	Punjač za EV	$PJb_2= 1.75 \text{ kWh}-2.75 \text{ kWh}$
		$Jb_{l2}=5-7 \text{ h}$

### 3.8.3. Model neupravljive potrošnje (uređaji tipa C)

Treća vrsta potrošnje u ovom modelu pripada pod neupravljivu potrošnju što znači da se ne može utjecati niti na vrijeme njezinog izvršavanja niti na iznos iskorištene energije u danom vremenskom periodu. Iznosi neupravljive potrošnje u petnaestominutnim intervalima uzeti su iz podataka o električnim profilima opterećenja za jednu obiteljsku kuću i dizalicu topline u Njemačkoj [12].

Kako bi osigurali ravnotežu između ponude i potražnje električne energije za svakog člana zajednice u svakom vremenskom trenutku postavljamo uvjet (38).

$$0 == Epv_{i,h} - Bch_{i,h} + Bdis_{i,h} + \sum_1^K (Buyp2p_{i,j,h} - Sellp2p_{i,j,h}) + \sum_1^K (Buy_{i,h} - Sell_{i,h}) - Ec_{i,h} - Eh_{i,h} - \sum_1^{JB} (PjB \times xJb_{i,k,h}) - Load_{i,h} ; ((i,j) \in K, i \neq j, k \in JB, h \in H) \quad (38)$$

Tablica 3.12: Kontinuirane varijable potrebne za postavljanje uvjeta balansa energije

Oznaka	Naziv
$Load_{i,h}$	Potrošnja energije kućanstva
$Epv_{i,h}$	Proizvodnja energije iz solarnih panela

## 4. Rezultati simulacije

U ovom dijelu rada bit će opisani i uspoređeni rezultati različitih simulacija danog modela s obzirom na doba godine, korištene uređaje i modele naplaćivanja električne energije. Simulirana su 3 scenarija s obzirom na korištene uređaje:

- Scenarij 1: Inicijalni model sa svim prisutnim elementima
- Scenarij 2: Model bez upravljive potrošnje
- Scenarij 3: Model bez upravljive potrošnje i baterijskih spremnika

Nadalje za svaki od scenarija napravljene su 3 simulacije za svako od tri karakterističnih godišnjih doba : zime, ljeta i prijelaznog godišnjeg doba ( proljeće i jesen gledamo kao isto godišnje doba zbog sličnih obrazaca vremenskih prilika). Naposljetku za svaki od slučajeva koriste se dva različita modela naplaćivanja:

- Dvotarifni model
- Trotarifni model

### 4.1. Simulacija modela sa svim prisutnim elementima (Scenarij 1)

U ovom poglavlju prezentirani su rezultati simulacije modela sa svim prisutnim elementima. Kod detaljne analize svih scenarija korištena je simulacija dana za vrijeme zimskog godišnjeg doba i s dvotarifnim modelom

naplaćivanja električne energije. Parametri elemenata korišteni za simulaciju modela Scenarija 1 nalaze se u tablici 4.1.

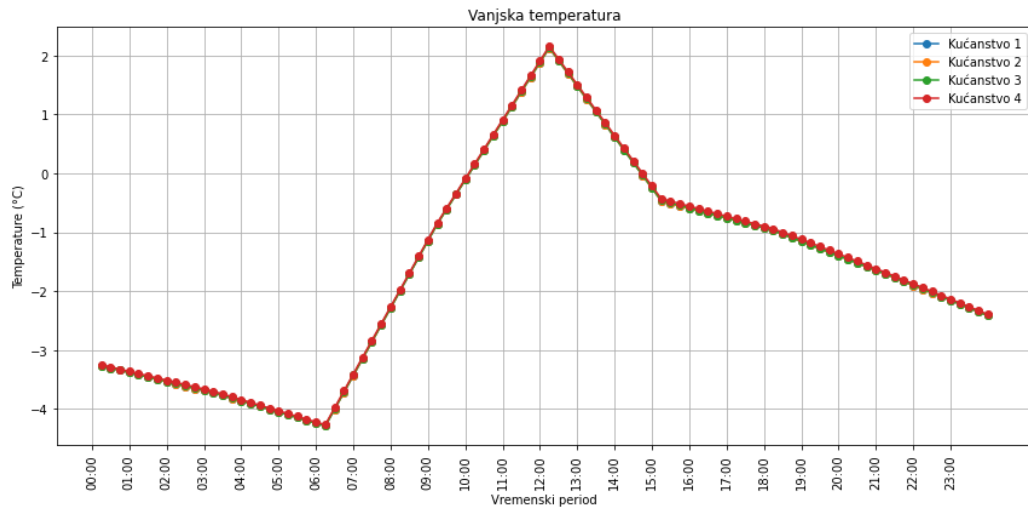
Tablica 4.1: Parametri modela Scenarija 1.

Član	Solarni paneli	Baterijski spremnik	Dizalica topline (grijanje/ hlađenje)	Upravljivi punjač EV (1:Snaga 2:Energija)	Upravljiva perilica rublja (1:Snaga 2:Energija)
1	3 kW	-	8 kW / 7.1 kW	-	2 kW 4 kWh
2	6 kW	-	8 kW / 7.1 kW	7 kW 49 kWh	2 kW 4 kWh
3	-	13.5 kW	8 kW / 7.1 kW	11 kW 55 kWh	2 kW 4 kWh
4	-	13.5 kW	8 kW / 7.1 kW	-	2 kW 4 kWh

Simulacijom modela energetske zajednice uz rezultat minimiziranih troškova dobiva se i raspored rada svih optimizacijskih varijabli.

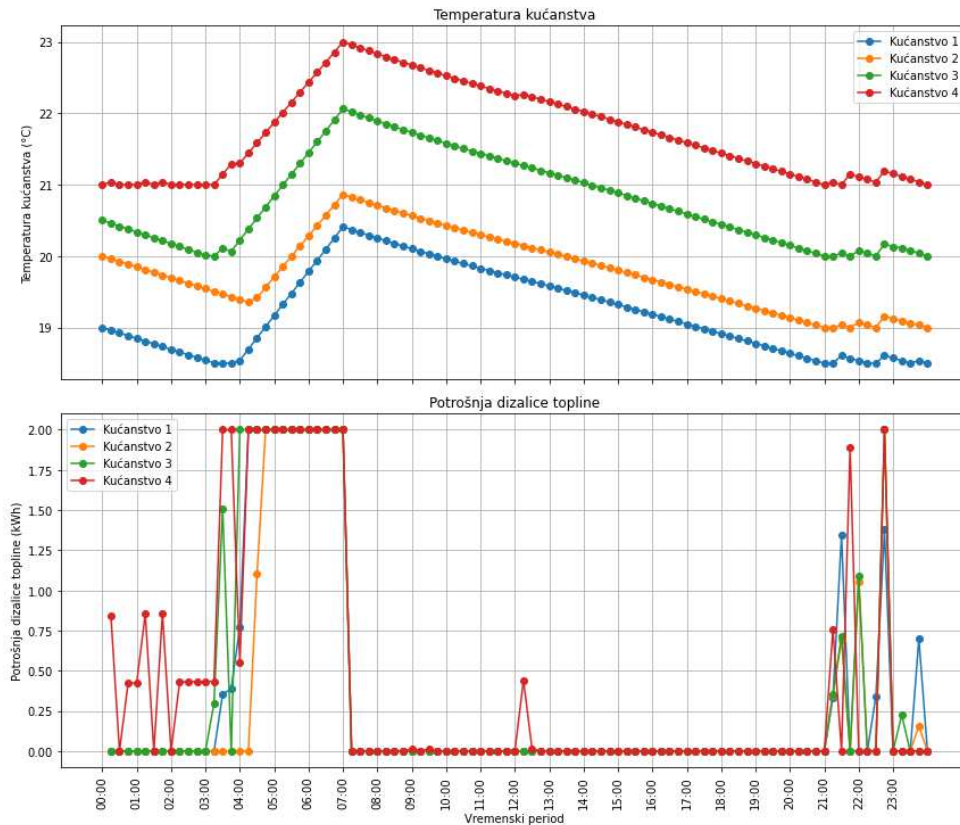
#### 4.1.1. Scenarij 1: Dizalica topline

S obzirom na prikazanu temperaturu atmosfere na slici 4.1, primjetno je da dizalica topline radi u toplinskom režimu. Zbog prirode energetskih zajednica koje su stvorene za lokalnu razinu, atmosferske temperature oko svih članova su veoma slične, što je također vidljivo na slici 4.1.



Slika 4.1: Atmosferska temperatura oko svakog kućanstva tokom zime

Analizom grafova na slici 4.2, kojima prikazujemo temperaturu prostora svakog kućanstva i potrošnju energije svake od dizalica topline. Primjetno je kako ovakav model upravljive potrošnje može služiti kao spremnik energije, tako što par sati prije povećanja cijene električne energije, dolazi do povećane potrošnje dizalica topline svih članova energetske zajednice, zagrijavajući prostor i spremajući u njemu toplinsku energiju, kako bi smanjili potrošnju električne energije tijekom ponovnog ulaska u nižu tarifu, vidimo tendenciju zadržavanja temperature prostora na donjoj granici, što također dovodi do ušteda. razdoblja viših cijena. Kasnije u danu, nakon



Slika 4.2: Grafovi rezultata simulacije rada dizalice topline za Scenarij 1

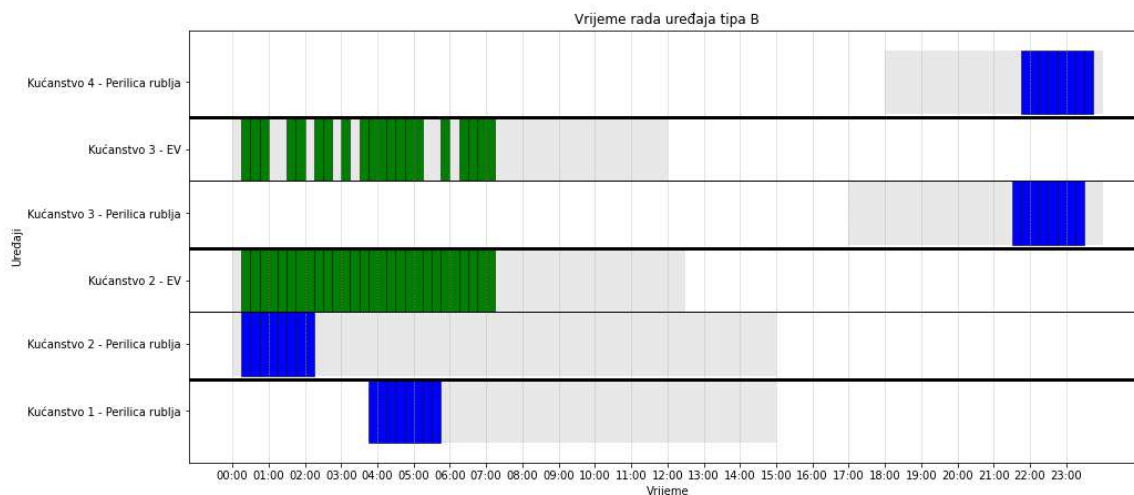
#### 4.1.2. Scenarij 1: Trošila tipa B

Ovaj dio analize fokusira se na trošila tipa B, koja uključuju perilice rublja i punjače EV-a. Ovi uređaji imaju fleksibilne vremenske prozore unutar kojih mogu biti uključeni, što omogućuje optimizaciju potrošnje energije prema tarifama i dostupnosti energije.

Slika 4.3 prikazuje aktivnost uređaja tipa B u kućanstvima. Osjenčana područja označavaju moguće vremenske prozore za aktivaciju svakog uređaja, dok zelena boja predstavlja EV, a plava boja perilice rublja. Ove boje prikazuju specifične vremenske trenutke kada su uređaji aktivirani.

Prema očekivanjima, vremena aktivacije uređaja smještena su tijekom razdoblja nižih cijena električne energije. Ova strategija omogućuje kućanstvima da iskoriste niže tarife električne energije, smanjujući tako ukupne troškove energije.





Slika 4.3: Vrijeme rada uređaja tipa B za Scenarij 1

### 4.1.3. Scenarij 1: Baterijski spremnik

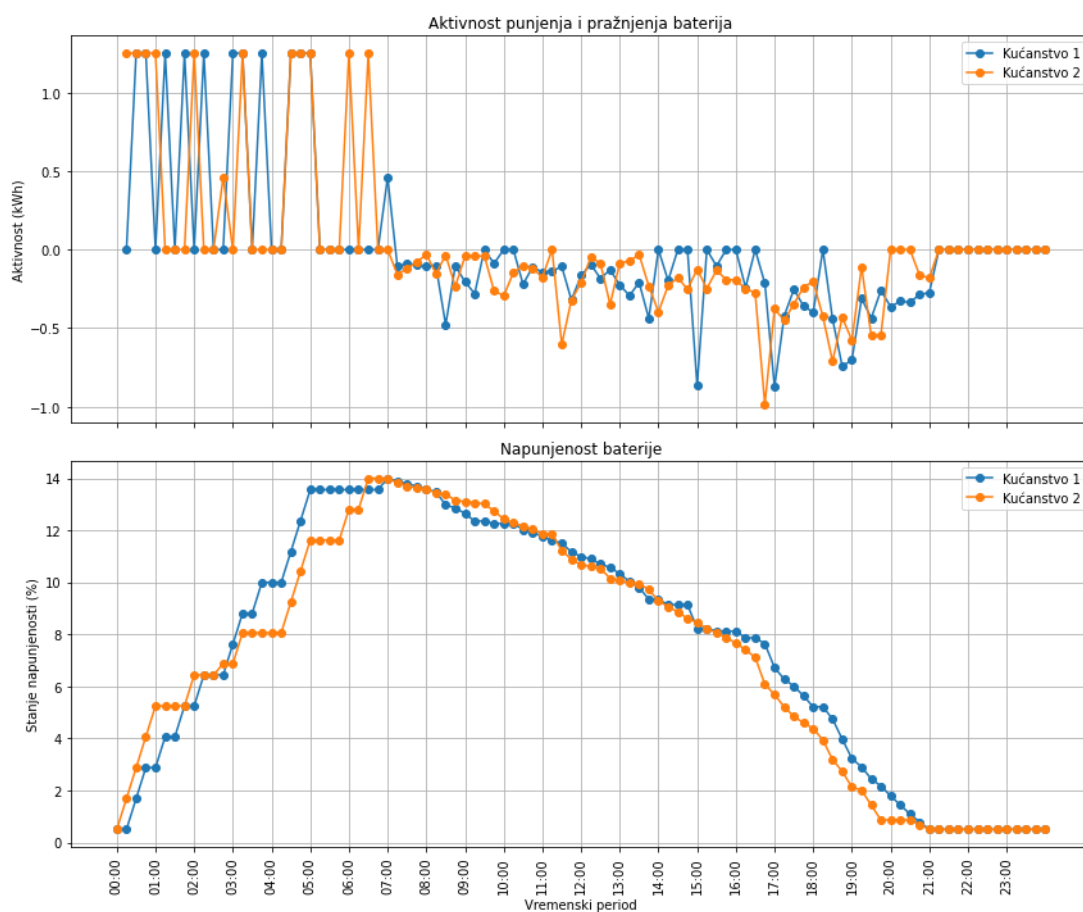
Baterijski spremnici u ovom modelu omogućuju pohranu viška proizvedene energije tijekom razdoblja nižih cijena električne energije te njezino korištenje tijekom razdoblja viših cijena. Ovaj pristup optimizira ukupne troškove energije i poboljšava energetska efikasnost.

Slika 4.4 prikazuje aktivnosti punjenja i pražnjenja baterija u kućanstvima. Gornji graf prikazuje vremenske periode i količinu punjenja (pozitivne vrijednosti) i pražnjenja (negativne vrijednosti) u kućanstvima koja posjeduju baterijske spremnike. Donji graf prikazuje stanje napunjenosti baterija (SoC) tijekom dana.

Ponašanje baterijskih spremnika, u kućanstvima 1 i 2, pokazuje sličan obrazac. Tijekom razdoblja od 00:00 h do 07:00 h, baterijski spremnici se pune zbog nižih cijena električne energije i dosežu maksimalnu razinu napunjenosti. Tijekom razdoblja više tarife, baterijski spremnici se prazne, a prije ponovnog ulaska u nižu tarifu, razina napunjenosti pada na minimalnu dopuštenu vrijednost.

Rezultati prikazani na slici 4.4 jasno pokazuju važnost upotrebe baterijskih spremnika za optimizaciju potrošnje energije u kućanstvima. Korištenje baterija omogućuje pohranu viška energije tijekom perioda niskih cijena i

njezino korištenje tijekom perioda visokih cijena, što rezultira smanjenjem troškova energije. Ovaj pristup također doprinosi stabilnosti energetske mreže smanjujući vršna opterećenja.



Slika 4.4: Grafovi aktivnost punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika i njegovo stanje napunjenosti za Scenarij 1

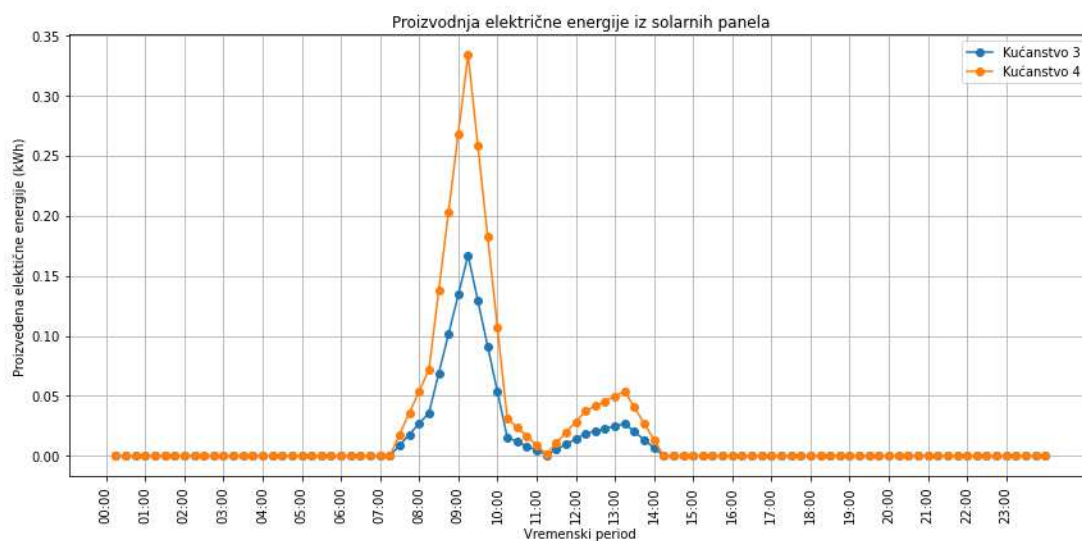
#### 4.1.4. Scenarij 1: P2P trgovanje

Ovaj odjeljak analizira rezultate optimiziranog rasporeda P2P trgovanja električnom energijom među kućanstvima unutar energetske zajednice. P2P razmjena omogućuje kućanstvima međusobnu trgovinu viškom proizvedene energije, čime se smanjuju ukupni troškovi za električnu energiju i povećava efikasnost.

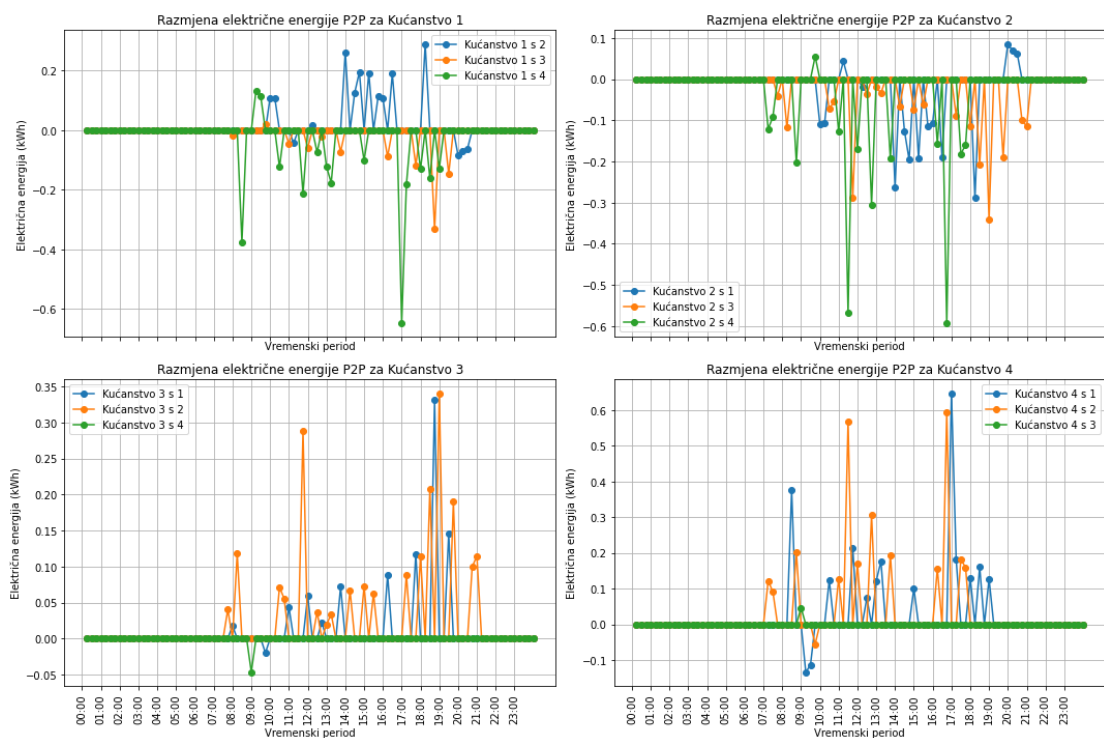
Slika 4.6 prikazuje razmjenu električne energije između kućanstava u različitim vremenskim periodima. Svaki podgraf prikazuje razmjenu električne

energije za jedno kućanstvo s ostalim članovima zajednice. Pozitivne vrijednosti označavaju kupnju električne energije, dok negativne vrijednosti označavaju prodaju električne energije.

S obzirom na godišnje doba u kojem je simuliran ovaj scenarij, proizvodnja električne energije iz solarnih panela je prilično mala, što je vidljivo na slici 4.5. Stoga je primjetno da kućanstva 3 i 4, iako posjeduju distribuirane izvore energije, minimalno prodaju višak proizvedene električne energije drugim članovima zbog minimalne proizvodnje. S druge strane, članovi 1 i 2, iako nemaju distribuirane izvore energije, posjeduju baterijske spremnike te kupuju električne energije za vrijeme niže cijene električne energije od strane opskrbljivača i prodaju je drugim članovima bez spremnika energije za vrijeme više cijene električne energije, ostvarujući uzajamnu korist.



Slika 4.5: Proizvodnja električne energije iz solarnih panela



Slika 4.6: P2P razmjena električne energije za Scenarij 1

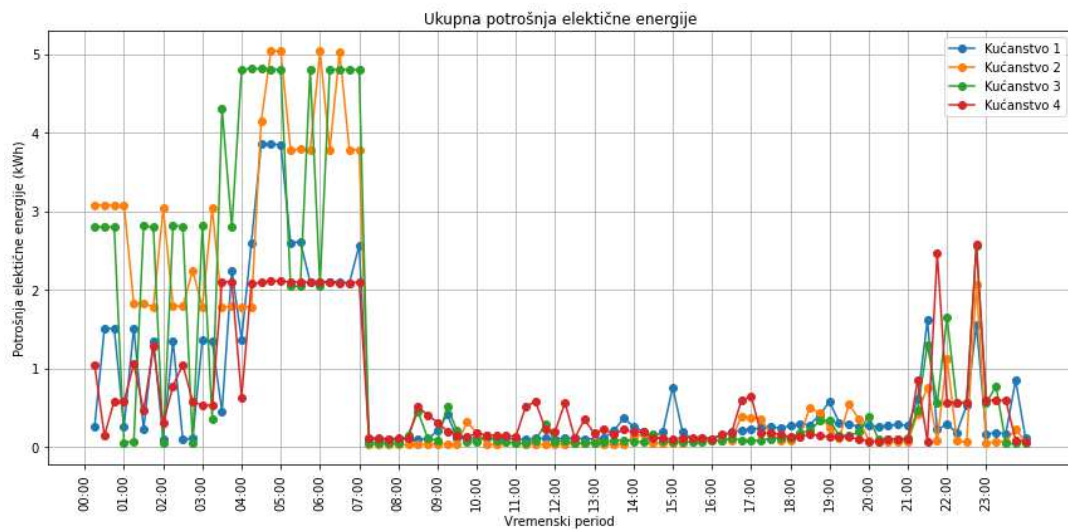
Optimizirani raspored P2P trgovanja električnom energijom unutar energetske zajednice donosi smanjenje ukupnih troškova kupnje električne energije i povećanje efikasnosti. Iako su kućanstva s distribuiranim izvorima energije u ovom simuliranom scenariju manje aktivna zbog sezonskih ograničenja, kućanstva s baterijskim spremnicima uspješno koriste mogućnosti trgovine energijom za postizanje ekonomske koristi. Ovakav pristup potiče suradnju unutar zajednice i maksimalno iskorištava dostupne energetske resurse.

#### 4.1.5. Scenarij 1: Analiza potrošnje

Ovaj odjeljak analizira potrošnju električne energije u kućanstvima unutar energetske zajednice.

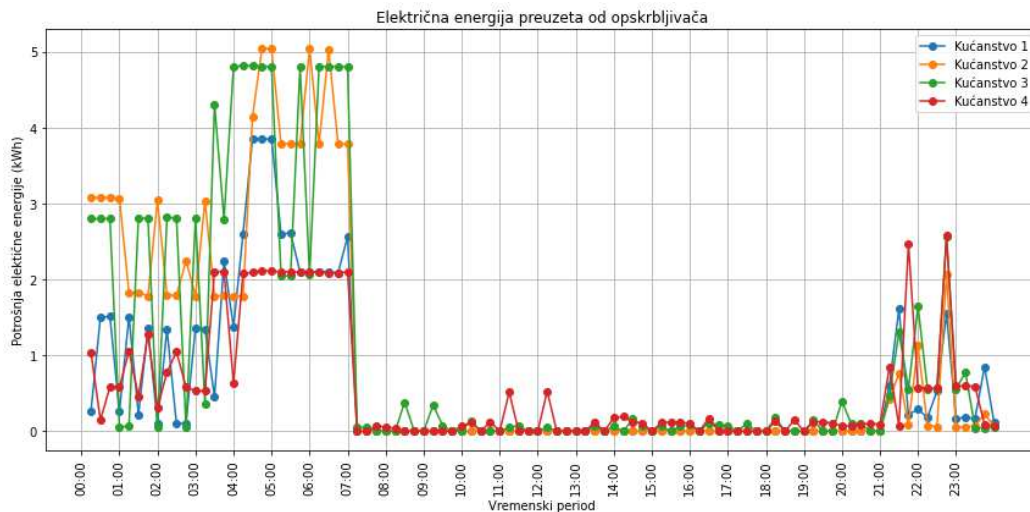
Slika 4.7 prikazuje ukupnu potrošnju električne energije u različitim vremenskim periodima za svako kućanstvo. Graf prikazuje vrijeme i količinu potrošene električne energije svakog kućanstva. Primjetno je da je,

zahvaljujući upravljivoj potrošnji i baterijskim spremnicima, većina potrošnje smještena tijekom perioda nižih cijena električne energije.



Slika 4.7: Graf ukupne potrošnje električne energije energetske zajednice za Scenarij 1

Slika 4.8 prikazuje razmjenu električne energije između članova energetske zajednice i opskrbljivača. Zbog manjka proizvodnje i općenito nepovoljnih uvjeta za prodaju električne energije natrag opskrbljivaču, niti jedan član u niti jednom trenutku ne prodaje električnu energiju opskrbljivaču. Također, usporedbom grafova na slikama 4.7 i 4.8 vidljivo je da se dio neupravljive potrošnje tijekom perioda viših cijena električne energije pokriva energijom iz baterijskih spremnika i distribuiranih izvora energije, što snižava ukupne troškove energetske zajednice.



Slika 4.8: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču za Scenarij 1

## 4.2. Scenarij 2: Simulacija bez upravljive potrošnje

U sklopu Scenarija 2 analiziran je model energetske zajednice bez prisutne upravljive potrošnje. Uređaji koji su prethodno bili modelirani kao upravljivi sada se ponašaju kao neupravljiva potrošnja. Dizalica topline umjesto spektra prihvatljivih vrijednosti temperature ima singularnu prihvatljivu vrijednost. Upravljiva potrošnja tipa B također je modelirana kao neupravljiva potrošnja, a vrijeme rada tih uređaja točno je definirano.

U ovom poglavlju, kao i u prethodnom, simulacija je izvršena tijekom zime s dvotarifnim modelom naplaćivanja električne energije. Tablica 4.2 prikazuje korištene parametre izmijenjenih elemenata. Referentne vrijednosti temperature dizalica topline uzete su kao ugodne temperature grijanih prostora, dok su vremena rada perilice rublja i punjača električnog automobila uzeta prema uobičajenim vremenima korištenja tih uređaja.

Tablica 4.2: Promijenjeni parametri za modeliranje potrošnje u Scenariju 2

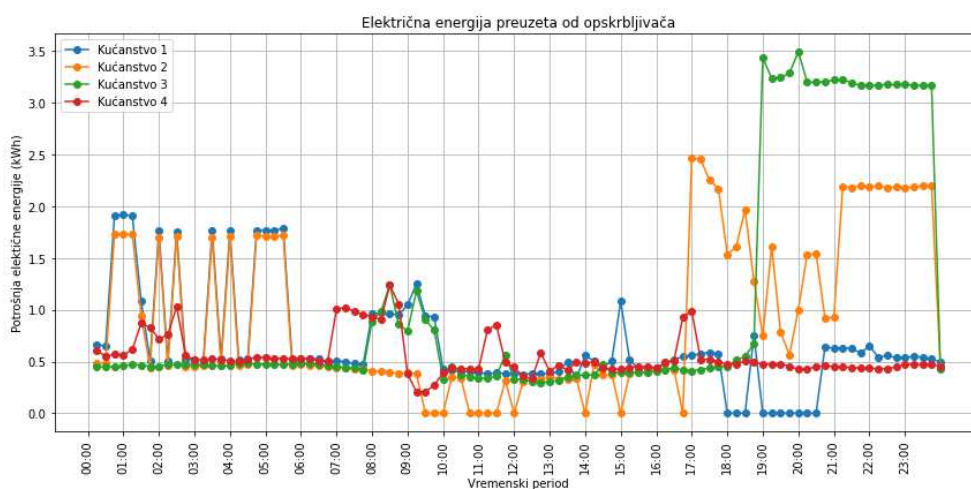
Član	Dizalica topline	Punjač EV	Perilica rublja
1	20 °C	-	8:00-10:00 h

2	20 °C	17:00-24:00 h	17:00-19:00 h
3	20 °C	19:00-24:00 h	8:00-10:00 h
4	20 °C	-	7:00-9:00 h

### 4.2.1. Izmjene u odnosu na Scenarij 1

Gubitkom upravljive potrošnje energetska zajednica gubi fleksibilnost, što uzrokuje niz drugih posljedica:

1. Povećano oslanjanje na preuzimanje električne energije od opskrbljivača: Ovaj efekt se može uočiti usporedbom grafa na slici 4.9, koji prikazuje preuzimanje električne energije od opskrbljivača za svakog člana zajednice u Scenariju 2, s grafom na slici 4.8. Ovaj porast preuzimanja električne energije nastaje zbog lošije optimizacije i smanjene fleksibilnosti modela u odsustvu upravljive potrošnje.

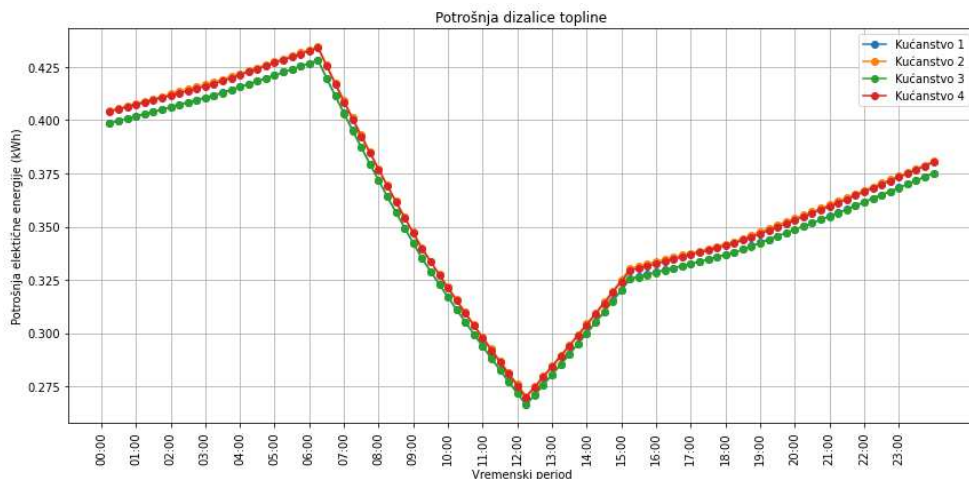


Slika 4.9: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču u Scenariju 2

2. Potrošnja dizalice topline nije fleksibilna, što rezultira većim troškovima energije tijekom dana: U Scenariju 2, dizalica topline radi konstantno kako bi održavala jednaku temperaturu, bez obzira na promjene u cijeni električne energije. To znači da nema mogućnosti smanjenja potrošnje tijekom perioda povišene cijene električne



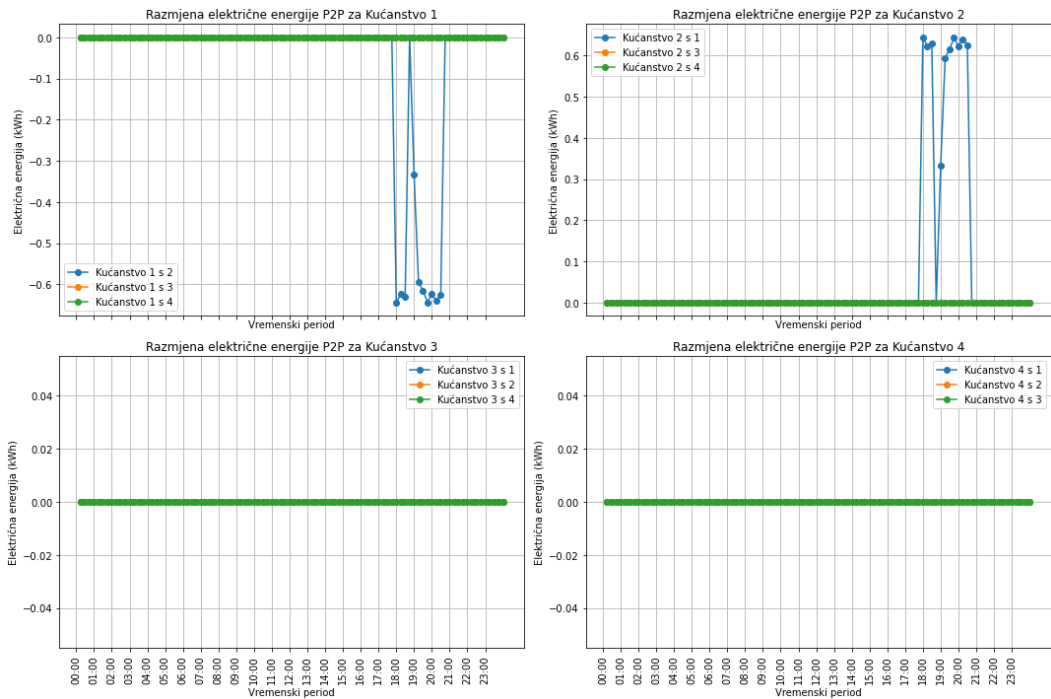
energije, što rezultira višim troškovima energije tijekom dana. Na taj način, ukupna energetska efikasnost je smanjena. Slika 4.10 prikazuje potrošnju električne energije dizalice topline za dani Scenarij.



Slika 4.10: Graf potrošnje električne energije dizalice topline za Scenarij 2

3. Neupravljiva potrošnja pokazuje veće oscilacije: U Scenariju 2, uređaji tipa B koriste se prema unaprijed definiranom vremenu rada, bez obzira na cijenu električne energije. To rezultira većom potrošnjom električne energije tijekom razdoblja viših cijena, što u konačnici dovodi do viših troškova. Kao što je već rečeno u posljedici 2., nefleksibilnost u rasporedu rada uređaja smanjuje mogućnost optimizacije potrošnje električne energije prema optimalnim tarifama, što povećava ukupne troškove kućanstava.
4. P2P razmjena je smanjena, što dovodi do manje efikasne uporabe proizvedene i spremljene električne energije unutar zajednice: Kućanstva bez mogućnosti upravljanja potrošnjom imaju veću potrošnju tijekom razdoblja viših cijena električne energije. Posljedično, troše više vlastitih resursa, bilo to distribuirani izvori energije ili baterijski spremnici, te manje električne energije mogu prodati ostalim članovima energetske zajednice tijekom tog perioda. Usporedbom slika 4.11 i 4.7, ovaj fenomen je primjetan i ukazuje na smanjenje efikasnosti unutar zajednice.



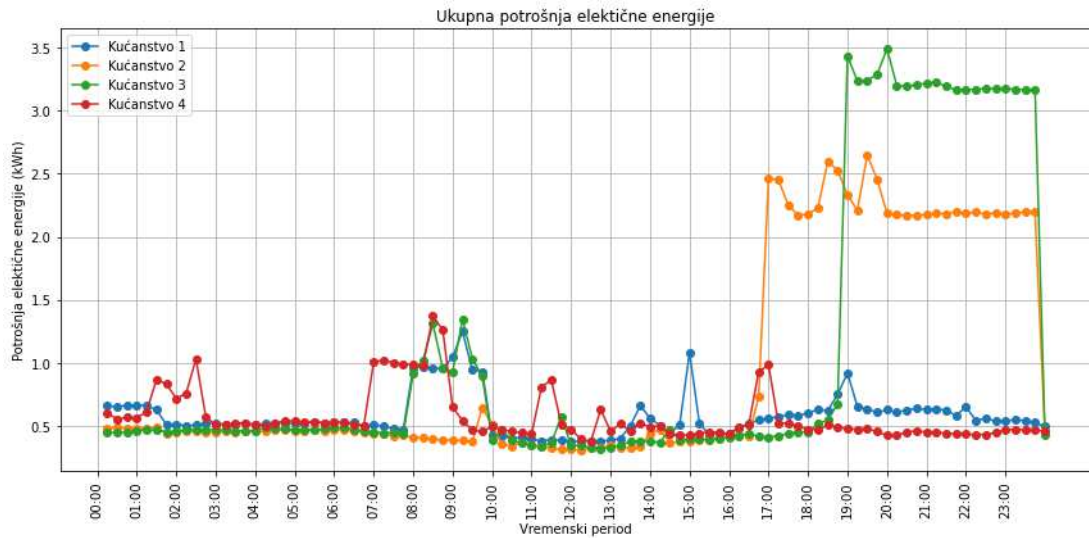


Slika 4.11: P2P razmjena električna energija Scenarij 2

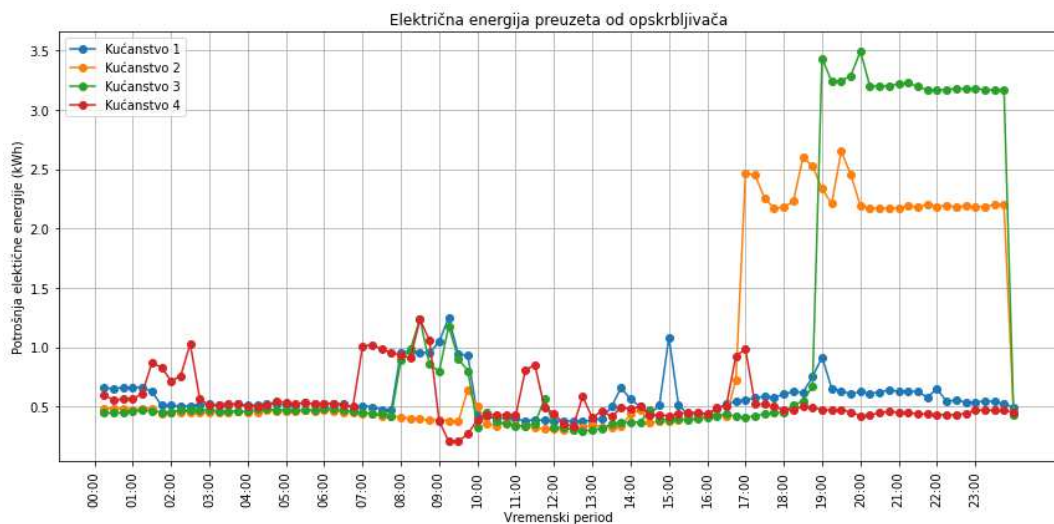
### 4.3. Scenarij 3: Simulacija bez baterijskog spremnika i upravljive potrošnje

U posljednjem Scenariju ovog rada, Scenariju 3, simuliran je model koji, osim što ne posjeduje upravljivu potrošnju, nema niti baterijski spremnik. Ovo dodatno smanjuje fleksibilnost modela energetske zajednice.

Trendovi iz Simulacije 2 se u Simulaciji 3 još pogoršavaju. Krivulja potrošnje svakog kućanstva jednaka je krivulji kupljene električne energije iz mreže umanjene za proizvedenu električnu energiju iz PV-a, što je i vidljivo usporedbom grafova na slikama 4.12 i 4.13.



Slika 4.12: Graf ukupne potrošnje električne energije svakog člana energetske zajednice u Scenariju 3



Slika 4.13: Graf preuzete i predane električne energije svakog člana energetske zajednice prema opskrbljivaču u Scenariju 3

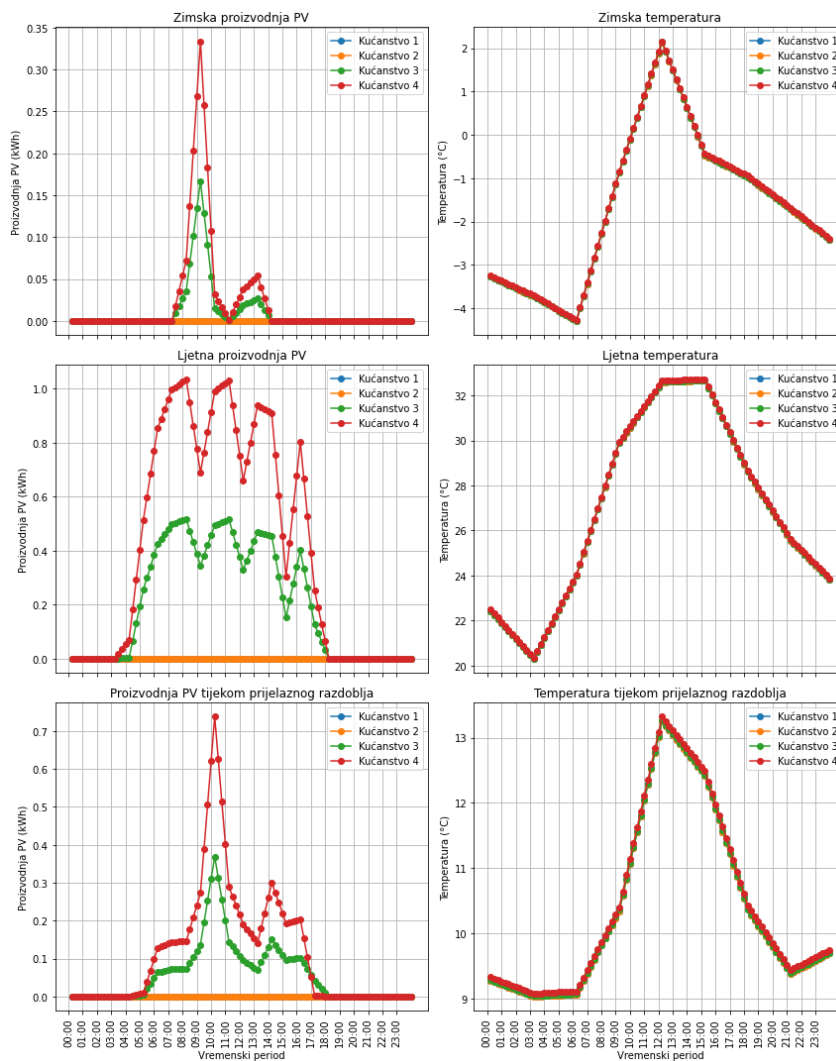
Zbog nepostojanja fleksibilnosti i male proizvodnje iz PV-a, nema P2P trgovanja u energetskoj zajednici u Scenariju 3.

Scenarij 3 jasno pokazuje značaj upravljive potrošnje i baterijskih spremnika za optimizaciju potrošnje električne energije i smanjenje troškova unutar energetske zajednice. Bez ovih komponenti, model postaje znatno manje fleksibilan i više ovisan o opskrbljivaču, što rezultira višim troškovima i manjom efikasnošću.

## 4.4. Simulacije u različitim godišnjim dobima

U ovom poglavlju analiziraju se rezultati simulacija za različita godišnja doba kako bi se procijenio utjecaj sezonskih promjena na energetske zajednice i njihovu fleksibilnost. Uzimajući u obzir različite sezonske uvjete, kao što su promjene temperature, sunčevog zračenja i obrasca potrošnje električne energije, provode se simulacije za zimu, ljeto i prijelazno razdoblje (proljeće i jesen).

Slika 4.14 prikazuje temperaturu zraka i proizvodnju iz PV-a za svako kućanstvo u svakom karakterističnom godišnjem dobu.

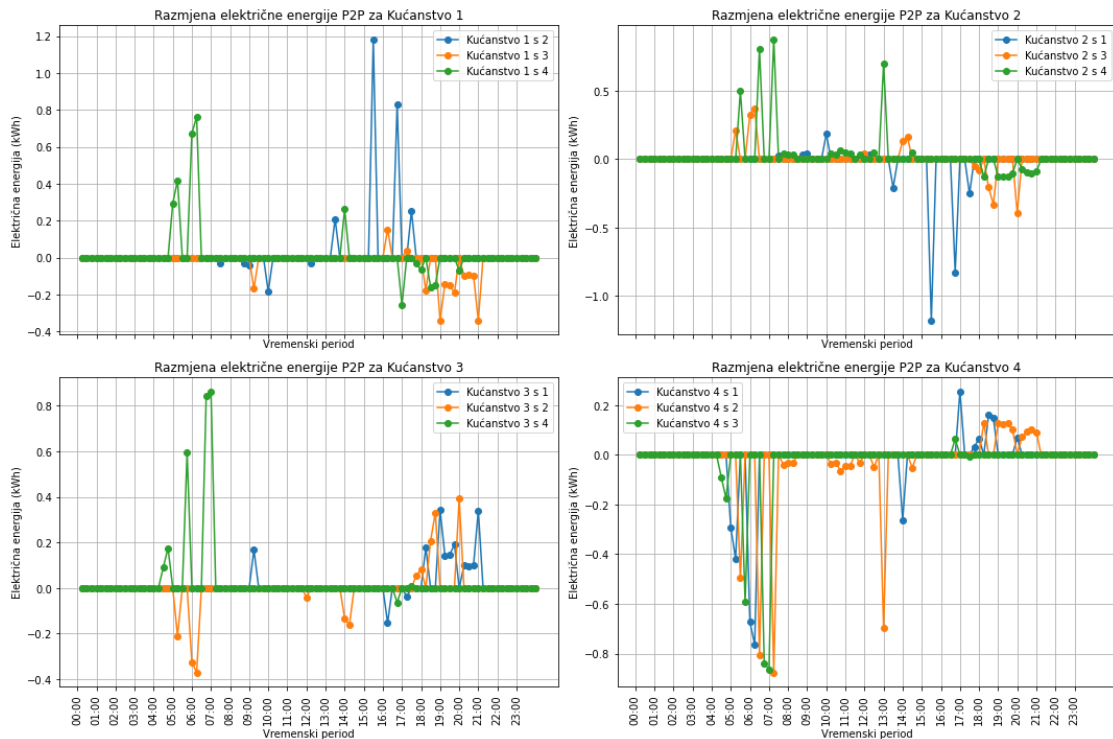


Slika 4.14: Temperatura zraka i proizvodnja iz PV-a za svako kućanstvo u svakom karakterističnom godišnjem dobu

Iz priloženih grafova temperatura vidljivo je da doba godine znatno utječe na potrošnju električne energije za dizalice topline. Najveća potrošnja prisutna je tijekom zimskih mjeseci, potom ljetnih mjeseci (zbog korištenja električne energije za hlađenje), a naposljetku tokom prijelaznih razdoblja. Također je prisutna razlika u proizvodnji PV-a, gdje je primjetno da se tijekom ljeta proizvodi najviše električne energije, potom u prijelaznim razdobljima, dok je proizvodnja najmanja zimi. Smanjena potrošnja i povećana proizvodnja tijekom prijelaznih razdoblja u usporedbi sa zimom dovodi do raznolikijeg P2P trgovanja gdje članovi s PV-om i bez baterije kupuju i prodaju električnu energiju, ovisno o proizvodnji iz PV-a. Ovaj trend se nastavlja i još pojačava tijekom ljeta, kada članovi 1 i 2 tijekom dana, kada proizvode višak električne energije, prodaju članovima 3 i 4 koji posjeduju baterijske spremnike. Kasnije tijekom dana, članovi 3 i 4 prodaju natrag tu električnu energiju članovima 1 i 2. Slike 4.6, 4.15 i 4.16 prikazuju P2P razmjenu električne energije između kućanstava za sva karakteristična godišnja doba.



Slika 4.15: Razmjena električne energije P2P između kućanstava za vrijeme prijelaznog razdoblja



Slika 4.16: Razmjena električne energije P2P između kućanstava za vrijeme ljeta

## 4.5. Simulacija s trotarifnim naplaćivanjem električne energije

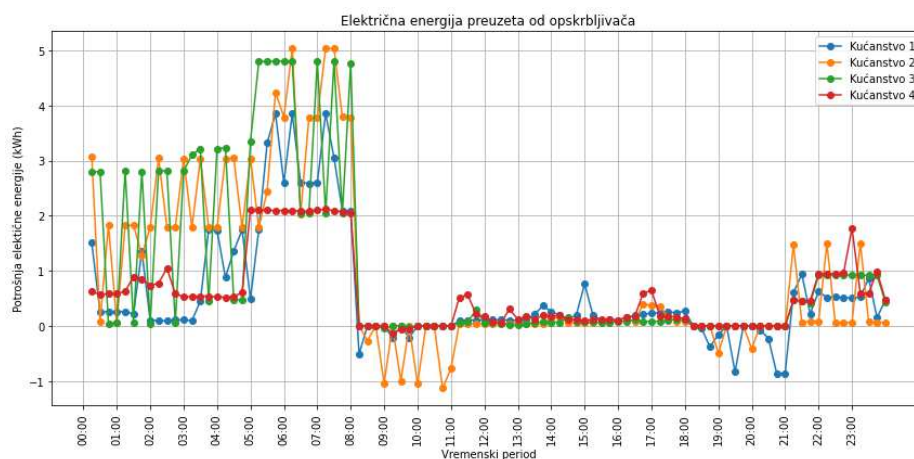
Do sad, u simulaciji svih modela korišten je bio dvotarifni način naplaćivanja električne energije, u ovom dijelu rada, bit će analiziran utjecaj promjene modela naplaćivanja električne energije na rezultate simulacije.

Korišten je trotarifni model naplaćivanja električne energije što znači da u danu postoje tri različite cijene električne energije:

- Niska tarifa: Traje od 00:00 h do 8:00 h i od 21:00 h do 0:00 h i iznosi 0,072968 €
- Srednja tarifa: Traje od 11:00 h do 18:00 h i iznosi 0,145936 €
- Visoka tarifa: Traje od 08:00 h do 11:00 h i od 18:00 do 21:00 i iznosi 0,2 €

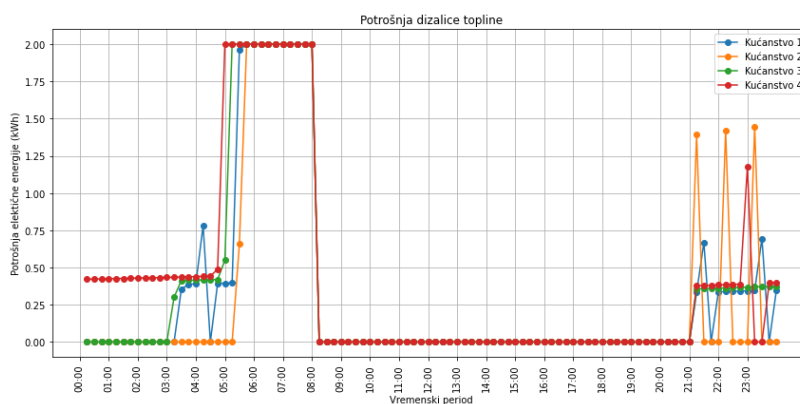
Uvođenje dodatne skuplje tarife značajno mijenja obrasce preuzimanja električne energije od opskrbljivača. Sa slike 4.17 primjetno je da tijekom

najviše cijene električne energije niti jedan član energetske zajednice, u niti jednom trenutku, ne preuzima električnu energiju od opskrbljivača, nego je ta potrošnja, zbog mogućnosti fleksibilnosti, preseljena u vremena nižih tarifa. Štoviše tokom vremena najveće cijene električne energije neka kućanstva prodaju manje količine električne energije mreži.



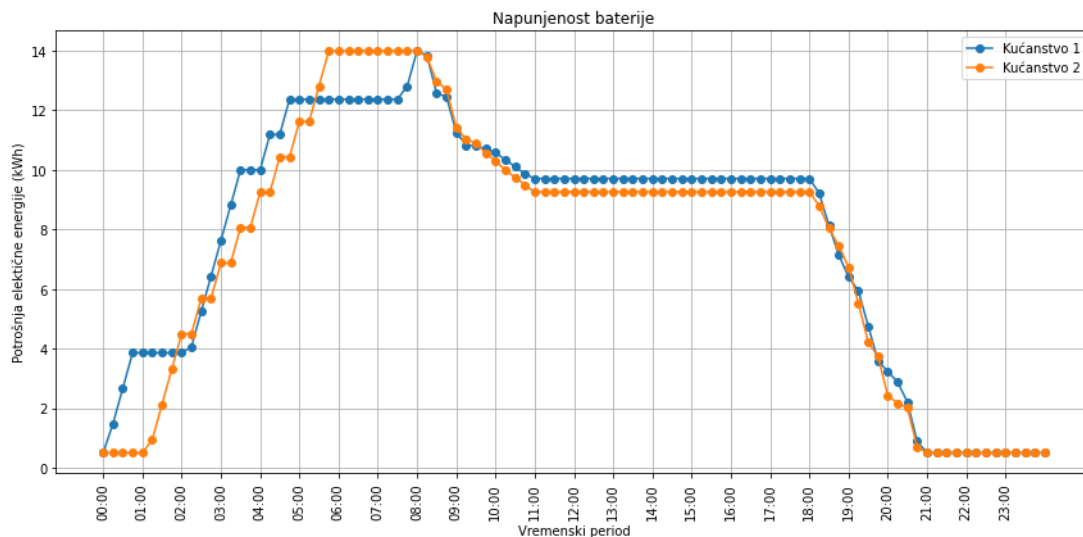
Slika 4.17: Električna energija preuzeta od opskrbljivača pri trotarifnom naplaćivanju električne energije

Prebacivanje potrošnje u druge vremenske periode i prodavanje električne energije tokom najviših cijena ostvarivo je zbog upravljive potrošnje i baterijskih spremnika, usporedbom slike 4.18 koja pokazuje potrošnju električne energije iz dizalice topline pri trotarifnom modelu naplaćivanja električne energije i slike 4.2 s dvotarifnim modelom, uočljivo je kako je u trotarifnom modelu bolje iskorištena mogućnost fleksibilnosti dizalice topline.



Slika 4.18: Potrošnja električne energije dizalice topline pri trotarifnom naplaćivanju električne energije

Slično ponašanje primjetno je na slici 4.19 gdje se baterija prazni samo u trenutcima najskuplje cijene električne energije, dok se za vrijeme najnižeg cjenovna razreda puni.



Slika 4.19: Stanje napunjenosti baterijskog spremnika kroz dan pri trotarifnom naplaćivanju električne energije

Vidljivo je da poboljšavajući modele naplaćivanja tj. kreirajući jasnije novčane signale kada je poželjnije, a kada nepoželjnije trošiti električnu energiju, može se poboljšati efikasnost i isplativost upravljive potrošnje i drugih dijelova koji energetskej zajednici omogućuju fleksibilan rad.

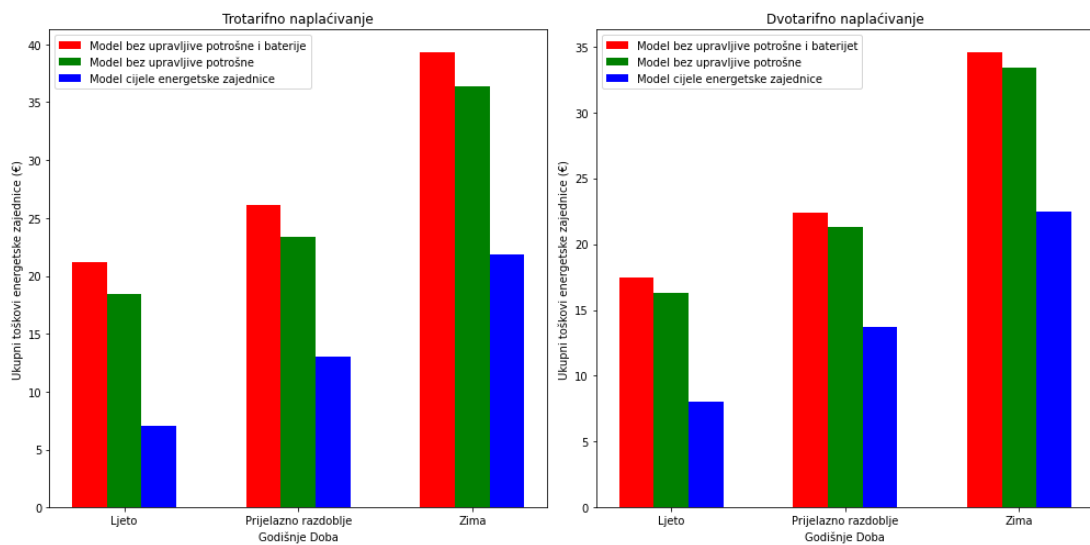
## 4.6. Usporedba rezultata

U ovom poglavlju analizira se kako utjecaji različitih scenarija, godišnjih doba i modela naplaćivanja utječu na ukupne troškove energetske zajednice.

Slika 4.20 prikazuje usporedbu ukupnih troškova energetske zajednice s obzirom na model naplaćivanja, godišnje doba i Scenarij. Primjetno je kako su, s obzirom na godišnje doba, u svim slučajevima troškovi najmanji tijekom ljeta, potom prijelaznog razdoblja i najveći tijekom zime. S obzirom na vrstu modela naplaćivanja električne energije, iako u dvotarifnom modelu imamo manje troškove (zbog prilagođavanja cijena niže i srednje tarife), implementacijom fleksibilnosti u energetskej zajednicu, tj. baterijskog spremnika i upravljive

potrošnje, razlika između troškova pripadajućih Scenarija se smanjuje što ukazuje na efikasnije iskorištavanje elemenata energetske zajednice.

Rezultati s obzirom na Scenarije pokazuju da model cijele energetske zajednice (Scenarij 1) pruža najveće uštede i najbolju ekonomsku učinkovitost u svim godišnjim dobima i tarifnim sustavima. Model bez upravljive potrošnje i baterijskog spremnika (Scenarij 3) ima najviše troškove u svim slučajevima, dok model bez upravljive potrošnje (Scenarij 2) pokazuje bolje rezultate, ali i dalje zaostaje za modelom cijele energetske zajednice.



Slika 4.20: Usporedba ukupnih troškova energetske zajednice s obzirom na modele naplaćivanja, godišnja doba i Scenarije



---

## Zaključak

U energetsom sustavu ima sve više obnovljivih izvora s varijabilnom i intermitentnom proizvodnjom. U budućnosti fleksibilne energetske zajednice mogu biti pružatelj pomoćnih usluga elektroenergetskom sustavu i smanjiti potrebu za vršnom proizvodnjom uz pružanje ušteda svojim članovima.

Analiza različitih scenarija s različitim stupnjem fleksibilnosti pokazuje da prisutnost upravljive potrošnje i baterijskih spremnika ne samo da optimizira potrošnju i minimizira troškove, već također omogućuje bolje iskorištavanje proizvedene električne energije iz PV-a i smanjenje ovisnosti o opskrbljivačima električne energije.

Usporedbom različitih tarifnih modela primjetno je da uz kompleksnije tarifne modele, potrošači dobivaju preciznije cjenovne signale, što dovodi do efikasnije i ekonomičnije potrošnje energije, dok se istovremeno unaprjeđuje stabilnost elektroenergetske mreže zbog smanjenja potrošnje električne energije tijekom vršnih opterećenja u danu.

Rezultati pokazuju da povećanje fleksibilnosti u energetske zajednicama smanjuje troškove i povećava efikasnost unutar energetske zajednice, dok precizniji cjenovni signali povećavaju iskoristivost fleksibilnosti uređaja smanjujući pritom troškove energetske zajednice.

Daljnja istraživanja mogu se fokusirati na uključivanje lokalnih poduzetništva u energetske zajednice i modele njihove upravljive potrošnje. Osim toga, uz istraživanja novih modela naplaćivanja električne energije mogu se uključiti i poticajne naknade za usluge fleksibilnosti.

---

## Literatura

- [1] European Commission, *Pariški sporazum o klimatskim promjenama*, (2015). Poveznica: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/>; pristupljeno: 15.svibnja 2024
- [2] European Commission, *Europski zeleni plan*, (2019). Poveznica: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/green-deal/>; pristupljeno 15.svibnja 2024
- [3] Anić Z., DOOR, *Energetske zajednice u Hrvatskoj*, (2024, ožujak). Poveznica <https://www.door.hr/energetske-zajednice-u-hrvatskoj/>; pristupljeno 15.svibnja 2024
- [4] Barabino, E., Fioriti, D., Guerrazzi, E., Mariuzzo, I., Poli, D., Raugi, M., Razaeei, E., Schito, E., Thomopoulos D. *Energy Communities: A Review on Trends, Energy System Modelling, Business Models, and Optimisation*, Sustainable Energy, Grids and Networks, 36, 2023.
- [5] US Department of Energy, *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*, Report to the United States Congress, 2006.
- [6] Morales-España, G., Martínez-Gordón, R., Sijm, J., *Classifying and modelling demand response in power systems*, Energy, 242, 3(2022)
- [7] Albadi H., El-Saadany E. F. *Demand Response in Electricity Markets: An Overview*, 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, (2007), str. 1-5.
- [8] Gržanić M., Capuder T., *Coordinated scheduling of renewable energy balancing group*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 125, 2021.
- [9] Bloess A., Schill W. P., Zerrahn A., *Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials*, Appl. Energy, 212, 2(2017), str. 1611-1626.
- [10] Heinen S., Burke D., O'Malley M., *Electricity, gas, heat integration via residential hybrid heating technologies e An investment model assessment*, Energy, 109, 8(2016), str. 906-919.
- [11] Schlemminger M., Ohrdes T., Schneider E., Knoop M., *Dataset on electrical single-family house and heat pump load profiles in Germany*, Sci Data 9, 56, 2(2022), str. 1-56.
- [12] Cui S., Wang Y., Shi Y., Xiao J., *An Efficient Peer-to-Peer Energy-Sharing Framework for Numerous Community Prosumers*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16, 12(2020), str. 7402-7412.

- 
- [13] Tesla, *Powerwall*, (2015, travanj), Poveznica: <https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%202 AC Datasheet en GB.pdf> pristupljeno : 15.lipanj 2024.
- [14] Mitsubishi Electric, *Suspended PCA71 Heat Pump*, Poveznica: <https://www.mitsubishielectric.co.nz/heatpump/i/69278B/suspended-pca71-heat-pump>, pristupljeno: 19.lipanj 2024.
- [15] Stelt S., AlSkaif T., Sark W, *Techno- economic analysis of household and community energy storage for residential prosumers with smart appliances*, *Applied Energy*, 209,1(2018), str. 266-276.

---

## Sažetak

Europska unija podupire formiranje energetske zajednice kao jedan od načina za povećanje udjela obnovljivih izvora energije i smanjenje ukupnih energetske troškova, dok time istovremeno potiče krajnje korisnike kao aktivne sudionike na tržištu električne energije. Energetske zajednice često uključuju različite potrošače, poput kućanstava i poduzetništva, koji posjeduju fotonaponske elektrane i baterijske spremnike te upravljive električne uređaje.

U radu su napravljeni i opisani pregledi modela za upravljanje energetskim zajednicama te modela energetske sustava korištenih u zajednicama. U praktičnom dijelu rada napravljen je model upravljanja energetskom zajednicom čiji članovi koriste fotonaponske panele, baterijske spremnike te upravljive uređaje poput dizalica topline i električnih vozila. Model je implementiran u programskom jeziku Python koristeći programske knjižnice pandas, gurobipy i pvlb. Model je evaluiran s obzirom na karakteristične scenarije potrošnje i proizvodnje električne energije, modele naplaćivanja električne energije i godišnja doba te je interpretirano kako dani čimbenici utječu na fleksibilnost i troškove električne energije zajednice.

---

## **Abstract**

The European Union supports the formation of energy communities to increase the share of renewable energy sources and reduce overall energy costs, while simultaneously encouraging end-users to participate actively in the electricity market. Energy communities often include various consumers, such as households and businesses, that own photovoltaic power plants and battery storage, as well as controllable electrical devices.

This paper provides a review of models for managing energy communities and energy system models used within these communities. In the practical part of the paper, a management model for an energy community was developed. The model was implemented in the Python programming language using the pandas, gurobipy, and pvlb libraries. The model was evaluated based on characteristic scenarios of electricity consumption and production, electricity pricing models, and seasons of the year. It was interpreted how these factors affect the flexibility and costs of the community's electricity.

---

## Skraćenice

DIE	Distribuirani izvor energije
PV	Fotonaponski panel
EV	Električno vozilo
P2P	među-korisnička (Peer to Peer)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
DSM	Upravljanje sa strane potražnje
DR	Upravljanje potrošnje
MILP	Mješovito cjelobrojno linearno programiranje
COP	Koeficijent performansi dizalice topline

---

## Dodatak A

U nastavku su dani iznosi promjenjivih parametara upravljivih uređaja za svaku izvedenu simulaciju. Za dizalici topline to su minimalna i maksimalna temperatura prostora, a uređajima tipa B, to je početak i kraj mogućeg vremena rada.

Tablica 1: Parametri temperatura rada dizalica topline za svaku simulaciju

Dizalica topline			
Član	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
Zima			
1	$T_{\min}$ : 18.5 °C $T_{\max}$ : 22 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
2	$T_{\min}$ : 19 °C $T_{\max}$ : 23 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
3	$T_{\min}$ : 20 °C $T_{\max}$ : 23°C	T: 20 °C	T: 20 °C
4	$T_{\min}$ : 21 °C $T_{\max}$ : 23 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
Prijelazno razdoblje			
1	$T_{\min}$ : 18.5 °C $T_{\max}$ : 22 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
2	$T_{\min}$ : 19 °C $T_{\max}$ : 23 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
3	$T_{\min}$ : 20 °C $T_{\max}$ : 23 °C	T: 20 °C	T: 20 °C
4	$T_{\min}$ : 21 °C	T: 20 °C	T: 20 °C

	$T_{\max}: 23\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Ljeto			
1	$T_{\min}: 18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max}: 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	$T_{\min}: 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max}: 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	$T_{\min}: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max}: 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	$T_{\min}: 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max}: 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T: 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 2: Parametri mogućih vremena rada uređaja tipa B za svaku simulaciju

Uređaji tipa B			
Član	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
Perilica rublja			
1	$H_{\text{start}}: 03:45\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 08:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 08:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$
2	$H_{\text{start}}: 00:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 17:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 19:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 17:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 19:00\text{ h}$
3	$H_{\text{start}}: 12:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 24:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 08:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 08:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 10:00\text{ h}$
4	$H_{\text{start}}: 18:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 24:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 07:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 09:00\text{ h}$	$H_{\text{start}}: 07:00\text{ h}$ $H_{\text{end}}: 09:00\text{ h}$
Punjač električnih auta			



---

1	-	-	-
2	H <sub>start</sub> : 00:00 h H <sub>end</sub> : 12:30 h	H <sub>start</sub> : 17:00 h H <sub>end</sub> : 24:00 h	H <sub>start</sub> : 17:00 h H <sub>end</sub> : 24:00 h
3	H <sub>start</sub> : 00:00 h H <sub>end</sub> : 12:00 h	H <sub>start</sub> : 19:00 h H <sub>end</sub> : 24:00 h	H <sub>start</sub> : 19:00 h H <sub>end</sub> : 24:00 h
4	-	-	-