

Modeliranje energetske zajednice s naglaskom na trgovanju unutar zajednice

Boromisa, Ivana

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:782061>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 78

**MODELIRANJE ENERGETSKIH ZAJEDNICA S NAGLASKOM
NA TRGOVANJU UNUTAR ZAJEDNICE**

Ivana Boromisa

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 78

**MODELIRANJE ENERGETSKIH ZAJEDNICA S NAGLASKOM
NA TRGOVANJU UNUTAR ZAJEDNICE**

Ivana Boromisa

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 78

Pristupnica: **Ivana Boromisa (0036523310)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: prof. dr. sc. Marko Delimar

Zadatak: **Modeliranje energetske zajednice s naglaskom na trgovanju unutar zajednice**

Opis zadatka:

Trenutna energetska strategija Europske unije potiče stvaranje energetske zajednice kako bi se povećao udio obnovljivih izvora energije i smanjili ukupni troškovi, a pritom postavlja krajnjeg korisnika kao ključnog sudionika na tržištu električne energije. Energetske zajednice uglavnom se sastoje od aktivnih potrošača, koji mogu biti kućanstva i poduzetništva, često s fotonaponskim elektranama, a ponekad i s baterijskim spremnicima. Lokalno tržište električne energije, koncept je u nastajanju koji omogućuje aktivno sudjelovanje krajnjih korisnika na tržištima električne energije, a posebno je zanimljiv slučaj kada postoje energetske zajednice čiji članovi imaju mogućnost razmjene energije sa opskrbljivačima i sa drugim članovima zajednice putem istorazinskog (peer-to-peer, odnosno p2p) pristupa. Vaš je zadatak, u teorijskom dijelu, napraviti pregled matematičkih modela za p2p trgovanje unutar energetske zajednice. U praktičnom dijelu rada, vaš je zadatak napraviti model upravljanja energetske zajednicom čiji članovi koriste p2p pristup razmjene električne energije. Potrebno je evaluirati model na karakterističnim scenarijima potrošnje i proizvodnje električne energije te interpretirati kako profili potrošnje, aktivni elementi članova zajednice te cijene električne energije utječu na troškove električne energije unutar zajednice.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvala

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Marku Delimaru na pomoći, sugestijama, strpljenju i uloženom vremenu tijekom studiranja.

Zahvaljujem Luki Budinu što mi je pomogao naći i ispraviti greške, bez čije podrške ne bih uspjela na vrijeme predati rad.

Zahvaljujem Lauri, Ani, Hrvoju i Lopiju koji su mi pomagali i bili uz mene tijekom studiranja.

Konačno, zahvaljujem mami, tati, Jeleni i Juraju koji me trpe i podupiru.

Sadržaj

Uvod	1
1. Definicija energetske zajednice	3
1.1. Zajednica obnovljive energije	3
1.2. Energetska zajednica građana	4
1.3. Usporedba energetske zajednice	5
1.4. Članovi energetske zajednice	7
2. <i>Peer-to-peer</i> dijeljenje energije	8
2.1. Definicija <i>peer-to-peer</i> dijeljenja energije	8
2.2. Prednosti P2P dijeljenja energije	9
3. Lokalno tržište električne energije s P2P dijeljenjem energije	10
3.1. Uvjeti za korištenje P2P dijeljenja energije	10
3.2. Centralizirano tržište	12
3.3. Decentralizirano tržište	14
3.4. Distribuirano tržište	17
4. Matematički modeli za P2P trgovanje unutar energetske zajednice	20
4.1. Tržišni modeli	21
4.1.1. Srednja tržišna stopa	21
4.1.2. Dvostruka dražba	21
4.1.3. Omjer ponude i potražnje	24
4.2. Teorija igara	25
4.3. Model simulacije	30
4.4. Linearna optimizacija	35
5. Model upravljanja energetskom zajednicom	42

6.	Opis rezultata.....	50
6.1.	Osnovni slučaj.....	50
6.1.1.	Kupovina P2P energije.....	50
6.1.2.	Prodaja energije P2P trgovanjem.....	53
6.1.3.	Električno vozilo kućanstva	55
6.1.4.	Baterijski spremnik	56
6.2.	Promjena cijene električne energije.....	58
6.2.1.	Cijena električne energije za datum 2.6.2024.	58
6.2.2.	Cijena električne energije za datum 3.6.2024.	58
6.3.	Promjena krivulje opterećenja	59
6.3.1.	Subota.....	59
6.3.2.	Nedjelja	60
6.4.	Slučaj bez P2P trgovanja	61
7.	Razmatranje	62
8.	Zaključak.....	63
9.	Literatura.....	64
	Sažetak	70
	Summary	71
	Popis kratica	72
	Popis tablica.....	73
	Popis slika.....	74
	Dodatak: programski kod	76

Uvod

Elektroenergetski sustavi (EES) uobičajeno imaju određen smjer tokova snaga, od velikih centara proizvodnje do centara potrošnje [1]. Zastupljenost distribuiranih izvora energije (DES, prema engl. *distributed energy source*), uključujući proizvodnju iza brojila (osobito krovni solarni paneli) i spremnika energije (baterija) ubrzano raste [2]. Sve veća zastupljenost distribuiranih izvora energije mijenja prethodno definirane tokove snaga u EES-u. Napredak informacijske i komunikacijske tehnologije (IKT) omogućuje razvoj naprednih mreža. Napredne mreže, koristeći IKT, omogućuju dvosmjerni tok snaga, mjerenje i upravljanje električnom energijom u stvarnom vremenu. Napredak IKT-a i pojava Internet stvari (engl. *Internet of Things*) omogućava komunikaciju i učinkovit tok snaga između proizvodnje i potrošnje pomoću sustava upravljanja energijom (EMS, prema engl. *energy management system*) [1]. Navedeni napredak u tehnologiji i smanjenje troškova solarnih sustava omogućava njihovu širu primjenu i porast broja kupaca s vlastitom proizvodnjom (dalje u tekstu: prosumera) [2].

Prosumer je krajnji potrošač, ili skupina njih, koji koristi/skladišti električnu energiju proizvedenu iza brojila [3]. Prosumeri se još nazivaju i aktivni kupci ili aktivni potrošači [3].

Snižavanje cijena tehnologije dovodi do sve manjih subvencija za DES. Istodobno, raste interes za efikasnijim upravljanjem i maksimiziranjem koristi DES-a [2]. Europska unija (EU) kontinuirano nastoji smanjiti emisije stakleničkih plinova i povećati upotrebu energije iz obnovljivih izvora energije (OIE) [4]. Mehanizam za financiranje energije iz obnovljivih izvora (OI) uspostavljen je Uredbom (EU) 2020/1294 [5]. Energetska politika EU potiče prijelaz s fosilnih goriva na čistu energiju, ostvarivanje Pariškog sporazuma i dekarbonizaciji energetskeg sustava EU-e. Njezini su ciljevi i mjereni navedeni u sklopu regulatornog paketa „Čista energija za sve Europljane“ kojeg je EU donijela 2019. Postavljen je obvezujući cilj od 32 % za OIE u kombinaciji izvora energije EU-a do 2030.

Paketom „Čista energija za sve Europljane“ revidiran je okvir energetske politike EU, a time i Direktiva o energiji iz obnovljivih izvora (2019/2001/EU). Revizijom direktive definirani su pojmovi energetske zajednica građana (CEC, prema engl. *citizen energy community*) i zajednica obnovljive energije (REC, prema engl. *renewable energy community*). Energetske zajednice omogućuju građanima da zajednički koriste energiju i iskoriste poticaje za proizvodnju obnovljive energije [6].

Sudionici energetske zajednice (EZ) mogu uzajamno dijeliti električnu energiju, odnosno dijeliti energiju po *peer-to-peer* (P2P) principu [2]. U radu se za uzajamno dijeljenje energije još koristi i skraćeno P2P trgovanje energijom. P2P trgovanje omogućuje direktnu prodaju električne energije između članova energetske zajednice. Oslonac tržišta su članovi energetskih zajednica i njihova spremnost na trgovanje električnom energijom [7].

1. Definicija energetske zajednice

Energetska zajednice su definirane direktivama Europske unije i nacionalnim propisima. Radi se o sjedećim direktivama:

- Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora energije,

- Direktiva (EU) 2019/994 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. lipnja 2019. o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i izmjeni Direktive 2012/27/EU (preinaka) i

- Prijedlog Direktive Europskog parlamenta i Vijeća o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište plinova iz obnovljivih izvora i prirodnih plinova i vodika, i dodatno u nacionalnim zakonima članica [8].

U Hrvatskoj su energetske zajednice definirane u Zakonu o tržištu električne energije [3] i Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji [9]. Energetske zajednice su „otvorene i dobrovoljne i kombiniraju nekomercijalne ciljeve s ekološkim i društvenim ciljevima zajednice.“

Postoje dva tipa energetske zajednice: zajednica obnovljive energije i energetske zajednice građana [8].

1.1. Zajednica obnovljive energije

Zajednice obnovljive energije definirane su u drugom članku, na 16. točki Direktive (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora energije. REC je „pravni subjekt:

(a) koji je, u skladu s primjenjivim nacionalnim pravom, utemeljen na otvorenom i dobrovoljnom sudjelovanju, neovisan i pod stvarnim nadzorom dioničara ili članova smještenih u blizini projekata energije iz obnovljivih izvora kojih je taj pravni subjekt vlasnik ili ih on razvija;

(b) čiji su dioničari ili članovi fizičke osobe, MSP-i ili lokalna tijela, uključujući općine;

(c) čija je prvotna svrha pružiti okolišnu, gospodarsku ili socijalnu korist zajednice za svoje dioničare ili članove ili za lokalna područja na kojima djeluje, a ne financijska dobit.“ [10]. Dodatno, u Hrvatskoj, definirane su u Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji u članku 4. točki 63. kao „pravne osobe koje ispunjavaju sljedeće uvjete: koje su, u skladu s primjenjivim nacionalnim pravom, utemeljene na otvorenom i dobrovoljnom sudjelovanju, neovisne i pod stvarnim nadzorom dioničara ili članova smještenih u blizini projekata energije iz obnovljivih izvora kojih je ta pravna osoba vlasnik ili ih ona razvija, čiji su dioničari ili članovi fizičke osobe, mala i srednja poduzeća ili jedinice lokalne ili područne (regionalne) samouprave, te čija je prvotna svrha pružiti okolišnu, gospodarsku ili socijalnu korist zajednice za svoje dioničare ili članove ili za lokalna područja na kojima djeluje, a ne financijska dobit.“ U 52. članku Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji su dodatno opisane i navedena su njihova prava [9].

1.2. Energetska zajednica građana

Energetske zajednice građana definirane su najprije u Direktivi (EU) 2019/944 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. lipnja 2019. o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i izmjeni Direktive 2012/27/EU (preinaka) na 11. točki članka 2 u 1. poglavlju. CEC je: „pravni subjekt:

(a) koji se temelji na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju te je pod stvarnom kontrolom članova ili vlasnika udjela koji su fizičke osobe, lokalna tijela, uključujući općine, ili mala poduzeća,

(b) čija je primarna svrha pružanje okolišne, gospodarske ili socijalne koristi svojim članovima ili vlasnicima udjela ili lokalnim područjima na kojima djeluje, a ne stvaranje financijske dobiti, i

(c) koji može sudjelovati u proizvodnji, među ostalim iz obnovljivih izvora, distribuciji, opskrbi, potrošnji, agregiranju, skladištenju energije, uslugama energetske učinkovitosti ili uslugama punjenja za električna vozila ili pružati druge usluge svojim članovima ili vlasnicima udjela [11];“

Vrlo slično definirane su i u prijedlogu Direktive Europskog parlamenta i Vijeća o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište plinova iz obnovljivih izvora i prirodnih plinova i vodika u članku 2, na 70. točki. Prema tom prijedlogu CEC je: „pravni subjekt:

(a) koji se temelji na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju te je pod stvarnom kontrolom članova ili vlasnika udjela koji su fizičke osobe, lokalna tijela, uključujući općine, ili mala poduzeća;

(b) čija je primarna svrha pružanje okolišne, gospodarske ili socijalne zajedničke koristi svojim članovima ili vlasnicima udjela ili lokalnim područjima na kojima djeluje, a ne stvaranje financijske dobiti; i

(c) koji se bavi proizvodnjom, distribucijom, opskrbom, potrošnjom ili skladištenjem plina iz obnovljivih izvora u sustavu prirodnog plina ili svojim članovima ili dioničarima pruža usluge energetske učinkovitosti ili usluge održavanja [12]“.

U Hrvatskoj je CEC definirana u Zakonu o tržištu električne energije u 21. točki članka 3. To je „pravna osoba koja se temelji na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju te je pod stvarnom kontrolom članova ili vlasnika udjela koji su fizičke osobe, jedinice lokalne samouprave ili mala poduzeća, a čija je primarna svrha pružanje okolišne, gospodarske ili socijalne koristi svojim članovima ili vlasnicima udjela ili lokalnim područjima na kojima djeluje, a ne stvaranje financijske dobiti i koja može sudjelovati u proizvodnji, među ostalim iz obnovljivih izvora, opskrbi, potrošnji, agregiranju, skladištenju energije, uslugama energetske učinkovitosti ili uslugama punjenja za električna vozila ili pružati druge energetske usluge svojim članovima ili vlasnicima udjela.“ Dodatno su opisane i daljnje definirane u 26. članku, a u 27. članku su navedena njihova prava i obveze [3].

1.3. Usporedba energetskih zajednica

Zajednice obnovljive energije i energetske zajednice građana imaju sličnosti. U oba tipa energetskih zajednica sudjelovanje je dobrovoljno i trebalo bi biti jednostavno postati njihov član ili izaći iz zajednice. Osim upravljanja

slične su u vlasništvu i kontroli. U oba tipa energetske zajednice građani, lokalna uprava i mali poduzetnici (čija primarna ekonomska djelatnost nije energetska) sudjeluju i učinkovito kontroliraju energetska zajednica građana, odnosno zajednicu obnovljive energije. Glavna svrha im je ostvarivanje društvene i ekološke koristi, a ostvaruju je proizvodnjom, pohranom, distribucijom i potrošnjom energije, te pružanje usluga povezanih s energijom, opskrbom i dijeljenjem. Energetske zajednice i njihovi članovi moraju zadovoljiti iste obaveze kao i drugi članovi tržišta [8].

Njihove razlike navedene su u tablici 1:

Tablica 1 Razlike između zajednica obnovljivih energija i energetske zajednice građana (Europska komisija, 2019)

	Zajednice obnovljivih izvora	Energetske zajednice građana
Geografski opseg	Mora se nalaziti u blizini projekta OIE koji posjeduje/razvija ta energetska zajednica	Ne ovise o neposrednoj blizini
Aktivnosti	Razne, povezane s OIE	U energetske sektoru, neovisno o izvoru energije
Članstvo	Ograničeno na: fizičke osobe, lokalne uprave, mikro, male i srednje poduzetnike (kojima članstvo u energetske zajednici nije primarna ekonomska aktivnost)	Bilo tko može biti član, ali dionici uključeni u velike komercijalne aktivnosti, kojima je primarna ekonomska aktivnost u energetske sektoru ne mogu donositi odluke
Autonomija	Može biti autonomna od pojedinih članova/drugih tradicionalnih tržišnih aktera	Odluke mogu donositi samo članovi/dioničari koji nisu uključeni u velike

	koji sudjeluju u zajednici kao članovi ili dioničari	komercijalne aktivnosti u energetskom sektoru
Efektivna kontrola	Mikro, mala i srednja poduzeća u izravnoj blizini OIE projekta	Svi članovi osim srednjih i velikih poduzeća

1.4. Članovi energetske zajednice

Članovi energetske zajednice mogu biti potrošači, proizvođači i aktivni kupci. Aktivni kupci definirani su u Direktivi (EU) 2019/944 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. lipnja 2019. o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i izmjeni Direktive 2012/27/EU kao „krajnji kupac ili skupina krajnjih kupaca koji djeluju zajedno i koji troše ili skladište električnu energiju proizvedenu u vlastitom prostoru smještenom unutar definiranih granica ili ako države članice to dopuštaju, u drugom prostoru ili koji prodaju električnu energiju koju sami proizvode ili sudjeluju u programima fleksibilnosti ili energetske učinkovitosti, uz uvjet da te djelatnosti nisu njihova primarna trgovačka ili profesionalna djelatnost [11];“

Najmanja energetska zajednica sastoji se od barem jednog potrošača i proizvođača, a svaki član zajednice mora imati napredno brojilo [13]. Napredna brojila su uređaji koji mjere potrošnju električne energije, ali i druge podatke poput iznos struje, napona, faktor snage i imaju mogućnost slati ih operatoru mreže u određenom vremenskom intervalu [14]. Potrebni podatci su opterećenje potrošača i prosumera (nakon vlastite potrošnje), višak proizvodnje prosumera i ukupnu proizvodnju proizvođača (mjeri je operator distribucijskog sustava, ODS, engl. *distribution system operator*) [13].

2. Peer-to-peer dijeljenje energije

2.1. Definicija peer-to-peer dijeljenja energije

Peer-to-peer trgovanje energijom definirano je u Direktivi (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz OIE kao „prodaja energije iz obnovljivih izvora među sudionicima tržišta putem ugovora s unaprijed utvrđenim uvjetima kojima se uređuje automatsko izvršavanje i rješavanje transakcije izravno među sudionicima tržišta ili neizravno putem ovjerene treće strane koja sudjeluje na tržištu, poput agregatora. Pravom na uzajamno trgovanje ne dovode se u pitanje prava i obveze uključenih strana kao što su krajnji korisnici, proizvođači, opskrbljivači ili agregatori.“ Peer-to-peer trgovanje energijom još se naziva i uzajamno trgovanje [10]. Glavna karakteristika P2P trgovanja je to što uklanja posrednika trgovanja. P2P trgovanje energijom omogućuje prosumerima da kupuju električnu energiju direktno među sobom: koristeći posebne platforme ili direktno tehnologijom bez posrednika. Ta – tehnologijom distribuirane glavne knjige (engl. *Distributed ledger technology*) [15]. Način P2P trgovanja ovisi o strukturi mreže u kojoj se odvija. Postoje tri osnovna tipa P2P trgovanja: trgovanje unutar elektroenergetske mreže, trgovanje unutar lokalne mikromreže spojene na veću mrežu i unutar otočne mikromreža.

Kod P2P trgovanja unutar elektroenergetske mreže sudionici trguju po principu slobodnog tržišta, upravljaju cijenama i rizikom. Ovaj tip P2P trgovanja zahtijeva najmanje ulaganja, u usporedbi s drugim tipovima.

Kod trgovanja unutar lokalnih mikromreža spojenih na veću mrežu P2P trgovanje se koristi unutar lokalne mikromreže. Također, lokalna mikromreža prodaje viškove energije većoj mreži. Ovaj tip P2P dijeljenja zahtijeva veća ulaganja nego kod tržišta unutar centralne mreže, ali omogućava i veću korist.

Treći tip P2P dijeljenja energije je unutar mikromreža u otočnom pogonu. Sve transakcije unutar mikromreže izvršavaju se na P2P tržištu. Mikromreža, a tako i tržište električnom energijom potpuno je odvojeno od EES-a. Za ovaj tip P2P dijeljenja potrebne su najveće investicije, ali donosi i najveću korist.

Najčešći tipovi ulaganja u P2P trgovanje su prva dva tipa, a s njihovim napretkom, investitori nastoje prijeći na otočne mikromreže. Prijelaz s tržišta unutar centralne mreže i lokalne mikromreže spojene na veću mrežu na otočne mikromreže ostvarit će se tek kada je tehnologija unutar njih dovoljno napredovala [14].

Osim o strukturi mreže, postoje drugačiji tipovi P2P dijeljenja energijom ovisno o strukturi tržišta na kojem se trguje. Takvi tipovi P2P trgovanja energijom objašnjeni su u poglavlju 3 ovog rada.

2.2. Prednosti P2P dijeljenja energije

Prednosti korištenja P2P trgovanja energijom su sljedeće: smanjenje troškova električne energije, veća fleksibilnost elektroenergetskog sustava, lakše balansiranje i smanjenje zagušenja, veći udio i lakši pristup zelenoj energiji, mogućnost odabira izvora električne energije i praćenja potrošnje, omogućuje sigurne transakcije. Smanjenje troškova je moguće zbog manjeg korištenja dalekovoda i time su potrebne manje investicije u infrastrukturu za prijenos električne energije, a i manji je trošak održavanja prijenosne mreže. Manjim korištenjem prijenosnih vodova dolazi do manje zagušenja mreže. Budući da korisnici imaju mogućnost odabira izvora energije, tako imaju i mogućnost podupirati lokalne projekte obnovljivih izvora, a time i veći pristup zelenoj energiji. Sigurne transakcije omogućene su korištenjem *blockchain* tehnologije, koja omogućuje decentraliziranu pohranu informacija o svim transakcijama. Informacije nije moguće krivotvoriti ili mijenjati na neki drugi način. Također, tehnologija podržava pametne ugovore (djelomično automatski izvršeni uvjeti ugovori) koji se nadziru [14].

3. Lokalno tržište električne energije s P2P dijeljenjem energije

Postoje više struktura lokalnih tržišta energije s P2P dijeljenjem energije. Najčešća je podjela na centralizirano tržište, decentralizirano tržište i distribuirano tržište [16].

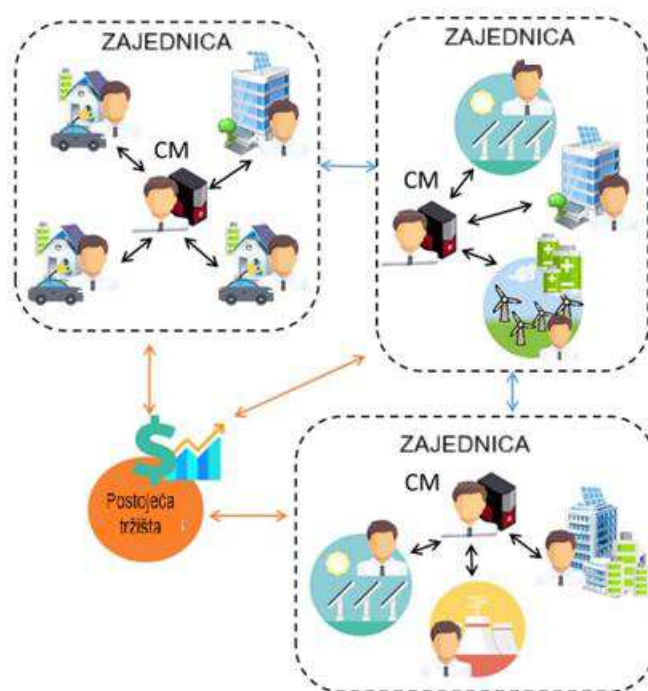
3.1. Uvjeti za korištenje P2P dijeljenja energije

Kako bi bilo moguće koristiti P2P trgovanje energijom, potrebno je zadovoljiti tri uvjeta: dostatan hardver, softver i zakonski okvir. Uvjete je moguće podijeliti na tehničke, političke, zakonodavne i dioničke. Tehnički su uvjeti sljedeći: hardver, softver i komunikacijski protokol. Hardver se sastoji od fizičkog i virtualnog dijela. U fizički dio spadaju lokalni generatori obnovljivih izvora energije, skladište energije, vodovi koji povezuju sudionike u naprednu mrežu (neovisno o njenoj veličini – mini, mikro ili nano mreža), te napredna brojila [17]. Integracijom naprednih brojila sa sustavom temeljenim na internetu, moguće je pratiti potrošnju i napraviti preciznija predviđanja potrošnje [14]. Virtualni sloj hardvera je IKT mreža, koja omogućuje komunikaciju između korisnika, izvršava transakcije i nadzire. Uz IKT mrežu u virtualni sloj hardvera spada i EMS. Softverski dio tehničkih zahtjeva su: platforma za P2P trgovanje energijom, napredni alati za predviđanje potrošnje i proizvodnje, robustan alat za analizu podataka i algoritam za automatizirane P2P transakcije ili *blockchain* tehnologija za smanjenje troškova P2P trgovanja. Zadnji tehnički uvjet je komunikacijski protokol koji je zajednički protokol za koordinaciju između: sustava, mreže, tržišta, platforme, potrošača i prosumera. Politički uvjeti je postojanje politike koja podupire decentraliziranu proizvodnju i efikasnije korištenje trenutne infrastrukture elektroenergetske mreže. Takva politika npr. podupire provedbu pilot projekata kojima se testiraju tehnička rješenja i tržišni modeli i omogućavaju dijeljenje dobivenih rezultata. Politika koja omogućava provedbu takvih projekata ima tzv. „regulatorini sandbox“ [17]. Regulatorni *sandbox* je projekt s ciljem za osiguravanjem okvira za regulatore, nadzorna tijela i *blockchain* inovatore da se uključe u regulatorni

dijalog, identificiraju probleme iz pravne i regulatorne perspektive u sigurnom i kontroliranom okruženju. Na taj način može se osigurati pravna sigurnost za inovativna i decentralizirana tehnička rješenja, jedno od kojih je *blockchain* tehnologija [18]. Uz to, politike moraju poboljšati pristup kapitalu developerima platformi. Regulatorni zahtjevi odnose se na tržište i prijenosnu mrežu. Na tržištu je potrebno omogućiti dijeljenje energije između prosumera i potrošača koji ne proizvode obnovljivu energiju, uspostaviti propise o skupljanju i pristupu podacima, kao i kibernetičkoj sigurnosti i privatnosti platformi, definirati jasne uloge i odgovornosti dionika uključenih u P2P dijeljenje energije, osigurati da dionici P2P dijeljenja energijom poštuju prava korisnika i definirati pravila tržišnog djelovanja. Regulatorni zahtjevi za prijenosnu mrežu su sljedeći: omogućiti operatoru distribucijskog sustava da poveća fleksibilnost sustava pomoću P2P platformi, definirati tehničke kriterije za pomoćne usluge elektroenergetskog sustava i odrediti promjene u mreži kada P2P dijeljenje energijom koristi glavnu mrežu. Uloge dionika i njihove odgovornosti su sljedeće: potrošači i prosumeri sudjeluju u P2P dijeljenju energijom i omogućuju usluge elektroenergetskom sustavu, ili pojedinačno ili pomoću opskrbljivača ili agregatora; P2P platforme/operatori tržišta upravljaju i unaprjeđuju platforme za P2P dijeljenje energijom pomoću IKT kompanija i osiguravaju siguran i pouzdan rad platformi [17].

3.2. Centralizirano tržište

Centraliziranim tržištem upravlja koordinator tržišta. Koordinator tržišta prikuplja sve potrebne podatke od potrošača i prosumera, centralno provodi usklađivanje i određivanje cijena i izravno kontrolira uređaje nekih potrošača/prosumera. Centralizirana tržišta relativno su jednostavna za dizajnirati jer mogu osigurati maksimalnu društvenu dobrobit, a osiguravaju i visoku razinu sigurnosti. Glavni nedostatak centraliziranog tržišta je osjetljivost na kvarove. Kvar u jednoj točki uzrokuju potencijalne probleme s autonomijom i sigurnosti sudionika. Također, broj problema raste s povećanjem brojem korisnika [16], te se iz tih razloga najčešće koristi u mikromrežama ili u grupama susjednih prosumera koji su geografski blizu. Centralizirano tržište još se naziva i tržište bazirano na zajednici. Članovi zajednice imaju zajedničke cilj dijeljenje zelene energije i jedna od glavnih obilježja ovakvog tipa tržišta je međusobna suradnja.



Slika 3.1 Centralizirano P2P tržište energijom (Sousa, Soares, Pinson, Moret, Baroche, Sorin, 2019)

Na slici 3.2 prikazan dizajn centralnog tržišta s tri energetske razine. Svaka zajednica ima svog koordinatora tržište i vlastito tržište. Sudionici unutar zajednice dijele se na sudionike s pohranom energije i sudionici koji koriste energiju iz pohrane. Matematički model opisan je jednadžbama (1) – (6). Uz to da za jednadžbu (1) vrijedi jednadžba (2).

$$\min_D \sum_{n \in \Omega} C_n(p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n) + G(q_{imp}, q_{exp}) \quad (1)$$

$$p_n + q_n + \alpha_n - \beta_n = 0, \forall n \in \Omega \quad (2)$$

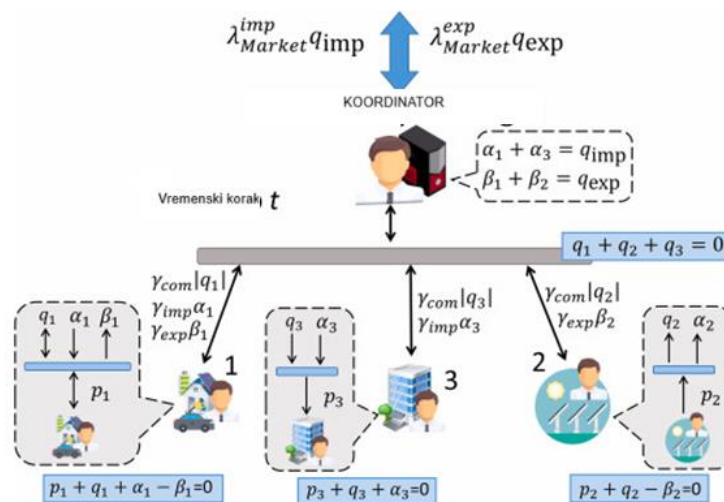
$$\sum_{n \in \Omega} q_n = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{n \in \Omega} \alpha_n = q_{imp} \quad (4)$$

$$\sum_{n \in \Omega} \beta_n = q_{exp} \quad (5)$$

$$\underline{P}_n \leq P_n \leq \overline{P}_n, \forall n \in \Omega \quad (6)$$

Gdje je $D = (p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n \in \mathbb{R})_{n \in \Omega}$. p_n je proizvodnja ili potrošnja člana n , ovisno o tome je li proizvođač ili potrošač. Ω je skup koji odgovara svim članovima tržišta.

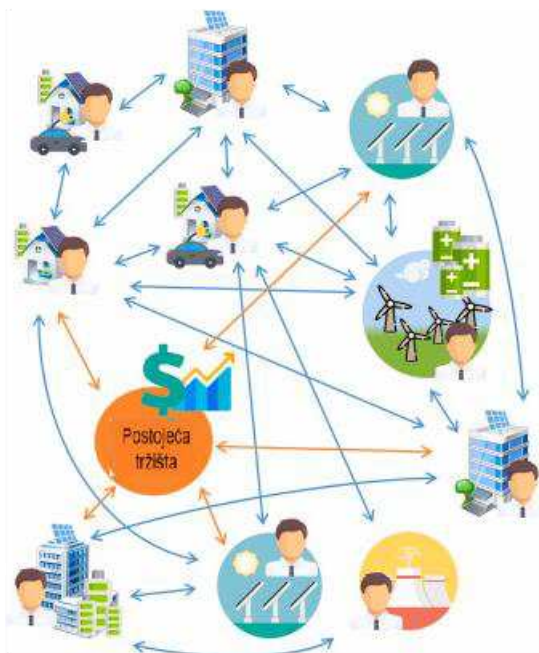


Slika 3.2 Primjer centralnog P2P tržišta energijom (Sousa, Soares, Pinson, Moret, Baroche, Sorin, 2019)

Na slici 3.2 prikazan je primjer tržišta baziranog na zajednici zajedno s jednadžbama koje opisuju njegov matematički model. Svaki sudionik unutar zajednice dijeli energiju pomoću q_n . Sudionici ne znaju kojemu sudioniku dijele energiju, budući da je sustav centraliziran i dijeljenjem energije upravlja koordinator zajednice/tržišta prema jednadžbi (3). Iako dijeljenjem energije upravlja koordinator, ali unutar zajednice/zajedničkog tržišta, svaki sudionik može trgovati i s vanjskim tržištem. Trgovanje s vanjskim tržištem određeno je varijablama α_n i β_n . α_n predstavlja energiju uvoza, a β_n energiju izvoza. Zbroj trgovanja energije uvoza i izvoza (α_n i β_n) centralno obrađuje koordinator tržišta jednadžbama (6) i (5). (1) je funkcija cilja u koju je uračunat trošak povezan sa svim izborima: p_n je kvadratna funkcija troška; γ_{com} je transakcijski trošak povezan s q_n ; za α_n i β_n mogu se koristiti težinski koeficijenti γ_{imp} i γ_{exp} , koji preslikavaju preferenciju sudionika za trgovanje s vanjskim tržištem. Funkcija $G(q_{imp}, q_{exp})$ pokazuje odnos trgovine energije s vanjskim tržištem, koju koristi koordinator tržišta. Funkciju G moguće je ostvariti na više načina, a najčešće se koristi s cijenama s dan-unaprijed tržišta. Također, moguće je tako dizajnirati tržište da je aukcija distribuirana. U distribuiranom tipu aukcije koordinator tržišta upravlja samo onim sudionicima koji su ostali, tj. nisu samostalno riješili vlastit problem razmjene energije i šalje samo nužne informacije koordinatorsu tržišta. Pri korištenju distribuirane metode se koriste se distribuirane metode za rješavanje jednadžbi (1) - (6), kao što je npr. ADMM (prema engl. *alternating direction method of multipliers*) [7].

3.3. Decentralizirano tržište

Decentralizirano tržište potpuna je suprotnost centraliziranom. U decentraliziranom tržištu nema koordinatora tržišta, već sudionici direktno među sobom dogovaraju transakcije pomoću bilateralnih ugovora. Za razliku od centraliziranog tržišta, privatnost i autonomija sudionika ne ovisi o veličini tržišta, ali teže je optimizirati tržište tako da je društvena korist maksimalna [16]. Decentralizirano tržište još se u literaturi naziva i potpuno P2P tržište. Postoji više varijanta izvođenja decentraliziranog tržišta. Na slici 3.3 prikazan je primjer jednog decentraliziranog tržišta.



Slika 3.3 Decentralizirano P2P tržište (Sousa, Soares, Pinson, Moret, Baroche, Sorin, 2019)

Jedna od struktura bazira se na multi-bilateralno ekonomsko dispečiranje (engl. *multi-bilateral economic dispatch*). P2P struktura uključuje razlikovanje proizvoda, gdje kupci postavljaju svoje preferencije pri kupnji električne energije, npr. kupnja lokalne zelene energije. Druga struktura bazira se na trgovanje energijom u stvarnom vremenu i unaprijed. U takvoj strukturi uključena je ravnoteža proizvodnje i potrošnje, te neizvjesnost tržišta.

Jednadžbama (7) - (11) predstavljeno je matematički jedan od primjera potpunog P2P tržišta.

$$\min_D \sum_{n \in \Omega} C_n \left(\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \right) \quad (7)$$

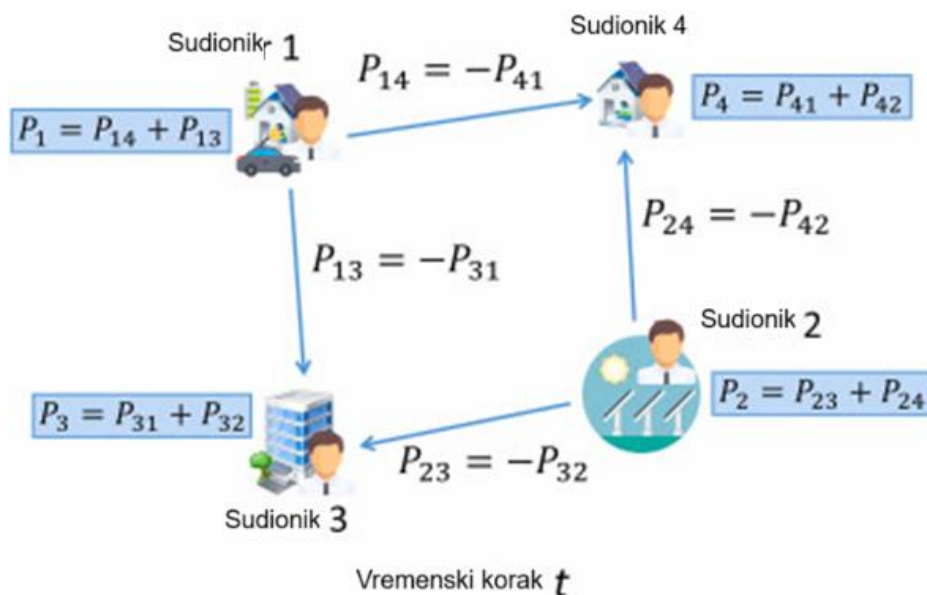
$$\underline{P}_n \leq \sum_{m \in \omega_n} P_{nm}, P_{nm} \leq \bar{P}_n, \forall n \in \Omega \quad (8)$$

$$P_{nm} + P_{mn} = 0, \forall (n, m) \in (\Omega, \omega_n) \quad (9)$$

$$P_{nm} \geq 0, \forall (n, m) \in (\Omega_p, \omega_n) \quad (10)$$

$$P_{nm} \leq 0, \forall (n, m) \in (\Omega_c, \omega_n) \quad (11)$$

Gdje je $D = (P_{nm} \in \mathbb{R})_{n \in \Omega, m \in \omega_n}$, a P_{nm} predstavlja dijeljenje energije između sudionika n i m . Pozitivna vrijednost P_{nm} označava proizvodnju/prodaju, a negativna vrijednost potrošnji/kupnji. Ω , Ω_p i Ω_c predstavljaju skupove sudionika, proizvođača i potrošača, te za njih vrijedi: $\Omega_p, \Omega_c \in \Omega$ i $\Omega_p \cap \Omega_c = \emptyset$. Na slici 3.4 prikazan je primjer decentraliziranog tržišta s jednadžbama koje ga opisuju. Prikazano tržište sastoji se od četiri sudionika. Sudionici 1 i 2 su proizvođači, a sudionici 3 i 4 potrošači. Generalizacija slučaja predstavljenom slikom omogućava da se svi sudionici gledaju kao prosumeri. Skup ω_n sadrži sve sudionike s kojima trguje sudionik n . Bilateralno trgovanje P_{nm} ima recipročne vrijednosti, što je vidljivo iz jednadžbe (9). Dualna varijabla λ_{nm} predstavlja cijenu svake transakcije. Moguće su različiti iznosi cijene za svaki pregovarački proces. Funkcija C_n predstavlja troškove proizvodnje, a najčešće se koristi kvadratna jednadžba za troškove proizvodnje/potrošnje, pri čemu su parametri a_n , b_n i c_n pozitivni. Funkcija cilja napisana je jednadžbom (7), a najčešće se rješava decentraliziranim ili distribuiranim optimizacijskim

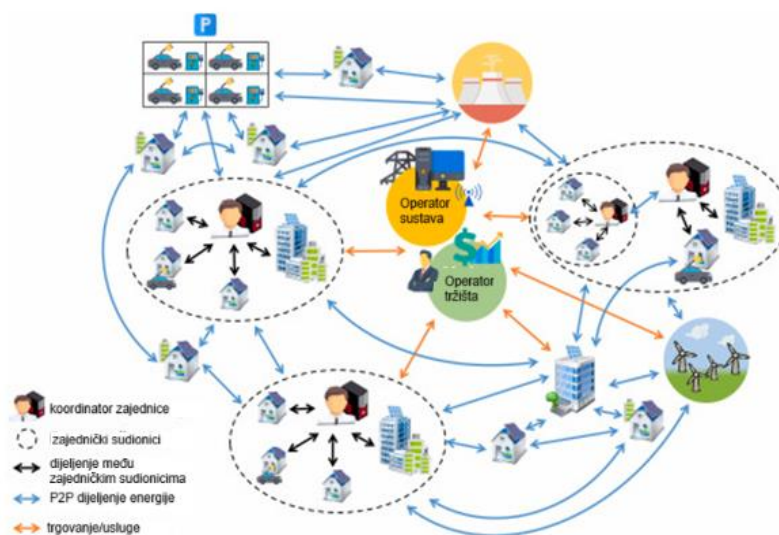


Slika 3.4 Primjer decentraliziranog P2P tržišta energijom
(Sousa, Soares, Pinson, Moret, Baroche, Sorin, 2019)

metodama poput Lagrangeove relaksacije, ADMM-om ili metodama na temelju inovacija i konsenzusa (prema engl. *consensus+innovation*). Pomoću ovih metoda moguće je definirati pojedinačne probleme svakog sudionika, uz osiguravanje njihove privatnosti. Svaki sudionik dijeli samo energiju i po kojoj je cijeni spreman na trgovanje, bez da otkriva osjetljive informacije [7].

3.4. Distribuirano tržište

Distribuirano tržište kompromis je centraliziranog i decentraliziranog P2P tržišta. U distribuiranom tržištu postoji koordinator tržišta, no on sakuplja manje informacija od sudionika i upravlja tržištem na neizravan način. Primjerice, umjesto izravnih kontrola koristi cjenovne signale. Distribuirano tržište temelji se na modelu teorije igara, točnije na modelu Stackelbergove igre, ili na ADMM-u [16]. Distribuirano tržište može biti projektirano na modelu „babuške“. U takvom distribuiranom modelu, koji se još naziva i hibridno P2P tržište, postoje više slojeva. Oni uključuju samostalne sudionike ili zajedničke sudionike (engl. *energy collective*) koji međusobno direktno dijele energiju. Primjer takvog prikazan je slikom 3.5.



Slika 3.5 Hibridno P2P tržište energijom (Sousa, Soares, Pinson, Moret, Baroche, Sorin, 2019)

Tržište sa slike 3.5 sastoji se od dvije razine, više i niže. Na višoj razini sudjeluju samostalni sudionici i zajednički sudionici, a oni trguju međusobno i s vanjskim tržištem. Na nižoj razini, zajednički sudionici trguju po principu centraliziranog P2P tržišta, i imaju koordinatora. Koordinator nadgledava trgovanjem između zajedničkih sudionika. Zajednički sudionici mogu biti grupe aktivnih kupaca koji djeluju zajednički. Na primjer, stambena zgrada može biti jedna energetska zajednica, koja je dalje član energetske zajednice kvarta u kojem se nalazi.¹

Ne postoji jednoznačno definiranje hibridnog i distribuiranog modela P2P tržišta energije. Tržište energije sa slike 5 moguće je definirati pomoću 2 razine. Najjednostavnija formulacija je dana jednadžbama (12) i (13). Uz (13) vrijede ograničenja za višu razinu, jednadžbe decentraliziranog tržišta (1) - (6), uz uvjet da je svaki n dio skupa Ω^u ($\forall n \in \Omega^u$). Uz (13) vrijede ograničenja za nižu razinu, jednadžbe centraliziranog tržišta (7) - (11), uz uvjet da je svaki n član skupa Ω^b ($\forall n \in \Omega^b$).

$$\min_D \sum_{n \in \Omega^u} C_n^u \left(\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \right) + \sum_{n \in \Omega^b} C_n^b(p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n) \quad (12)$$

$$\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} = q_{exp}^n - q_{imp}^n, \quad \forall (n, m) \in (\Omega_{co}, \omega_n) \quad (13)$$

Gdje je $D = (P_{nm} \in \mathbb{R}_{n \in \Omega^u}, p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n \in \mathbb{R}_{n \in \Omega^b})$. Ω^u i Ω^b su skupovi sudionika s više i niže razine, i vrijedi $\Omega^u \cap \Omega^b = \Omega$. U nižoj razini, svaki koordinator $n \in \Omega^b$ određuje unutarnje potrebe energije q_n , željenu energiju izvoza q_{exp}^n ili uvoza q_{imp}^n . Zatim, koristeći jednadžbe za decentralizirano tržište izračunati su optimalni tokovi snaga, tj. optimalna shema dijeljenja energije

¹ U Hrvatskoj je prema podacima HERA-e registrirana jedna energetska zajednica koja je ishodila dozvolu. Budući da su aktivnosti CEC i REC u Hrvatskoj zasada vrlo ograničeni, termini koji se koriste u ovom radu donekle odstupaju od definicija navedenih u hrvatskim propisima.

među sudionicima više razine, samostalni sudionici i koordinatori), $n \in \Omega^u$. Zbroj bilateralnih transakcija $\sum_{m \in \omega_n} P_{nm}$ jednak je razlici željene količine energije izvoza i uvoza, a vrijedi za svaki zajednički sudionik n .

Postoje i modeli hibridnog P2P tržišta s više razina. U slučaju dizajna s tri razine za distribucijsku mrežu. U najvišoj razini je podijeljena distribucijska mreže na ćelije koje međusobno trguju energijom. Srednja, druga, razina nalazi se sastoji od mikromreža unutar iste ćelije, koje međusobno trguju energijom. U najnižoj razini članovi mikromreže međusobno trguju energijom, po principu centraliziranog tržišta.

Još jedan od primjera hibridnog pristupa tržišta unutar iste distribucijske mreže koristi ograničenja mreže kao uvjet za P2P trgovanje energijom. U tom dizajnu lokalnog tržišta energije ukinut je mehanizam pregovaranja i cijena između mikromreža. U njemu se koristi pristup najbližnji optimalnom toku snaga izmjenične struje [7].

4. Matematički modeli za P2P trgovanje unutar energetske zajednice

Matematički modeli za P2P trgovanje mogu se kategorizirati prema pristupu procesu razmjene energije i pregovaranja. Pristupi u takvoj kategorizaciji su sljedeći: platforme, blockchain tehnologija, teorije igara, simulacije, optimizacije i algoritmi [7]. Upravljanje energetskim zajednicama može se još kategorizirati u dvije kategorije određivanja cijene: aukcijom i dinamički. Dinamičko određivanje cijene koristi se za modele s malim brojem članova, u zajednicama u kojima nije moguće ostvariti komplicirano tržište ponuda. Pretpostavka je da su i potrošači i prosumeri racionalni, i da će sudjelovanjem na tržištu maksimizirati svoju korist kao odgovor na dinamičke cijene. Dinamičko određivanje cijene bazira se metodama teorije igara, optimizacije i podržano učenje (engl. *reinforcement learning*) [19]. Dalje, te pristupe je moguće podijeliti na statičke i dinamičke ovisno o načinu raspodjela energije [13]. Statička raspodjela znači da se energije raspodjeljuje po unaprijed, fiksno definiranim omjerima [13]. Na primjer, u energetskoj zajednici sa 10 sudionika, to je raspodjela prema kojoj se u svakom vremenskom periodu svakom sudioniku dodjeljuje 10 % ukupne dostupne energije [20]. Kod dinamičke raspodjele, energija se raspodjeljuje ovisno o trenutnoj podjeli potrošnje/proizvodnje svakog člana. Oba pristupa imaju svoje prednosti. Statičku podjelu lakše je razumjeti, čime je i pristupačnija građanima, dok dinamička raspodjela omogućuje učinkovitiju podjelu energije [13]. U ovom radu modeli su podijeljeni na tržišne, teorije igara, simulacijske i optimizacijske. Kompliciraniji modeli, kao na primjer s dinamičkim određivanjem cijena, nisu objašnjeni u ovom radu jer trenutačno nisu održivi u hrvatskom kontekstu. Uopće osnivanje energetske zajednice značajno je ograničeno zakonodavnim okvirom, a kompliciraniji modeli, predstavljaju dodatni izazov, koji trenutno, u ovim uvjetima nije moguće provesti.

4.1. Tržišni modeli

Tržišni modeli primjenjivi za energetske zajednice usmjereni na praćenje dinamičkih cijena električne energije. U ovom radu objašnjeni su mehanizmi određivanja cijena P2P trgovine srednjom tržišnom stopom, dvostrukom dražbom i omjerom ponude i potražnje.

4.1.1. Srednja tržišna stopa

Srednja tržišna stopa (engl. *mid-market rate*) je metoda određivanja cijene koja se koristi za centralizirano tržište. Prostorno, koristi se na području energetske zajednice, a vremenski u razdoblju od dan-unaprijed tržišta do sat-unaprijed tržišta. Polazna pretpostavka metode srednje tržišne stope je da je veća kupovna cijena od prodajne cijene. Cijena energije koja se prodaje/kupuje P2P trgovanjem po kWh određuje se po jednadžbi (14):

$$p_{P2P} = \frac{p_{buy} + p_{sell}}{2} \quad (14)$$

gdje p_{P2P} predstavlja prodajnu/kupovnu energiju dijeljenom P2P putem po kWh, p_{buy} predstavlja kupovnu cijenu električne energije iz mreže po kWh i p_{sell} prodajnu cijenu električne energije iz mreže po kWh [16].

4.1.2. Dvostruka dražba

Dvostruka dražba (engl. *double auction* = DA) je metoda koja omogućuje istovremeno trgovanje energijom između više potrošača i prosumera u jedinstvenom vremenskom intervalu [21]. Između metode srednje tržišne stope, dvostruke dražbe i omjera ponuda i potražnje, dvostrukom dražbom postiže se najveći stupanj zadovoljstva korisnika. Metoda dvostruke dražbe više je u korist prosumera, nego potrošača. Glavni nedostatak metode je njena složenost, koja može dovesti do povećanja troškova i iskorištavanje sustava, ako bi sudionici stavljali zavaravajuće ponude ili ponude kojima si osiguravaju nezasluženu prednost.

Funkcija cilja dvostruke dražbe unutar energetske zajednice je maksimizacija ukupne koristi od tarife koju ODS naplaćuje potrošačima. Funkcija cilja dana je jednadžbom (15).

$$\max \sum_{c_i \in C} \sum_{t_i} (b_{c_i}(t_i) - p_{p_j}(t_i)) x_{c_i, p_j}(t_i) \quad (15)$$

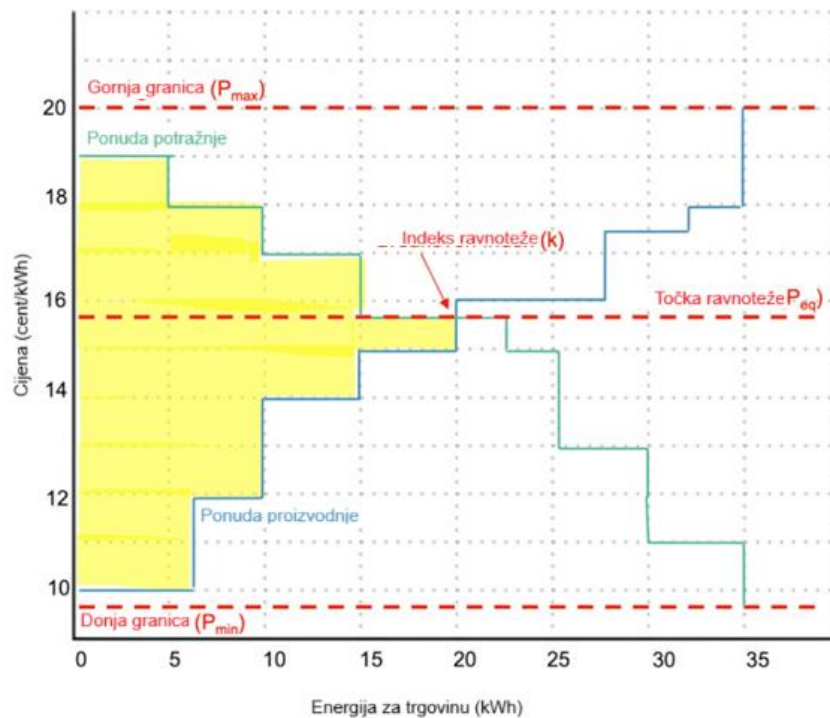
$C = c_1, c_2, \dots, c_n$ predstavlja skup svih potrošača u energetske zajednici. Svaki potrošač može se zapisati kao C_i , gdje i predstavlja indeks potrošača u rasponu od 1 do n , ukazujući da se energetska zajednica sastoji od n potrošača. $P = p_1, p_2, \dots, p_m$ predstavlja skup svih prosumera u energetske zajednici. Svaki prosumer može se zapisati kao P_j , gdje j predstavlja indeks prosumera u rasponu od 1 do m , ukazujući da se energetska zajednica sastoji od m prosumera. t_i predstavlja jedan specifičan diskretan vremenski period trgovanja, $D_{c_i}(t_i)$ predstavlja potrošnju potrošača c_i u trenutku t_i , $S_{p_j}(t_i)$ višak energije prosumera p_j u trenutku t_i i $b_{c_i}(t_i)$ cijenu koju nudi potrošač za kupnju viška energije prosumera u trenutku t_i . $x_{c_i, p_j}(t_i)$ je binarna varijabla odluke, koja pokazuje je li trgovanje energijom između potrošača c_i i prosumera p_j uspješno provedeno. Ako je njen iznos 1, onda je dijeljenje uspješno provedeno, a ako je 0 onda ukazuje na nepostizanje dijeljenja. U izrazu 14 sumirane su razlike između cijene ponude potrošača i cijene ponude prosumera u svakom vremenskom intervalu.

Osjetljivost razlike između kupovne i prodajne cijene ovisi o minimalnoj cijeni P_{min} i maksimalnoj cijeni P_{max} . Minimalna cijena je sigurnosna cijena, osigurava da cijena ne padne ispod nje i time postane nepovoljna za prosumere, tj. da smanjuje gubitke prosumerima, Maksimalna cijena osigurava da kupci ne plate previše i da ih se ne iskorištava zbog velike potražnje. Granice se određuju po minimalnoj *feed-in* tarifi koju ODS plaća neovisnim prosumerima i maksimalnom tarifom koju ODS naplaćuje potrošačima.

Ponude koje podnose prosumeri i potrošači, a i cijene trgovanja električnom energijom određene na aukciji moraju biti unutar granica P_{max} i P_{min} . Ako su cijene trgovanja van određenih granica, onda je potrošačima ili prosumerima isplativije trgovati s mrežom, a ne P2P principom dijeljenja energije.

Nakon što potrošači i proizvođači daju ponude, prirodnim poretkom i metodologijom indeksa rentabilnosti dobiva se ravnotežna cijena P_{Eq} . Na slici

4.1 vidljiv je poredak ponuda potrošača u silaznom redoslijedu na temelju cijene, a ponude prosumera uzlaznim redom. Sjecište nastalih krivulja dobivenih ponudom potrošača i prosumera je točka uravnoteženja ponude i potražnje, odnosno tržišna cijena.



Slika 4.1 Prikaz izračuna P_{Eq} i točke ravnotežne cijene mehanizmom dvostruke dražbe (Malik, Thankue, Bersling, 2023)

Točka ravnotežne cijene točka u kojoj je potražnja jednaka ponudi i određuje koliko je korisnika k odabrano za trgovanje. Ako više potrošača ili prosumera podnosi identične ponude, prednost imaju oni koji imaju više energije dostupnu za trgovinu. Određivanjem prioriteta osigurava se maksimizacija obujma trgovine, a tako i društveno blagostanje. Društveno blagostanje označeno je žutom bojom na slici 4.1.

Postoje više tipova modela dvostruke dražbe: kontinuirani, diskretni i centralizirani. Osim različitih vrsta modela, postoje i različiti tipovi dražbe, a oni su sljedeći: k-double, Vickrey-Clarke-Groves, McAfee i maksimalno podudaranje obujma [21].

4.1.3. Omjer ponude i potražnje

Kod modela omjera ponude i potražnje (SDR, prema engl. *supply and demand ratio*) koristite se tri bazne pretpostavke: interna cijena je unutar granica *feed-in tarife* i cijene električne energije, odnos cijene i SDR-a obrnuto je proporcionalan i ekonomska ravnoteža uvijek mora biti osigurana. U području dijeljenja energije, ponuda je količina energije koju proizvođači mogu ponuditi, a potražnja količina električne energije koju potrošači trebaju. Nema određenog voditelja u području dijeljenja energije, stoga se odnos ponude i potražnje temelji na internim cijenama. Ukupna prodajna snaga (TSP^h , engl. *total selling power*) i ukupna kupovna moć (TBP^h , engl. *total buying power*) prikazuju odnose ponude i potražnje, odnosno njihov omjer. Omjer ponude i potražnje računa se prema jednadžbi (16).

$$SDR^h = \frac{TSP^h}{TBP^h} \quad (16)$$

Gdje SDR^h predstavlja omjer ponude i potražnje u vremenskom periodu h , TSP^h ukupnu prodajnu snagu, a TBP^h ukupnu kupovnu moć. Budući da se ponuda i potražnja mijenjaju, SDR također mijenja svoju vrijednost. Opskrbljivač električnom energijom djeluje kao agent za sve prosumere. Opskrbljivač kupuje električnu energiju od prosumera i mreže po jediničnoj cijeni Pr_{buy} i λ^{buy} , a prodaje porosumerima i mreži po jediničnoj cijeni Pr_{sell} i λ^{sell} . Za određivanje internih cijena koristite se ranije navedene pretpostavke. Interna cijena prodaje u vremenskom periodu h određena je funkcijom (17).

$$Pr_{sell}^h = \begin{cases} \frac{\lambda^{sell} \cdot \lambda^{buy}}{(\lambda^{buy} - \lambda^{sell}) \cdot SDR^h + \lambda^{sell}}, & 0 \leq SDR^h \leq 1 \\ \lambda^{sell}, & SDR^h > 1 \end{cases} \quad (17)$$

Interna cijena kupnje u vremenskom periodu h određena je funkcijom (18).

$$Pr_{buy}^h = \begin{cases} Pr_{sell}^h \cdot SDR^h + \lambda^{buy}(1 - SDR^h), & 0 \leq SDR^h \leq 1 \\ \lambda^{sell}, & SDR^h > 1 \end{cases} \quad (18)$$

Kad vrijedi: $0 \leq SDR^h \leq 1$, onda je ukupna kupovna moć veća od ukupne prodajne snage, pa je dio energije kupljen iz mreže po cijeni λ^{buy} [22].

Kod SDR mehanizma više profitiraju potrošači, nego proizvođači električne energije [2].

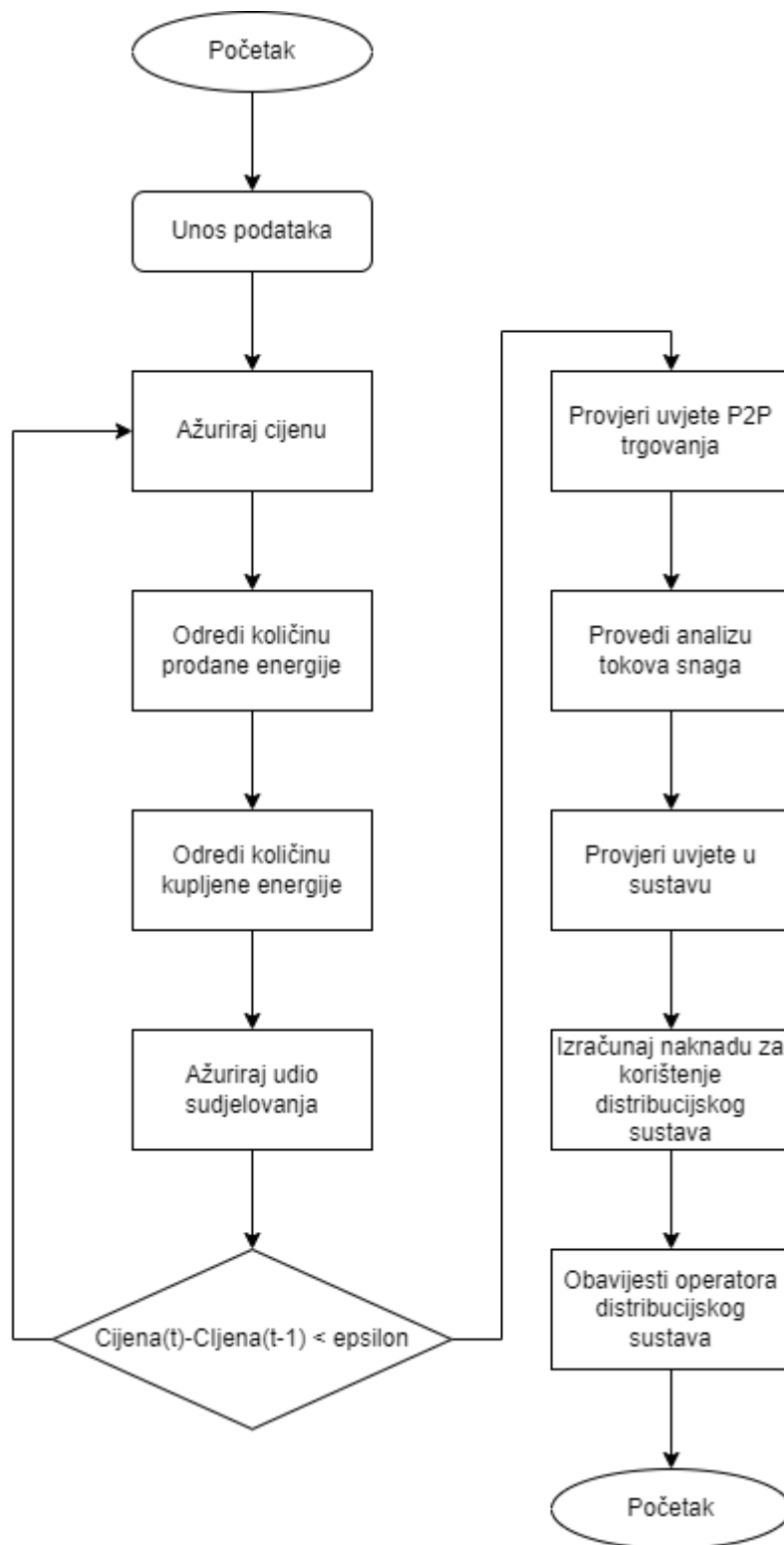
4.2. Teorija igara

Teorija igara koristi dinamički pristup raspodjele energije u stvarnom vremenu. Modeli na temelju teorije igara najčešće koriste Stackelbergovu igru kao bazu za postavljanje cijena [19]. Stackelbergova igra je strateška igra u ekonomiji, u kojoj su igrači podijeljeni na voditelja i pratioce. Voditelj ima pravo prvog poteza, a time veći profit, slijedno tome pratitelji imaju manju korist. Cilj je postignuti Nashovu točku ravnoteže, tj. situaciju da niti jednom sudioniku na tržištu nije bolje ako promjeni svoju aktivnost. Nashova ravnoteža je situacija u kojoj, s obzirom na radnje koje poduzimaju drugi igrači uključeni u natjecanje, nijednom igraču nije bolje ako promijeni svoju akciju [23]. Nashova točka može se izračunati primjenom odgovarajućih algoritama i funkcija [19].

Model se sastoji od četiri glavne komponente: prosumeri, potrošači, koordinator P2P tržišta i ODS. Svi sudionici na tržištu međusobno su povezani dvosmjernim energetske i komunikacijskim vezama. U modelu potrošači ne proizvode električnu energiju. Prosumeri imaju ili fotonaponske (PV, prema engl. *photovoltaic*) panele ili spremnik energije. Prosumeri su voditelji, a potrošači pratioci/sljedbenici u igri.

Sve informacije o dijeljenju energije potrebno je javiti ODS-u, kako bi bilo moguće planiranje proizvodnje. ODS je vlasnik infrastrukture distribucijske mreže. Operator distribucijske mreže osigurava jednakost ponude i potražnje, trgovanjem s vanjskom mrežom, uzimajući u obzir ponude prosumera. Na taj način, predlaganjem strategije trgovanjem energijom, koja potiče P2P dijeljenje, osigurava pouzdan i stabilan rad distribucijskog sustava.

Tokovi snaga podređeni su aukciji među prosumerima i potrošačima, ovisno o cijeni i količini energije koju prosumeri/potrošači prodaju/kupuju. Nakon pregovora o cijenama i količini energije na tržištu i određivanja tokova snaga, osigurava se stabilnost napona distribucijske mreže [19].



Slika 4.2 Dijagram toka algoritma za optimalno trgovanje u modelu teorije igara (Jin, IEEE, Choi, Won, IEEE, 2020)

Na slici 7 prikazan je dijagram toka određivanja optimalne strategije dražbe za sudionike na tržištu. Pretpostavlja se N prosumera i M potrošača u modelu. Strategija prosumera/prodavača je ažurirati prodajnu cijenu $\lambda_{j,t}$ po jednadžbi (19). Gdje je $\lambda_{j,t}$ tržišna cijena prosumera j u trenutku t , $\lambda_{up,t}$ uvozna cijena vanjske mreže u trenutku t , $\lambda_{low,t}$ cijena izvoza u vanjsku mrežu u trenutku t , γ parametar ažuriranja cijene, $P_{j,t}^{req}$ potrebna potražnja prosumera j u trenutku t i $P_{j,t}^{exc}$ višak proizvodnje prosumera j u trenutku t . Voditelj ažurira cijenu usporedbom dodijeljene potražnje i vlastitim viškom energije. Pretpostavka je da je cijena određena po principu slobodnog tržišta među prosumerima, drugim riječima zadovoljen je zakon ponude i potražnje.

$$\lambda_{j,t} = \frac{\lambda_{up,t} + \lambda_{low,t}}{2} + \gamma \cdot (P_{j,t}^{req} - P_{j,t}^{exc}) \quad (19)$$

Nakon određene cijene kao strategije, prosumer određuje optimalnu snagu P2P trgovine ($P_{j,t}^{P2P}, [kW]$), uzimajući u obzir vlastitu korist. Maksimiziranje koristi prosumeri ostvaruju uzimajući u obzir višak snage, potrošnju, potrebnu potražnju, cijenu električne energije iz mreže i cijenu P2P trgovanja. Optimalna snaga P2P trgovine određuje se funkcijom cilja (20), a količina energije dobivena je tako da se gleda vremenski okvir u trajanju od jednog sata.

$$\begin{aligned} \text{Max}\{R_{j,t}\} = & U_{j,t} + P_{j,t}^{P2P} \cdot \lambda_{j,t} - P_{j,t}^{grid,buy} \cdot \lambda_{up,t} \\ & + P_{j,t}^{grid,sell} \cdot \lambda_{low,t} \end{aligned} \quad (20)$$

Gdje je $R_{j,t}$ funkcija prihoda prosumera j u trenutku t , $U_{j,t}$ funkcija korisnosti prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{grid,buy}$ uvezna snaga iz vanjske mreže prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{grid,sell}$ izvozna snaga u vanjsku mrežu prosumera j u trenutku t . Ograničenja za određivanje prodajne količine potrošača zapisana su jednadžbama (21) - (38).

$$U_{j,t} = p_j \cdot \ln(P_{j,t}^{load}) \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 P_{j,t}^{gen} + P_{j,t}^{grid,buy} - P_{j,t}^{grid,sell} - P_{j,t}^{ch} + P_{j,t}^{dch} \\
 = P_{j,t}^{reg} + P_{j,t}^{load}
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$SOC_{j,t} = SOC_{j,t-1} + \frac{\eta_{cha} \cdot P_{j,t}^{cha} - \left(\frac{1}{\eta_{dch}}\right) \cdot P_{j,t}^{dch}}{E_{j,t}^{rate}} t^{step} \tag{23}$$

$$SOC_{j,T} = SOC_{j,0} \tag{24}$$

$$P_{j,t}^{cha} \cdot u_{j,t}^{cha} \leq P_j^{rate} \tag{25}$$

$$P_{j,t}^{dch} \cdot u_{j,t}^{dch} \leq P_j^{rate} \tag{26}$$

$$P_{j,t}^{grid,buy} \cdot u_{j,t}^{grid,buy} \leq P_{max}^{grid} \tag{27}$$

$$P_{j,t}^{grid,sell} \cdot u_{j,t}^{grid,sell} \leq P_{max}^{grid} \tag{28}$$

$$0 \leq P_{j,t}^{grid,buy} \leq P_{max}^{grid} \tag{29}$$

$$0 \leq P_{j,t}^{grid,sell} \leq P_{max}^{grid} \tag{30}$$

$$0 \leq P_{j,t}^{cha} \leq P_j^{rate} \tag{31}$$

$$0 \leq P_{j,t}^{dch} \leq P_j^{rate} \tag{32}$$

$$SOC_j^{min} \leq SOC_{j,t} \leq SOC_j^{max} \tag{33}$$

$$u_j^{cha} + u_j^{dch} \leq 1 \tag{34}$$

$$u_{j,t}^{grid,sell} + u_{j,t}^{grid,buy} \leq 1 \tag{35}$$

$$u_{j,t}^{cha} \in \{0,1\} \tag{36}$$

$$u_{j,t}^{dch} \in \{0,1\} \tag{37}$$

$$u_{j,t}^{grid,buy} \in \{0,1\} \tag{38}$$

Gdje $U_{j,t}$ označava iskoristivost ovisno o krivulji opterećenja određenog prosumera. Općenito, izražava se logaritamskom ili kvadratnom funkcijom. p_j je preferencijalni parametar koji pokazuje preferencije krivulje opterećenja prosumera j ovisno o jedinstvenim karakteristikama prosumera. Što je veći, to

pokazuje da prosumer ima visoku korisnost potrošnje energije. Jednadžbom (20) izražena je ukupna dobit prosumera. Jednadžbom su uzeti u obzir troškovi transakcije sa sustavom i P2P trgovanja. Dalje, $P_{j,t}^{load}$ parametar preferencije potrošnje prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{P2P}$ snaga P2P trgovine prosumera j u trenutku t u kW, $P_{j,t}^{grid,buy}$ snaga uvoza energije iz mreže prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{grid,sell}$ snaga izvoza u mrežu prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{gen}$ proizvodnja prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{cha}$ snaga punjenja spremnika energije prosumera j u trenutku t , $P_{j,t}^{dch}$ snaga pražnjenja spremnika energije prosumera j u trenutku t , $SOC_{j,t}$ stanje napunjenosti energetskog spremnika prosumera j u trenutku t , t^{step} vremenski korak, η_{dch} efikasnost pražnjenja energetskog spremnika, η_{cha} efikasnost punjenja energetskog spremnika, E_j^{rate} nazivni kapacitet energetskog spremnika prosumera j u kWh, $SOC_{j,T}$ krajnje stanje napunjenosti u postocima, $SOC_{j,0}$ početno stanje napunjenosti u postocima, SOC_j^{min} minimalno stanje napunjenosti prosumera j u postocima, SOC_j^{max} maksimalno stanje napunjenosti prosumera j u postocima. P_{max}^{grid} maksimalno ograničenje snage iz mreže, P_j^{rate} nazivna snaga energetskog spremnika prosumera j u kW, $u_{j,t}^{cha}$ varijabla stanja punjenja prosumera j u trenutku t , $u_{j,t}^{dch}$ varijabla stanja pražnjenja prosumera j u trenutku t i $u_{j,t}^{grid,sell}$ varijabla stanja kupnje prosumera j u trenutku t .

Potrošači, tj. kupci, su sljedbenicu, te ažuriraju svoju strategiju ovisno o snazi i cijeni koju predlažu prosumeri. Snage i cijene koju predlažu prosumeri su ulazne varijable algoritma za određivanje količine koju kupuju i koriste se za izračun optimalne količine potrebne električne energije iz vanjske mreže kako bi se ostvarila potreba kupca.

Cijena i snaga dijeljenja prosumera, utječe na količinu energije koju će potrošač kupiti na P2P tržištu. Previsoke cijene prosumera, gledajući samo svoj prihod, dovodi do smanjene spremnosti potrošača na P2P trgovanje, što dovodi do smanjenja dobiti prosumera. Nužno je da prosumer odabere

odgovarajuću strategiju, kao voditelj igre i s obzirom na reakciju potrošača, kako bi ostvario veći prihod.

U konačnici, prosumeri postavljaju svoju strategiju, ovisno o strategiji potrošača. U strategiji potrošača, omjer sudjelovanja potrošača ($\alpha_{j,t}$) ažurira se prema jednadžbi (39).

$$\alpha_{j,t} = \alpha_{j,t-1} + \sigma_1 \cdot P_{j,t}^{sell} \quad (39)$$

Gdje je $\alpha_{j,t}$ omjer sudjelovanja potrošača j u trenutku t , a σ_1 parametar ažuriranja sudjelovanja. Omjer sudjelovanja potrošača utječe na količinu potražnje dodijeljene prosumeru. Odluka prosumera utječe na strategiju potrošača.

Proces prilagodbe cijena i snaga ponavlja se do konvergencije cijene. Analiza toka snaga izvodi se nakon konvergencije cijene, snagom P2P trgovanja. Naknada za korištenje distribucijske mreže određuje se ovisno o utjecaju trgovine na mrežu [19].

4.3. Model simulacije cijena i tokova snaga unutar EZ

Model simulacije koristi statički pristup raspodjele energije. Simulaciju algoritma podijele energije moguće je podijeliti na dva koraka. U prvom koraku sudionici najprije izravno koriste vlastitu proizvodnju za podmirenje vlastitog opterećenja. U drugom koraku višak proizvodnje statički se distribuira između svih sudionika unutar EZ, kako bi se pokrili dijelovi njihovih opterećenja.

Prvi korak: podmirenje vlastitog opterećenja

Postoje dva slučaja na kojem se može bazirati dio simulacije povezan s podmirenjem vlastitog opterećenja:

1. Proizvodnja sudionika jednaka je ili veća od vlastitog opterećenja
2. Proizvodnja sudionika manja je od vlastitog opterećenja.

Za oba slučaja definirani su: preostalo opterećenje ($load_{t,p}^{P_{rest}}$), višak proizvodnje ($gen_{t,p}^{P_{surplus}}$), pokriveno opterećenje ($load_{t,p}^{P_{covered}}$) i iskorištena

proizvodnja ($gen_{t,p}^{P_{used}}$) za svakog sudionika. $gen_{t,p}^P$ predstavlja ukupnu proizvodnju svakog sudionika, a $load_{t,p}^P$ ukupno opterećenja svakog sudionika. Za prvi slučaj vrijede jednačbe (40) - (43):

$$load_{t,p}^{P_{rest}} = 0 \quad (40)$$

$$gen_{t,p}^{P_{surplus}} = gen_{t,p}^P - load_{t,p}^P \quad (41)$$

$$load_{t,p}^{P_{covered}} = load_{t,p}^P \quad (42)$$

$$gen_{t,p}^{P_{used}} = load_{t,p}^P \quad (43)$$

Za drugi slučaj vrijede jednačbe (44) - (47):

$$load_{t,p}^{P_{rest}} = load_{t,p}^P - gen_{t,p}^P \quad (44)$$

$$gen_{t,p}^{P_{surplus}} = 0 \quad (45)$$

$$load_{t,p}^{P_{covered}} = gen_{t,p}^P \quad (46)$$

$$gen_{t,p}^{P_{used}} = gen_{t,p}^P \quad (47)$$

Drugi korak: distribucija viška energije

Nakon podmirenja vlastitog opterećenja, višak proizvodnje i preostalo opterećenje sudionika s vlastitom proizvodnjom, a i sudionika bez vlastite proizvodnje koriste se u daljnji izračun unutar EZ. U ovom modelu, koristi se statički pristup raspodjele energije, tako da se za svaki vremenski period količina električne energije koju svaki sudionik može primiti određuje dijeljenjem ukupne količine raspoložive energije proizvodnje ($gen_t^{EC_{total}}$) s ukupnim brojem sudionika P . Energija koju može primiti pojedini sudionik (gen_t^{stat}) određena je jednačbom (48).

$$gen_t^{stat} = gen_t^{EC_{total}} / P \quad (48)$$

Zatim je statička raspodjela izvedena ovisno o kojem slučaju je riječ sukladno postupku u prvom koraku.

Za prvi slučaj, kada je energija koju može primiti pojedini sudionik veća ili jednaka od opterećenja pojedinog sudionika unutar EZ ($load_{t,p}^{EC}$), vrijede jednačbe (49) - (52):

$$load_{t,p}^{rest} = 0 \quad (49)$$

$$gen_{t,p}^{EC_{surplus}} = gen_t^{stat} - load_{t,p}^{EC} \quad (50)$$

$$load_{t,p}^{EC_{covered}} = load_{t,p}^{EC} \quad (51)$$

$$gen_{t,p}^{EC_{used}} = load_{t,p}^{EC} \quad (52)$$

Za drugi slučaj, kada je energija koju može primiti pojedini sudionik manja od opterećenja pojedinog sudionika unutar EZ, vrijede jednačbe (53) - (56):

$$load_{t,p}^{rest} = load_{t,p}^{EC} - gen_t^{stat} \quad (53)$$

$$gen_{t,p}^{EC_{surplus}} = 0 \quad (54)$$

$$load_{t,p}^{EC_{covered}} = gen_t^{stat} \quad (55)$$

$$gen_{t,p}^{EC_{used}} = gen_t^{stat} \quad (56)$$

Dodatni korak: preraspodjela energije

Korištenjem jednačbi (49) - (52) dolazi se do međurezultata koji nije potpuno točan. Svakom sudioniku dodijeljen je jednak dio proizvedene energije u svakom vremenskom periodu. Takva raspodjela prihvatljiva je za ravnomjernu raspodjelu, ali dovodi do vrijednosti $gen_{t,p}^{EC_{used}}$ i $gen_{t,p}^{EC_{surplus}}$ koje su neupotrebljive za daljnje izračune. Matrice $gen_{t,p}^{EC_{used}}$ i $gen_{t,p}^{EC_{surplus}}$ sadrže vrijednosti u stupcima sudionika bez i s vlastitom proizvodnjom. Vrijednosti u stupcima sudionika s vlastitom proizvodnjom mogu biti netočne jer nije utvrđeno ima li sudionik odgovarajuću količinu proizvodnje dostupnu za distribuciju. Do netočnosti dolazi budući da je količina energije koja se dijeli

izračunata dijeljenjem s brojem sudionika bez provjere koliko je energije pojedini sudionik stavio na raspolaganje za distribuciju.

Provjera raspoložive energije moguća je korištenjem ukupne korištene energije proizvedenom unutar EZ u određenom vremenskom periodu ($gen_t^{EC_{usedTotal}}$) i dijeljenjem s brojem sudionika koji sadrže proizvodnju (P_{gen}). Dobivena je sljedeća jednačba (57):

$$gen_{t,p}^{EC_{actuallyUsed}} = gen_t^{EC_{usedTotal}} / P_{gen} \quad (57)$$

Korištenjem jednačbe (57) svaki sudionik s proizvodnjom osigurao bi jednaku količinu proizvodnje za korištenje unutar EZ u određenom vremenskom periodu. Također je potrebno provjeriti nudi li sudionik s proizvodnjom tu količinu električne energije EZ-i na raspolaganje. Provjera se provodi jednačbom (58):

$$diff_{t,p}^{genECUsed} = gen_{t,p}^{EC} - gen_{t,p}^{EC_{actuallyUsed}} \quad (58)$$

Gdje $gen_{t,p}^{EC}$ predstavlja izvorno dostupnu količinu proizvodnje unutar EZ, $gen_{t,p}^{EC_{actuallyUsed}}$ pretpostavljenu stvarno iskorištenu količinu, a $diff_{t,p}^{genECUsed}$ razlika teoretski dostupne proizvodnje EZ-e i stvarno korištene količine. Kad je vrijednost $diff_{t,p}^{genECUsed}$ negativna, korisnik p je na raspolaganje stavio manje električne energije, nego što je bilo prvobitno pretpostavljeno. Ako je jedan barem jedna od vrijednosti $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice negativan u bilo određenom vremenskom periodu t , onda su za taj vremenski period t zbrojene sve negativne vrijednosti iz $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice dobivajući $gen_t^{usedNegValues}$. Istovremeno određuje se broj pozitivnih vrijednosti $no_t^{posValues}$, koji pokazuje količinu sudionika, koji još uvijek imaju energiju dostupnu za korištenje u EZ. Također, potrebno je zbroj negativnih vrijednosti $diff_{t,p}^{genECUsed}$ pretjerano dodijeljenih sudionicima koji nemaju odgovarajuću količinu energije na raspolaganju preraspodijelit na sudionike koji još uvijek imaju dostupnu proizvodnju. Preraspodjela se odvija prema jednačbi (59):

$$\begin{aligned}
 gen_t^{ECUsedFurtherDistr} \\
 = gen_t^{usedNegValues} \cdot (-1)/no_t^{posValues}
 \end{aligned} \tag{59}$$

Gdje je $gen_t^{ECUsedFurtherDistr}$ količina energije proizvodnje koju je potrebno dalje preraspodijeliti među sudionicima koji još uvijek imaju dostupnu proizvodnju, a $gen_t^{usedNegValues}$ sve negativne vrijednosti unutar $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice, pokazujući da je određenim sudionicima dodijeljeno više električne energije nego što im je na raspolaganju. Daljnja preraspodjela odvija se prema jednadžbi (60), ako je vrijednost $diff_{t,p}^{genECUsed}$ veća od nule.

$$\begin{aligned}
 gen_{t,p}^{EActuallyUsed} \\
 = gen_{t,p}^{EActuallyUsed} \\
 + gen_t^{ECUsedFurtherDistr}
 \end{aligned} \tag{60}$$

Izvorno negativne vrijednosti iz $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice potrebno je ispraviti na nulu, budući da su količine energije preraspoređene. Ispravljanje vrijednosti $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice izvodi se korištenjem jednadžbe (61) uz uvjet da je vrijednost $diff_{t,p}^{genECUsed}$ manja od nule.

$$gen_{t,p}^{EActuallyUsed} = gen_{t,p}^{EActuallyUsed} + diff_{t,p}^{genECUsed} \tag{61}$$

Nakon izračuna pomoću jednadžbe (61) potrebno je ponoviti izračune navedene jednadžbama (58) – (61) sve dok postoji barem jedna vrijednost u $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrici koja je i dalje negativna. Drugim riječima, postupak se ponavlja dok sve vrijednosti $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice nisu veće ili jednake nuli.

Kad su sve vrijednosti $diff_{t,p}^{genECUsed}$ -matrice veće ili jednake nuli utvrđuje se stvarna količina proizvodnje koja je korištena $gen_{t,p}^{EActuallyUsed}$ kao ispravljeni oblik početno određene količine korištene proizvodnje $gen_{t,p}^{ECUsed}$ određenim jednadžbama (49) - (56).

Krajnje moguće je izračunati višak proizvodnje jednadžbom (62) [13].

$$gen_{t,p}^{ECSurplusActually} = gen_{t,p}^{EC} - gen_{t,p}^{ECActuallyUsed} \quad (62)$$

4.4. Linearna optimizacija

U modelu energetske zajednice svaki prosumer ima svoju PV proizvodnju i bateriju. Članovi energetske zajednice imaju dvije mogućnosti u svakom intervalu trgovanja (npr. u svakom satu): trgovati energijom s mrežom ili trgovati energijom s članom energetske zajednice. Linearnom optimizacijom određuje se za svaki vremenski interval na koji način prosumeri trguju energijom.

Funkcija cilja je maksimizacija društvenog blagostanja članova energetske zajednice, a ostvaruje se minimizacijom njihovih troškova energije. Funkcija cilja dana je formulom (63).

$$\begin{aligned} & \text{minimize: } obf \\ & = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} (\pi_{t,i}^{buy Grid} \times P_{t,i}^{buy Grid}) \times \frac{1}{\Delta t} \\ & - \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} (\pi_{t,i}^{sell Grid} \times P_{t,i}^{sell Grid}) \times \frac{1}{\Delta t} \end{aligned} \quad (63)$$

Gdje t predstavlja period, a i predstavlja prosumera. Nt je ukupan broj perioda, Ni ukupan broj prosumera. $\pi_{t,i}^{buy Grid}$ predstavlja kupovnu cijenu energije iz mreže (*time-of-use* tarifa), $P_{t,i}^{buy Grid}$ predstavlja količinu električne energije kupljene iz mreže, $\pi_{t,i}^{sell Grid}$ prodajnu cijenu električne energije mreži (*feed-in* tarifa) i $P_{t,i}^{sell Grid}$ količinu energije prodanu mreži. Član Δt prilagođava tarifne cijene optimizacijskom vremenskom intervalu (npr. period od 15 min). Jednadžbom (64) predstavlja jednadžbu ravnoteže za svaki prosumer.

$$\begin{aligned}
 P_{t,i}^{gen} + P_{t,i}^{buy\ Grid} + P_{t,i}^{dch} + \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} P_{t,i,j}^{buy\ p2p} \\
 = P_{t,i}^{load} + P_{t,i}^{sell\ Grid} + P_{t,i}^{ch} + \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} P_{t,i,j}^{sell\ p2p}
 \end{aligned} \quad (64)$$

$$\forall i \in Ni, \forall j \in Nj, \forall t \in Nt$$

Gdje $P_{t,i}^{gen}$ predstavlja proizvedenu energiju, $P_{t,i}^{dch}$ energiju pražnjenja baterije, $P_{t,i,i}^{buy\ p2p}$ kupljenu energiju na P2P tržištu, $P_{t,i}^{load}$ je opterećenje, $P_{t,i}^{ch}$ energija punjenja baterije, $P_{t,i,j}^{sell\ p2p}$ energija prodana na P2P tržištu, j prosumer, a Nj ukupan broj prosumera. Suma varijable $P_{t,i,j}^{p2p}$ po indeksu j daje ukupnu vrijednost svakog i kupnje za P2P transakcije za svaki period t , dok suma po indeksu i daje ukupnu vrijednost svakog j prodaje za P2P transakcije za svaki period t .

Jednadžbama (65) i (66) postavljene su gornje granice varijabli $P_{t,i}^{buy\ Grid}$ i $P_{t,i}^{sell\ Grid}$.

$$\begin{aligned}
 P_{t,i}^{buy\ Grid} \leq P_{t,i}^{max\ buy\ Grid} \times Bin_{t,i}^{buy\ Grid} \\
 \forall i \in Ni, \forall t \in Nt
 \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned}
 P_{t,i}^{sell\ Grid} \leq P_{t,i}^{max\ sell\ Grid} \times Bin_{t,i}^{sell\ Grid} \\
 \forall i \in Ni, \forall t \in Nt
 \end{aligned} \quad (66)$$

Gdje $P_{t,i}^{max\ buy\ Grid}$ predstavlja maksimalnu količinu energije koju je moguće kupiti iz mreže, $Bin_{t,i}^{buy\ Grid}$ binarnu varijablu, čija je vrijednost 1, ako omogućuje kupnju energije iz mreže, a 0 ako ne omogućuje kupovinu energije iz mreže. $P_{t,i}^{max\ sell\ Grid}$ je maksimalna količina energije koju je moguće prodati mreži, $Bin_{t,i}^{sell\ Grid}$ binarnu varijablu, čija je vrijednost 1, ako omogućuje prodaju električne energije mreži (0 ako ne prodaje).

Jednadžba (67) je jednadžba ograničenja za binarne varijable $Bin_{t,i}^{buy Grid}$ i $Bin_{t,i}^{sell Grid}$. U jednom periodu prosumer i može ili kupovati električnu energiju iz mreže ili prodavati električnu energiju mreži, ali ne i oboje istovremeno.

$$Bin_{t,i}^{buy Grid} + Bin_{t,i}^{sell Grid} \leq 1 \quad (67)$$

$$\forall i \in Ni, \forall t \in Nt$$

Jednadžbama (68) i (69) određene su gornje granice varijabli $P_{t,i,j}^{max buy p2p}$ i $P_{t,i,j}^{max sell p2p}$.

$$P_{t,i,j}^{buy p2p} \leq P_{t,i,j}^{max buy p2p} \times Bin_{t,i,j}^{buy p2p} \quad (68)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

$$P_{t,i,j}^{sell p2p} \leq P_{t,i,j}^{max sell p2p} \times Bin_{t,i,j}^{sell p2p} \quad (69)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

Gdje $P_{t,i,j}^{max buy p2p}$ predstavlja gornju granicu za kupnju P2P transakcijama, $Bin_{t,i,j}^{buy p2p}$ binarnu varijablu koja omogućuje kupnju električne energije prosumera i od prosumera j P2P pristupom, $P_{t,i,j}^{max sell p2p}$ gornju granicu za prodaju P2P transakcijama, $Bin_{t,i,j}^{sell p2p}$ binarnu varijablu koja omogućuje prodaju električne energije prosumera j od prosumera i P2P pristupom. Oba indeksa se moraju razlikovati ($i \neq j, j \neq i$) jer kad bi vrijedilo $i = j$ ili $j = i$, to bi predstavljalo da prosume pregovara sam sa sobom.

Jednadžbe (70) i (71) ograničavaju akcije povezane s transakcijama s mrežom i s P2P tržištem.

$$Bin_{t,i}^{buy Grid} + \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} Bin_{t,i,j}^{sell p2p} \leq 1 \quad (70)$$

$$\forall i \in Ni, \forall t \in Nt$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} Bin_{t,i,j}^{buy p2p} + Bin_{t,i}^{sell Grid} \leq 1 \quad (71)$$

$$\forall i \in Ni, \forall t \in Nt$$

Jednadžbom (70) zabranjeno je kupovati električnu energiju iz mreže i prodavati je na P2P tržištu, a jednadžbom (71) onemogućeno je kupovina P2P energije i daljnje njena prodaja mreži. Ova ograničenja postavljena su s pretpostavkom da je isplativije kupovati energiju na P2P tržištu, nego iz mreže.

Jednadžba (72) je jednadžba ravnoteže P2P tržišta. Njome je određeno da je sva električna energija kupljena na P2P tržištu i prodana na P2P tržištu.

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} \sum_{i=1, i \neq j}^{Ni} P_{t,i,j}^{buy p2p} = \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} \sum_{i=1, i \neq j}^{Ni} P_{t,i,j}^{sell p2p} \quad (72)$$

$$\forall t \in Nt$$

Jednadžbe (73) i (74) koriste se za modeliranje P2P tržišnih transakcija. Osiguravaju da svaki prosumer trguje s različitim prosumerom u svakom periodu. Model ne dopušta da jedan prosumer vrši transakcije električne energije s dva ili više prosumera.

$$\sum_{i=1, i \neq j}^{Ni} Bin_{t,i,j}^{buy p2p} + \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} Bin_{t,i,j}^{sell p2p} \leq 2 \quad (73)$$

$$\forall t \in Nt$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} Bin_{t,i,j}^{buy p2p} + \sum_{i=1, i \neq j}^{Ni} Bin_{t,i,j}^{sell p2p} \leq 2 \quad (74)$$

$$\forall t \in Nt$$

Jednadžbama (75) i (76) ograničavaju razine punjenja i pražnjenja baterije.

$$P_{t,i}^{ch} \leq P_{t,i}^{max ch} \times Bin_{t,i}^{ch}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (75)$$

$$P_{t,i}^{dch} \leq P_{t,i}^{max dch} \times Bin_{t,i}^{dch}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (76)$$

Gdje $P_{t,i}^{max\ ch}$ predstavlja maksimalnu snagu punjenja baterije, $Bin_{t,i}^{ch}$ binarnu varijablu povezanom sa stanjem punjenja, $P_{t,i}^{max\ dch}$ maksimalnu snagu pražnjenja baterije i $Bin_{t,i}^{dch}$ binarnu varijablu povezanom sa stanjem punjenja.

Baterija se ne može istovremeno i puniti i prazniti, to ograničenje zapisano je jednadžbom (77).

$$Bin_{t,i}^{ch} + Bin_{t,i}^{dch} \leq 1, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (77)$$

Jednadžba (78) prikazuje stanje napunjenosti u svakom periodu.

$$E_{t,i}^{Bat} = E_{t-1,i}^{Bat} + P_{t,i}^{ch} \times \eta_i^{ch} - P_{t,i}^{dch} \times \frac{1}{\eta_i^{dch}}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (78)$$

Gdje $E_{t,i}^{Bat}$ predstavlja stanje baterije prosumera i u periodu t , $E_{t-1,i}^{Bat}$ stanje baterije u periodu $t-1$, η_i^{ch} učinkovitost punjenja baterije, a η_i^{dch} učinkovitost pražnjenja baterije.

Jednadžbama (79) – (91) postavljenje su gornje i donje granice za varijable problema.

$$0 \leq P_{t,i}^{buy\ Grid} \leq P_{t,i}^{max\ buy\ Grid}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (79)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{sell\ Grid} \leq P_{t,i}^{max\ sell\ Grid}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (80)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{dch} \leq P_{t,i}^{max\ dch}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (81)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{ch} \leq P_{t,i}^{max\ ch}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (82)$$

$$0 \leq P_{t,i,j}^{buy\ p2p} \leq P_{t,i,j}^{max\ buy\ p2p} \quad (83)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

$$0 \leq P_{t,i,j}^{sell\ p2p} \leq P_{t,i,j}^{sell\ buy\ p2p} \quad (84)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

$$0 \leq E_{t,i}^{Bat} \leq E_{t,i}^{max\ Bat}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (85)$$

$$Bin_{t,i}^{buy\ Grid} \in \{0,1\}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (86)$$

$$Bin_{t,i}^{sell\ Grid} \in \{0,1\}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (87)$$

$$Bin_{t,i,j}^{buy\ p2p} \in \{0,1\} \quad (88)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

$$Bin_{t,i,j}^{sell\ p2p} \in \{0,1\} \quad (89)$$

$$\forall i \neq j \in Ni, \forall j \neq i \in Nj, \forall t \in Nt$$

$$Bin_{t,i}^{dch} \in \{0,1\}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (90)$$

$$Bin_{t,i}^{bch} \in \{0,1\}, \forall i \in Ni, \forall t \in Nt \quad (91)$$

Gdje $E_{t,i}^{max\ Bat}$ predstavlja maksimalno stanje napunjenosti baterije.

Ukupan račun za energiju (EB, prema engl. *energy bill*) pojedinog prosumera i na P2P tržištu izračunava se po jednadžbi (92).

$$\begin{aligned} EB_i = & \sum_{t=1}^{Nt} (\pi_{t,i}^{buy\ Grid} \times P_{t,i}^{buy\ Grid}) \times \frac{1}{\Delta t} \\ & - \sum_{t=1}^{Nt} (\pi_{t,i}^{sell\ Grid} \times P_{t,i}^{sell\ Grid}) \times \frac{1}{\Delta t} \\ & + \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} (\pi_{t,i,j}^{p2p} \times P_{t,i,j}^{buy\ p2p}) \times \frac{1}{\Delta t} \\ & - \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{j=1, j \neq i}^{Nj} (\pi_{t,i,j}^{p2p} \times P_{t,i,j}^{sell\ p2p}) \times \frac{1}{\Delta t} \\ & + FixCost_i \\ & \forall i \in Ni \end{aligned} \quad (92)$$

Gdje je $\pi_{t,i,j}^{p2p}$ predstavlja cijenu na P2P tržištu za transakciju između prosumera i i prosumera j , a $FixCost_i$ predstavlja fiksni trošak koji snosi svaki korisnik elektroenergetske mreže. EB se sastoji od pet dijelova:

1. predstavlja trošak kupovine električne energije iz mreže,
2. predstavlja prihode prodaje električne energije mreži,

3. predstavlja troškove kupovanja električne energije na P2P tržištu,
4. predstavlja prihode prodaje električne energije na P2P tržištu i
5. je dio računa koji se odnosi na fiksne troškove koje plaća svaki prosumer

Fiksni troškovi plaćaju se izravno opskrbljivaču, a njihov iznos je definiran u ugovoru o opskrbi energijom koji sklapaju prosumer i opskrbljivač. Zbroj EB svakog prosumera, kada se izbace fiksni troškovi, odgovara funkciji cilja, danog jednadžbom (63). Prihodi i rashodi P2P tržišta nisu implementirani u funkciju cilja, budući da je njihov zbroj jednak nula.

P2P cijena električne energije određena je prema srednjoj tržišnoj stopi (koja je opisana u poglavlju 4.1.1. Središnja tržišna stopa). Odnosno, cijena P2P trgovanja jednaka je aritmetičkoj sredini prodajne i kupovne cijene mreži/od mreže [24].

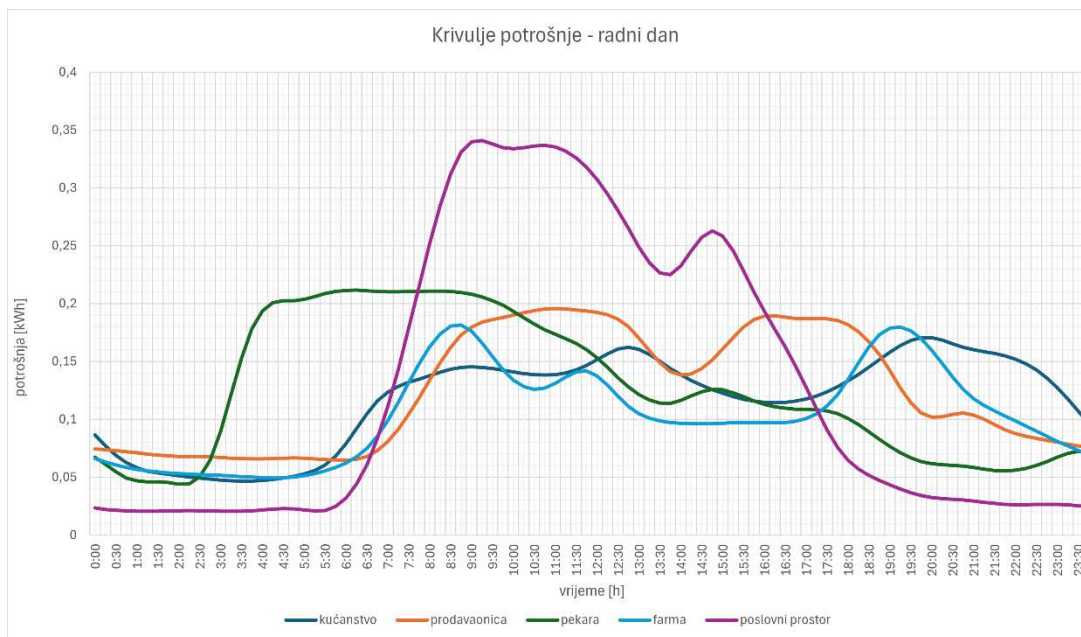
5. Model upravljanja energetsom zajednicom

Napravljen je model energetske zajednice linearnom optimizacijom, a cijena P2P trgovanja određena prema srednjoj tržišnoj stopi. Energetska zajednica sastoji se od pet sudionika.

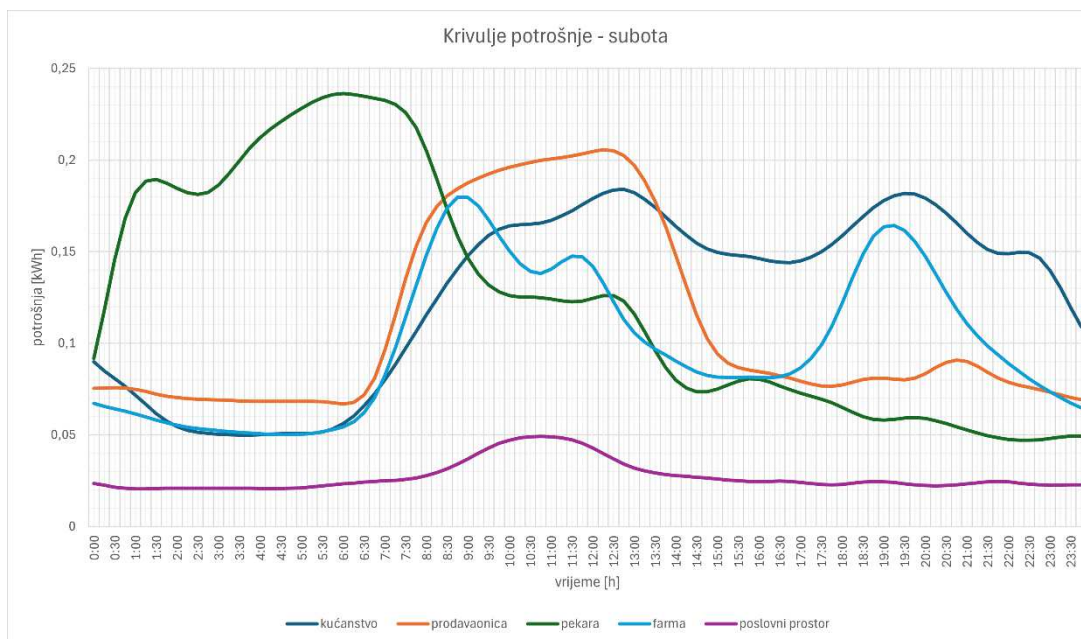
Članovi energetske zajednice su sljedeći:

- kućanstvo: potrošač s električnim vozilom (EV), ($i = 1$);
- trgovina: potrošač, ($i = 2$);
- pekara: potrošač, ($i = 3$);
- farma: prosumer – PV paneli, ($i = 4$);
- poslovni prostor: prosumer – PV paneli i spremnik energije, ($i = 5$).

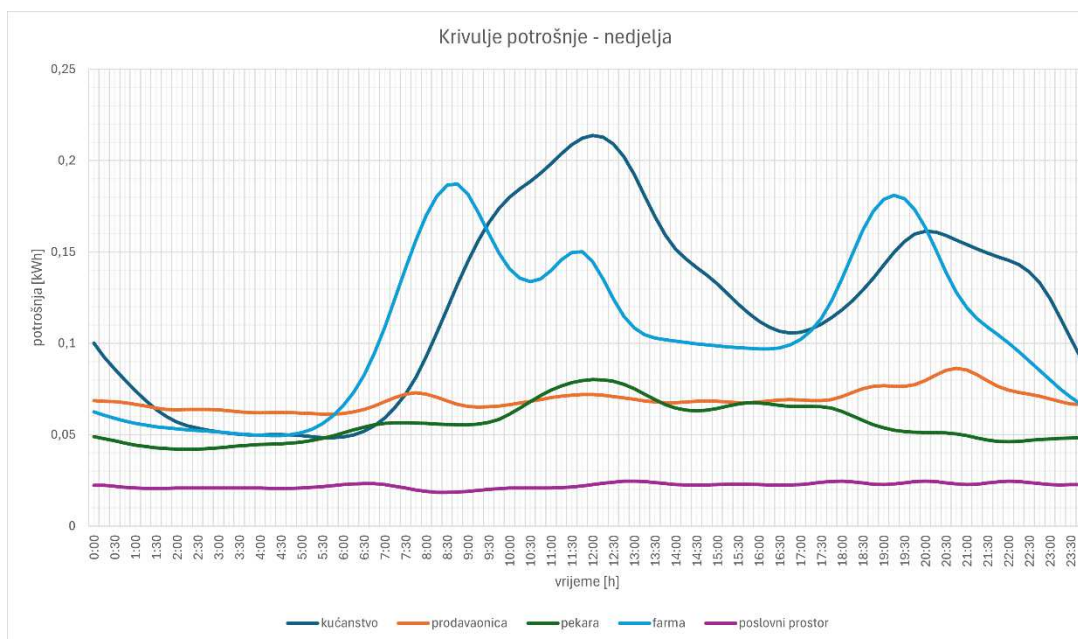
Krivulje potrošnje članova energetske zajednice prikazane su na slici 5.1 za radni dan, slici 5.2 za subotu i slici 5.3 za nedjelju. Podatci o krivuljama potrošnje su prikupljeni s internetske stranice Općinske komunalne službe Unna u Njemačkoj. Navedene krivulje potrošnje se koriste kao relevantne u općini od 1.1.2002. Korišteni su podatci za ljetni period, koji je na stranici definiran od 15. svibnja do 14. rujna u godini [25]. U krivuljama potrošnje nije uključeno električno vozilo kućanstva, niti punjenje baterije poslovnog prostora.



Slika 5.1 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za radni dan



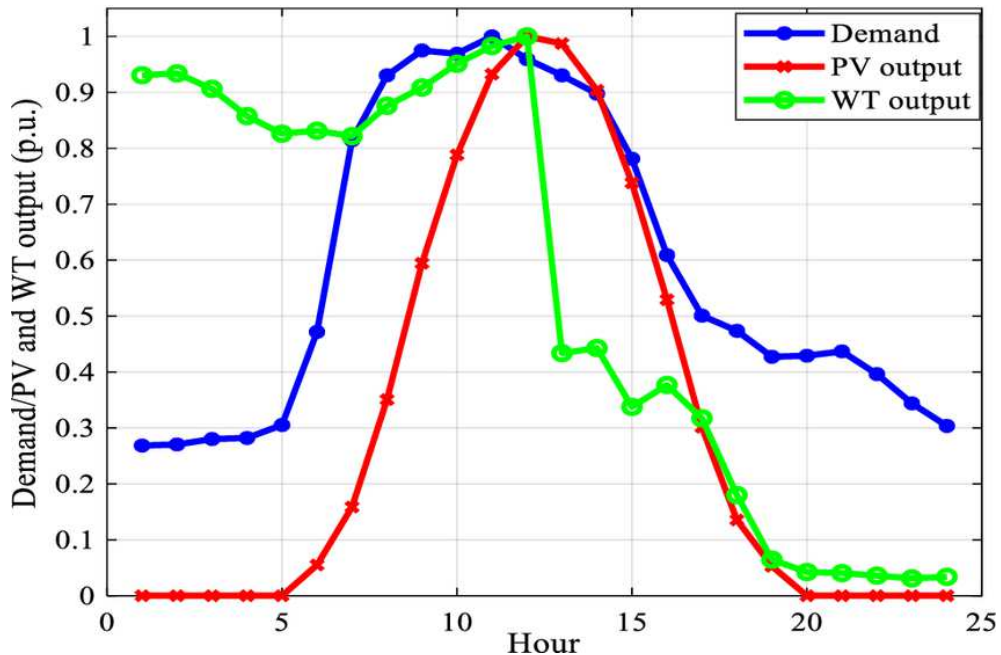
Slika 5.2 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za subotu



Slika 5.3 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za nedjelju

Električno vozilo koje koristi kućanstvo je Škoda Enyaq iV, tehničkih specifikacija 60. Bruto kapacitet baterije iznosi 62 kWh, a neto 58 kWh. Puni se snagom od 11 kW [26], a učinkovitost punjenja dobivena je omjerom neto i bruto kapaciteta baterije. Stanje napunjenosti EV na početku dana je 30 kWh, a do kraja dana se mora napuniti do kraja, dakle do 63 kWh. Vršna snaga PV panela iznosi 7 kW, a poslovnog prostora 3 kW. Za poslovni prostor dizajnirana je veličine solarnih panela uz pretpostavku da je godišnja potrošnja u višoj tarifi 2200 kWh, a u nižoj 700 kWh. Solarni paneli poslovnog prostora projektirani su uz pomoć solarnog kalkulatora. Lokacija solarnog panela je Zagreb, zapadno orijentirano, pod nagibom od 35°. Solarni kalkulator za te podatke preporuča PV panel s vršnom snagom od 3 kW, i ne preporuča solarne panele veće snage [27]. Proizvodnja PV panela dana je u jediničnom sustavu na slici 5.4. Kako bi se dobio iznos proizvodnje PV panela u kW, korištena je jednadžba (93). Gdje je $P_{t,i}^{gen}$ proizvodnja člana i energetske zajednice u vremenskom intervalu t u kW., $P_{t,i}^{PV,p.u.}$ proizvodnja člana i energetske zajednice u vremenskom intervalu t u p.u., i $P_{max,i}^{PV}$ vršna snaga PV panela i .

$$P_{t,i}^{gen} = P_{t,i}^{PV,p.u.} \cdot P_{max,i}^{PV} \quad (93)$$



Slika 5.4 Krivulja proizvodnje PV panela (Khasanov, Kamel, Houssein, Hashim, 2023)

Baterija poslovnog prostora sastoji se od četiri manje LiFePO₄ baterije svaka kapaciteta 1280 Wh. Efikasnost punjenja baterije iznosi 90 %, a pražnjenja 95 %. Maksimalna snaga punjenja iznosi 9 kW, a maksimalna snaga pražnjenja 10 kW [28]. Početna napunjenost baterije je 0 kWh, a na kraju dana mora biti u potpunosti puna. Maksimalna snaga kupnje i prodaje električne energije s mrežom, a i među članovima postavljena 22 kW, budući da se prema Pravilniku o općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom kupcima s priključnom snagom do uključivo 22 kW postavljaju brojila s funkcijom ograničenja [29]. Budući da je je maksimalna vršna snaga potrošnje nešto manja od 0,35 kW kod svih potrošača, nije potrebno da je moguće trgovati većom snagom nego 22 kW. Cijena električne energije preuzete su s dan-unaprijed tržišta električne energije, s webstranice Hrvatske burze električne energije (CROPEX) za datume 1.6.2024., 2.6.2024. i 3.6.2024. Iznos cijena zapisan je u tablici 2.

Tablica 2 Cijena električne energije na dan unaprijed tržištu električne energije za datume 1.6-3.6.2024. (CROPEX, 2024)

Vrijeme	1.6.2024.	2.6.2024.	3.6.2024
00:00 - 1:00	83,26 €/MWh	51,25 €/MWh	90,32 €/MWh
1:00 - 2:00	79,79 €/MWh	46,59 €/MWh	92,45 €/MWh
2:00 - 3:00	70,71 €/MWh	37,24 €/MWh	91,89 €/MWh
3:00 - 4:00	77,42 €/MWh	31,99 €/MWh	89,9 €/MWh
4:00 - 5:00	63,42 €/MWh €/MWh	10,8 €/MWh	87,53 €/MWh
5:00 - 6:00	63,78 €/MWh	9,35 €/MWh	103,35 €/MWh
6:00 - 7:00	68,2 €/MWh	4,96 €/MWh	128,53 €/MWh
7:00 - 8:00	66,1 €/MWh	4,11 €/MWh	193,06 €/MWh
8:00 - 9:00	77,69 €/MWh	0,97 €/MWh	162,96 €/MWh
9:00 - 10:00	65,69 €/MWh	0 €/MWh	127,57 €/MWh
10:00 - 11:00	51,04 €/MWh	1,03 €/MWh	107,63 €/MWh
11:00 - 12:00	44,89 €/MWh	-0,23 €/MWh	100,24 €/MWh
12:00 - 13:00	22,93 €/MWh	-5,05 €/MWh	86,57 €/MWh
13:00 - 14:00	8,07 €/MWh	-13,42 €/MWh	87,47 €/MWh
14:00 - 15:00	2,63 €/MWh	-13,45 €/MWh	88,68 €/MWh
15:00 - 16:00	5,16 €/MWh	-6,89 €/MWh	97,53 €/MWh
16:00 - 17:00	14,11 €/MWh	4,12 €/MWh	107,96 €/MWh
17:00 - 18:00	58,74 €/MWh	49,8 €/MWh	134,43 €/MWh
18:00 - 19:00	84,71 €/MWh	92,42 €/MWh	170,42 €/MWh
19:00 - 20:00	112,74 €/MWh	128,49 €/MWh	194,18 €/MWh
20:00 - 21:00	126,39 €/MWh	110,04 €/MWh	212,03 €/MWh
21:00 - 22:00	116,22 €/MWh	99,72 €/MWh	192,96 €/MWh
22:00 - 23:00	86,59 €/MWh	88,92 €/MWh	147,43 €/MWh
23:00 - 24:00	81,69 €/MWh	51,25 €/MWh	120,56 €/MWh

Prodajna cijena električne energije mreži iznosi 90 % kupovne cijene električne energije u tom satu. Ta cijena određena je na temelju Zakona o izmjenama i dopunama Zakona o obnovljivim izvorima energije i

visokoučinkovitoj kogeneraciji. U članku 5, stavku 5 piše: „Za preuzetu električnu energiju od strane opskrbljivača električne energije iz stavka 1. ovoga članka utvrđuje se vrijednost električne energije preuzete od krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom C_i u obračunskom razdoblju na sljedeći način:

1. $C_i = 0,9 * PKC_i$, ako za obračunsko razdoblje i vrijedi: $E_{pi} \geq E_{ii}$
2. $C_i = 0,9 * PKC_i * E_{pi} / E_{ii}$, ako za obračunsko razdoblje i vrijedi $E_{pi} < E_{ii}$

gdje je:

– E_{pi} = ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja, izražena u kW

– E_{ii} = ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja, izražena u kWh

– PKC_i = prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, isključujući dio cijene koji se regulira za potrebe prijenosa i distribucije električne energije te sve naknade i davanja propisana posebnim propisima, unutar obračunskog razdoblja, izražena u eur/kWh [30]“. Zbog jednostavnosti, korišteno je da je ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja veća ili jednaka ukupnoj električnoj energiji isporučenoj u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja. Cijena P2P dijeljenja izračunata je metodom srednje tržišne stope, po jednadžbi (14) iz poglavlja 4.1.1. Srednja tržišna stopa ovog rada.

Modelu energetske zajednice ostvaren je korištenjem linearne optimizacije. U modelu se koriste jednadžbe (64) – (90) iz poglavlja 4.4 Linearna optimizacija ovog rada. Funkcija cilja zapisana je jednadžbom (94).

minimize: *obj*

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} (vat \cdot (\pi_{t,i}^{buy\ Grid} + \pi^{trans} + \pi^{dist} \\
 &+ \pi^{supply} + \pi^{meas} + \pi^{renew}) \times P_{t,i}^{buy\ Grid}) \\
 &\times \frac{1}{\Delta t} - \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} (\pi_{t,i}^{sell\ Grid} \times P_{t,i}^{sell\ Grid}) \times \frac{1}{\Delta t} \\
 &+ \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nj} (vat \\
 &\cdot (\pi_{t,i,j}^{buy\ P2P} + \pi^{trans} + \pi^{dist} + \pi^{meas}) \\
 &\times P_{t,i,j}^{buy\ P2P}) \times \frac{1}{\Delta t} \\
 &- \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nj} (\pi_{t,i,j}^{sell\ P2P} \times P_{t,i,j}^{buy\ P2P}) \times \frac{1}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{94}$$

Gdje t predstavlja period, a i predstavlja prosumera. Nt je ukupan broj perioda, Ni ukupan broj prosumera, Nj ukupan broj prosumera koji prodaju eklektičnu energiju P2P trgovanjem. $\pi_{t,i}^{buy\ Grid}$ predstavlja kupovnu cijenu energije iz mreže (*time-of-use* tarifa), π^{trans} cijenu korištenja prijenosne mreže, π^{dist} cijenu korištenja distribucijske mreže, π^{renew} naknadu za OIE, π^{meas} naknadu za korištenje brojila, π^{supply} naknadu opskrbljivaču, vat povećanje cijene zbog poreza na električnu energiju, $\pi_{t,i,j}^{buy\ P2P}$ cijenu električne energije kupljene na P2P tržištu, $P_{t,i,j}^{buy\ P2P}$ predstavlja količinu energije kupljene na P2P tržištu, $P_{t,i}^{buy\ Grid}$ predstavlja količinu električne energije kupljene iz mreže, $\pi_{t,i}^{sell\ Grid}$ prodajnu cijenu električne energije mreži (*feed-in* tarifa), $\pi_{t,i,j}^{sell\ P2P}$ cijenu električne energije prodane na P2P tržištu, $P_{t,i,j}^{sell\ P2P}$ predstavlja količinu energije prodane na P2P tržištu i $P_{t,i}^{sell\ Grid}$ količinu energije prodanu mreži. Član Δt prilagođava tarifne cijene optimizacijskom vremenskom intervalu (period od 15 min). Podatci o fiksnim iznosima cijena po kWh zapisani

su u tablici 3. Iznos cijena preuzet je s kalkulatora računa električne energije [31].

Tablica 3 Iznos cijena korištenja mreže i opskrbljivača (HEP – Elektra, 2024)

π^{trans}	0,011945 €/kWh
π^{dist}	0,029199 €/kWh
π^{supply}	0,982 €/kWh
π^{meas}	1,54 €/kWh
π^{renew}	0,013239 €/kWh
vat	1,13

Model je napisan programskim jezikom Python, a optimizacija riješena uz pomoć solvera Gurobi Optimizer.

Osnovni slučaj koristi cijenu električne energije datuma 1.6.2024. i krivulje opterećenja za radni dan. Zatim je promatrano za različite cijene električne energije:

- krivulje potrošnje za radni dan, cijene električne energije za 2.6.2024.
- krivulje potrošnje za radni dan, cijene električne energije za 3.6.2024.

Proračun je također napravljen za različite krivulje potrošnje:

- subotnje krivulje potrošnje, cijene električne energije za 1.6.2024.
- nedjeljne krivulje potrošnje, cijene električne energije za 1.6.2024.

Kako bi se moglo utvrditi isplativost P2P trgovanja energije, proračun je proveden za slučaj kad nema P2P trgovanja.

Promatrani su ukupni troškovi električne energije, ii međusobno trgovanje među članovima energetske zajednice.

6. Opis rezultata

Za svaki od slučajeva promatran je ukupan trošak energije energetske zajednice. Za osnovni slučaj prikazano je međusobno P2P2 trgovanje električne energije:

- kupnja električne energije kućanstva,
- kupnja električne energije trgovine,
- kupnja električne energije pekare,
- kupnja električne energije farme,
- kupnja električne energije poslovnog prostora,
- prodaja električne energije farme,
- prodaja električne energije poslovnog prostora.

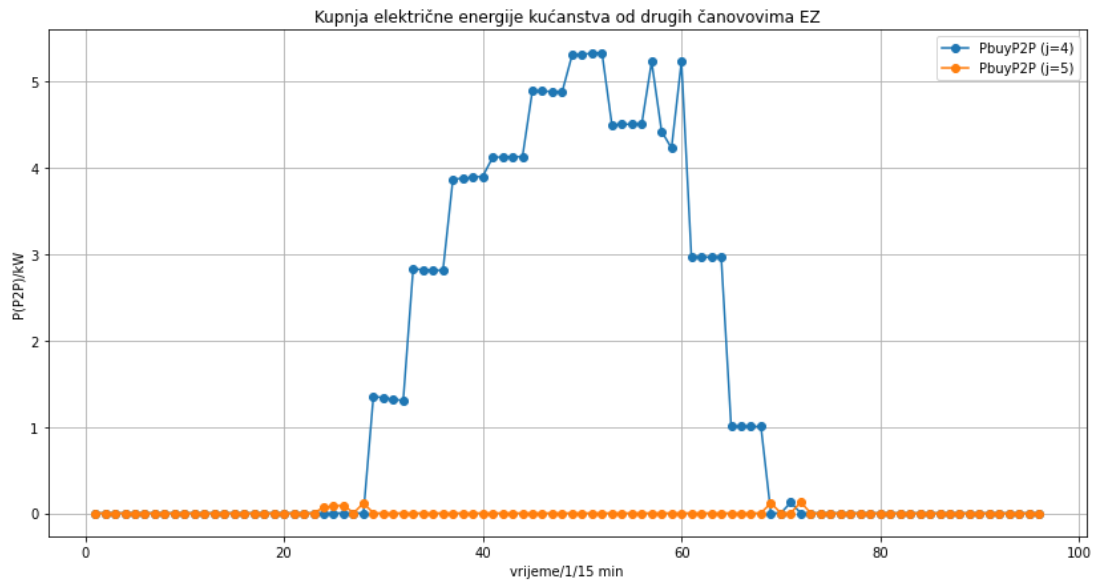
Za osnovni slučaj prikazani su profili punjenja EV i baterijskog spremnika, pražnjenja baterijskog spremnika i profil stanja napunjenosti EV-a i baterijskog spremnika. Za ostale slučajeve promatrana je prodaja električne energije P2P trgovanja. Kod modela bez P2P trgovanja promatran je samo ukupni trošak.

6.1. Osnovni slučaj

Osnovni slučaj koristi cijenu električne energije datuma 1.6.2024. i krivulje opterećenja za radni dan. Ukupan trošak energije energetske zajednice u osnovnom slučaju iznosi: 84,58978 €.

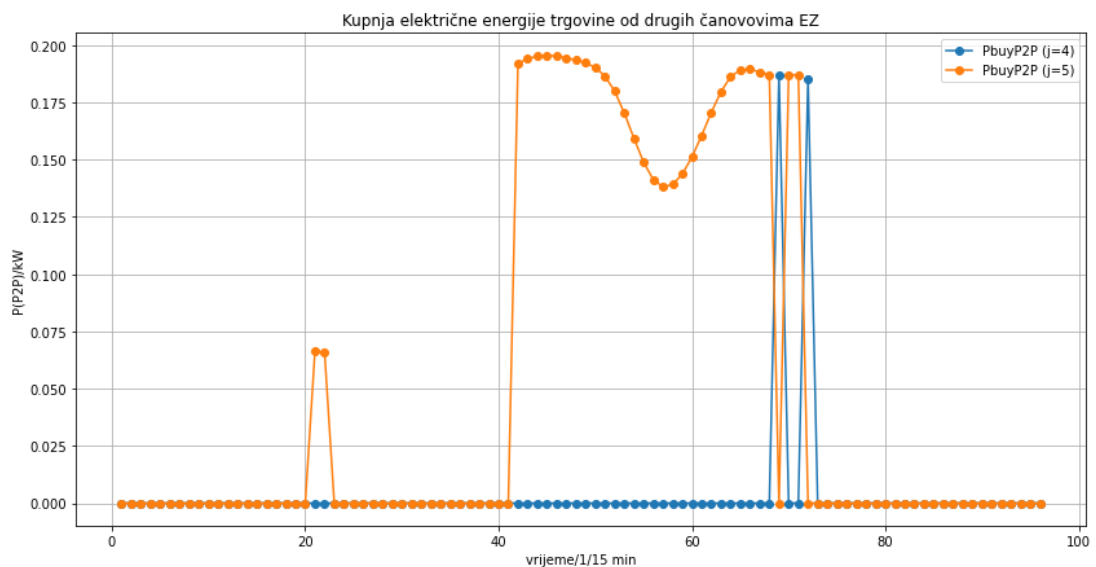
6.1.1. Kupovina P2P energije

Na slikama 6.1 – 6.5 prikazana je energija kupljena P2P trgovanjem za svakog člana energetske zajednice.



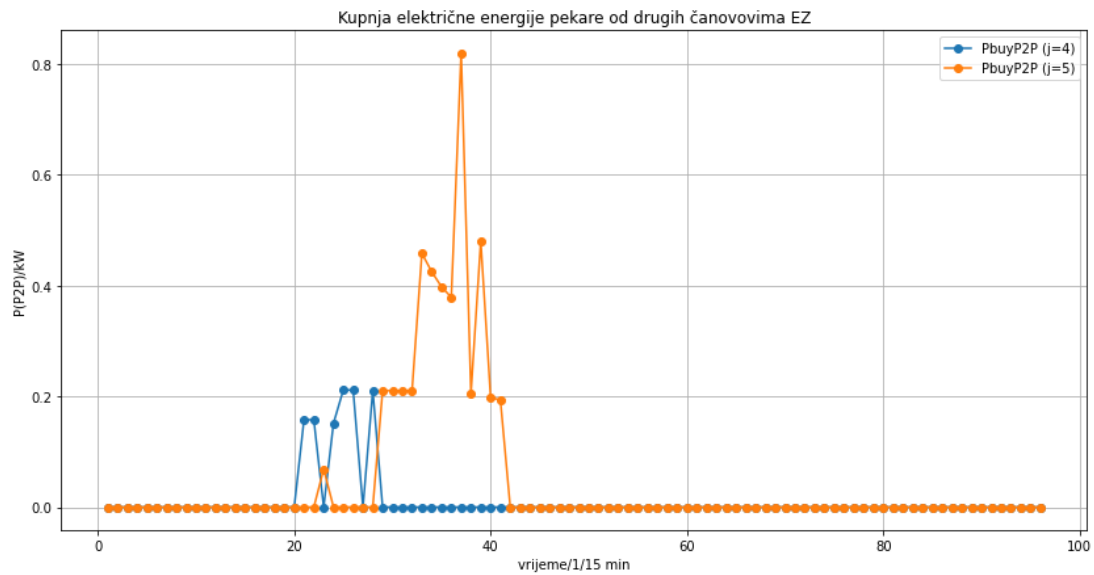
Slika 6.1 Kupovina električne energije $i = 1$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.1 vidljivo je da je kupovina P2P energije kućanstva prati krivulju proizvodnje PV panela farme. U trenucima veće snage proizvodnje PV panela, kućanstvo kupuje više električne energije. Kućanstvo najviše električne energije kupuje od farme.



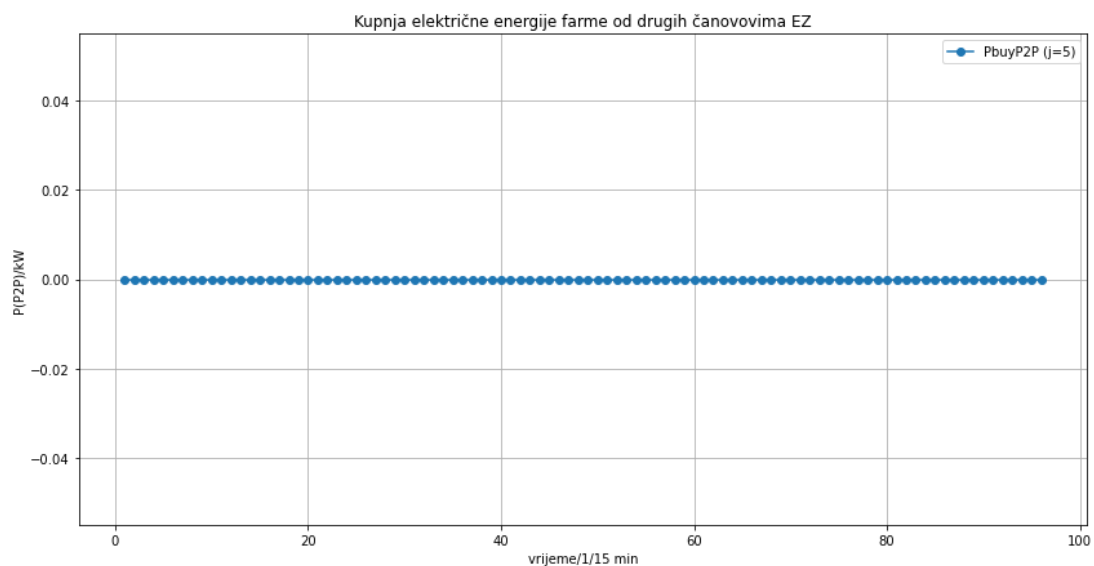
Slika 6.2 Kupovina električne energije $i = 2$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.2 vidljivo je da trgovina kupuje električnu energiju od farme i od poslovnog prostora.



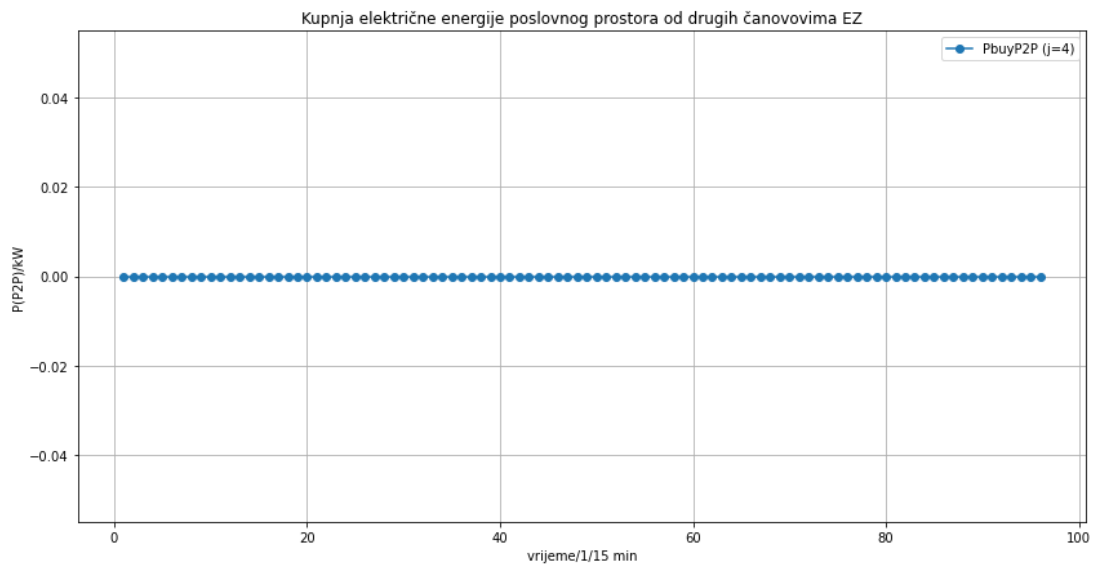
Slika 6.3 Kupovina električne energije $i = 3$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.3 vidljivo je da pekara kupuje električnu energiju i od farme i od poslovnog prostora.



Slika 6.4 Kupovina električne energije $i = 4$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.4 vidljivo je da farma ne kupuje električnu energiju od drugih članova energetske zajednice.

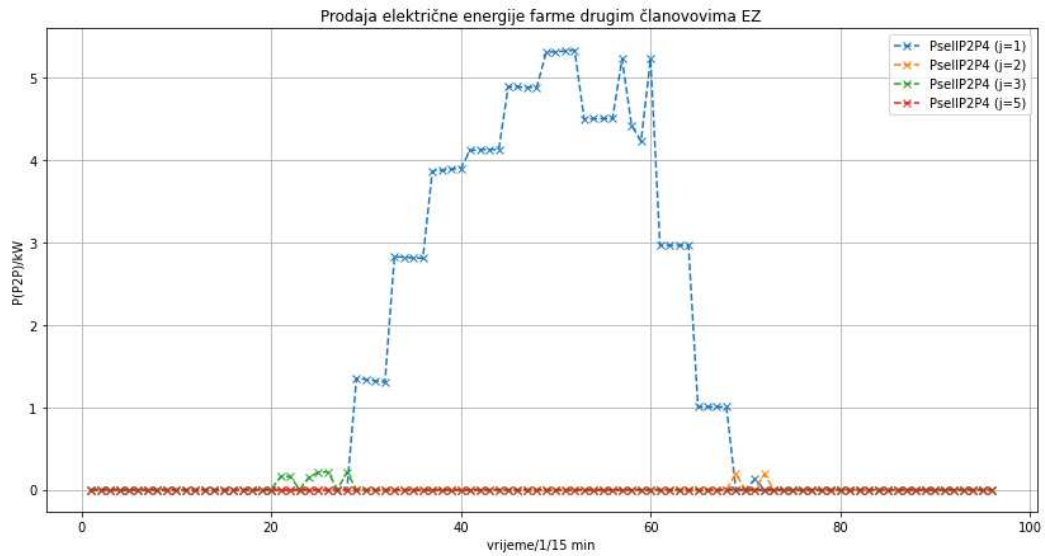


Slika 6.5 Kupovina električne energije i = 5 P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Sa slike 6.5 vidljivo je da poslovni prostor ne kupuje električnu energiju od drugih članova energetske zajednice.

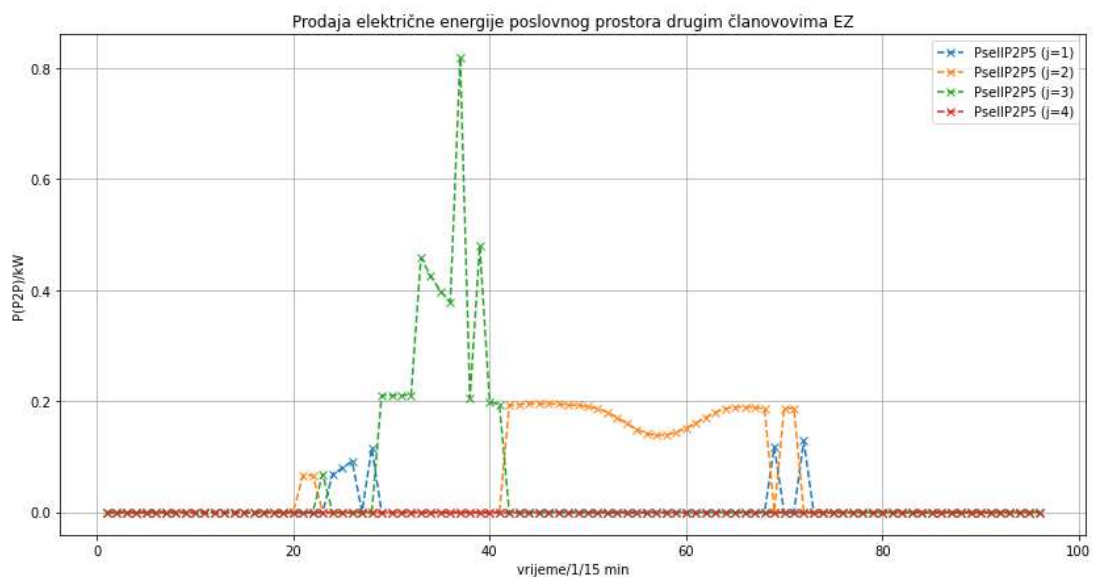
6.1.2. Prodaja energije P2P trgovanjem

Na slikama 6.6 i 6.7 prikazana je energija prodana P2P trgovanjem za farmu i poslovni prostor, budući da su je jedino njima prodavati električnu energiju P2P putem.



Slika 6.6 Prodaja električne energije $i = 4$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.6 vidljivo je da farma prodaje električnu energiju svim članovima EZ bez vlastite proizvodnje (ne prodaje električnu energiju poslovnom prostoru). Najviše električne energije prodaje kućanstvu. Krivulja prodaje električne energije farme prati krivulju proizvodnje PV panela.

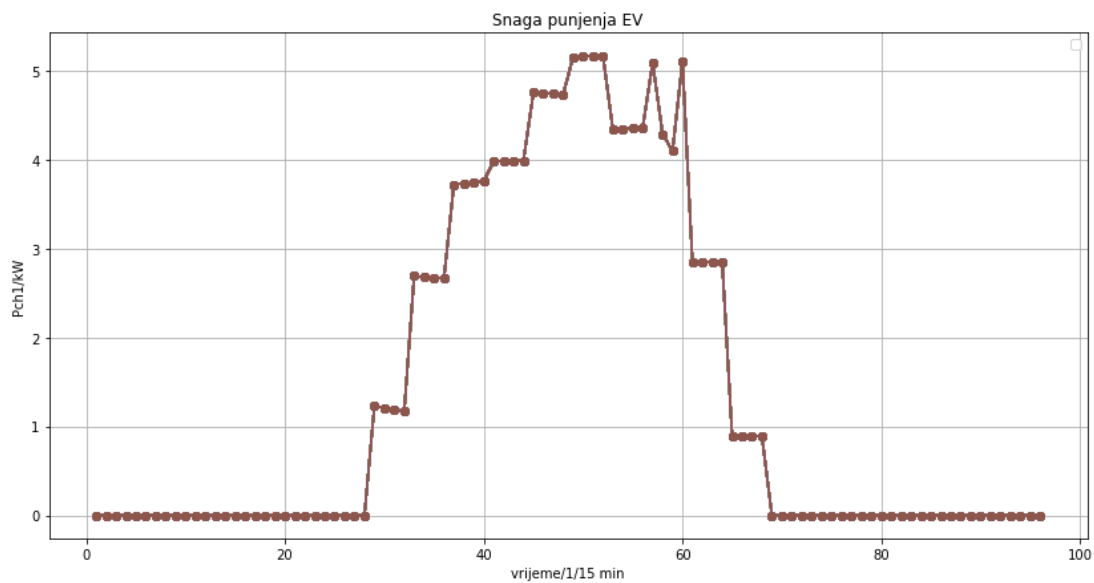


Slika 6.7 Prodaja električne energije $i = 5$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju

Na slici 6.7 vidljivo je da poslovni prostor prodaje električnu energiju svim članovima EZ bez vlastite proizvodnje (ne prodaje farmi). Prodaja električne energije ne prati krivulju proizvodnje PV panela jer poslovni prostor osim PV panela ima i vlastitu bateriju, koju puni panelima.

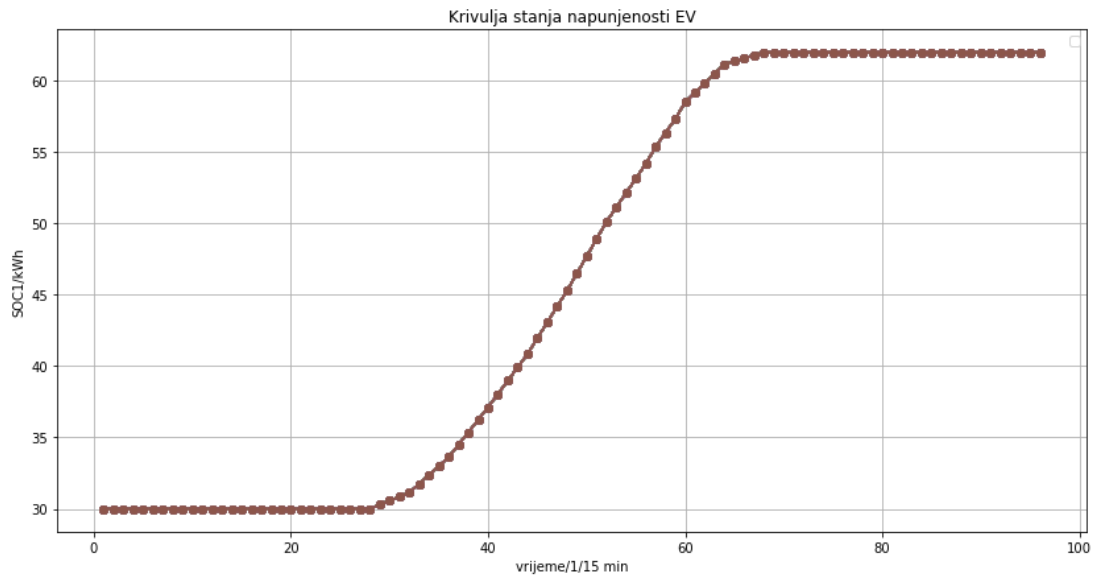
6.1.3. Električno vozilo kućanstva

Slikama 6.8 i 6.9 prikazuju profil punjenja električnog vozila i njegovo stanje napunjenosti.



Slika 6.8 Krivulja punjenja EV kućanstva za osnovni slučaj

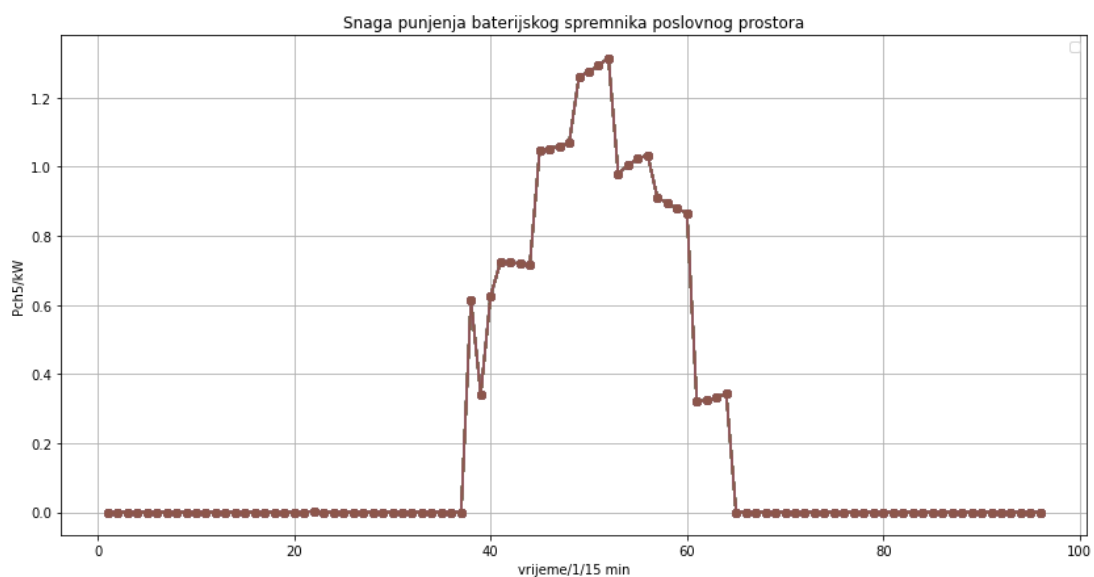
Slika 6.11 prikazana je krivulja punjenja EV kućanstva. Vidljivo je da se EV, najviše puni u vremenu proizvodnje PV panela i prati krivulju proizvodnje PV panela.



Slika 6.9 Krivulja stanja napunjenosti EV

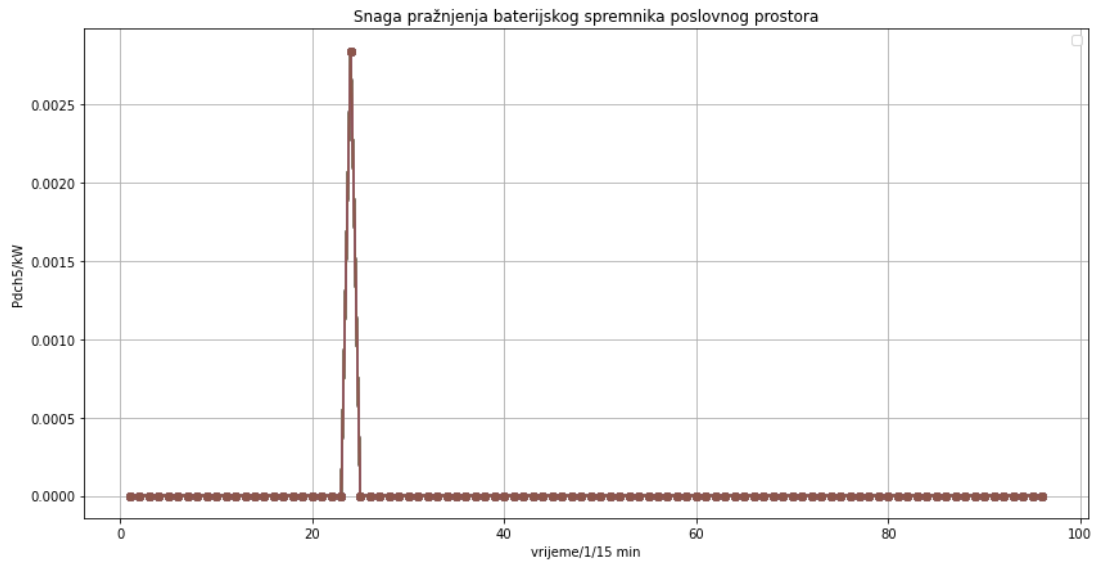
Slika 6.9 prikazuje stanje napunjenosti EV. Na početku dana napunjenost EV je 30 kWh, a do kraja dana EV se napuni do kraja (62 kWh).

6.1.4. Baterijski spremnik



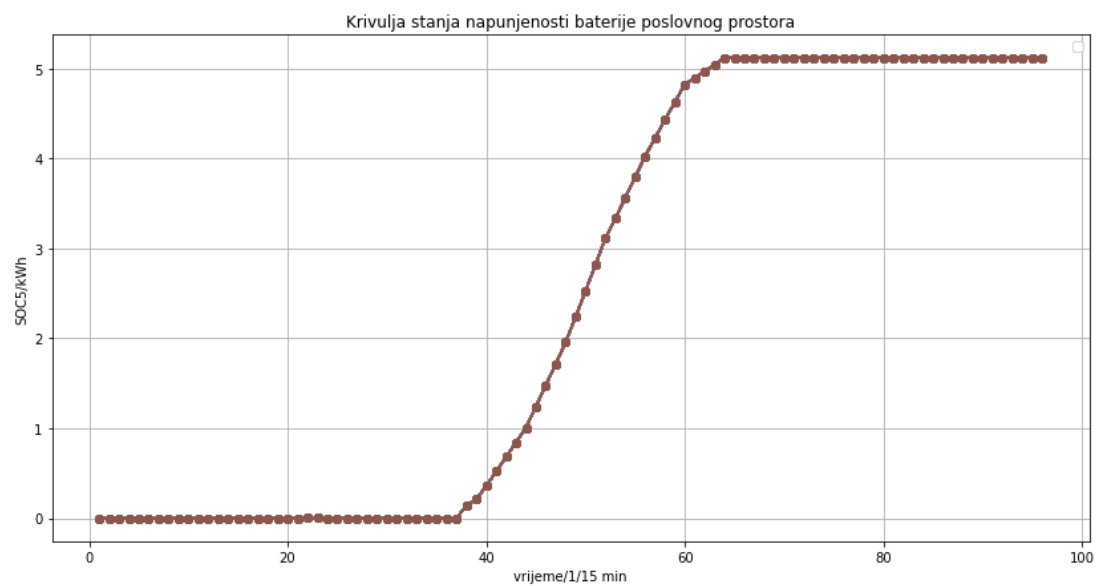
Slika 6.10 Krivulja punjenja baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj

Na slici 6.10 prikazan je profil punjenja baterije poslovnog prostora. Baterija se puni kad PV paneli proizvode električnu energiju, i prati njihovu krivulju proizvodnje.



Slika 6.11 Krivulja pražnjenja baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj

Na slici 6.14 vidljivo je da se baterija prazni u jednom 15 minutnom vremenskom intervalu.



Slika 6.12 Krivulja stanja napunjenosti baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj

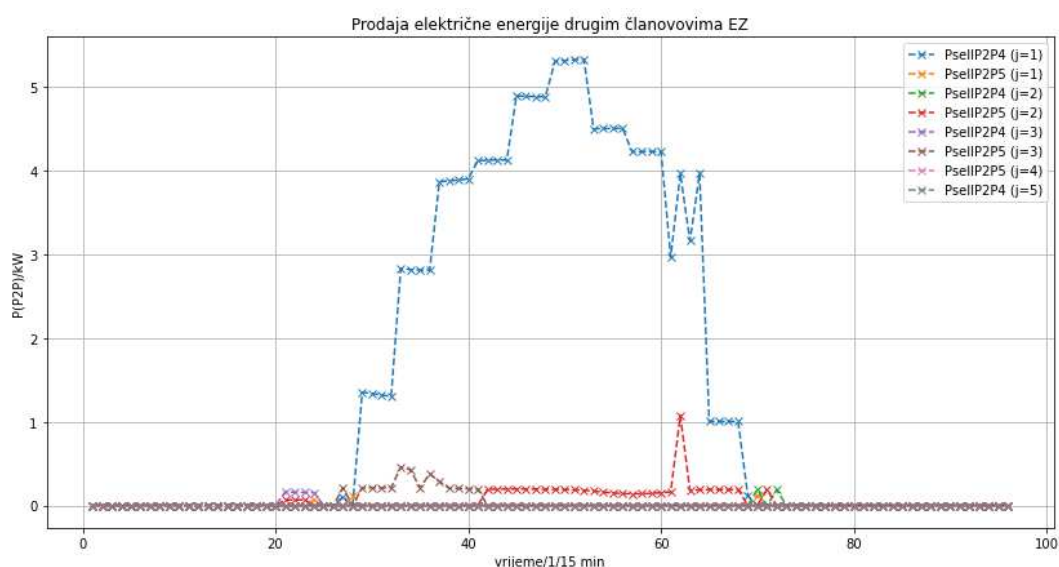
Na slici 6.12 prikazana je krivulja stanja napunjenosti baterije.

6.2. Promjena cijene električne energije

Uneseni su podatci za druge cijene električne energije s dan unaprijed tržišta, a uz to su se koristile krivulje potrošnje potrošača za radni dan.

6.2.1. Cijena električne energije za datum 2.6.2024.

Korištenjem cijena s dan unaprijed tržišta 2. lipnja 2024. u Hrvatskoj dobiven je ukupan trošak od 87,39122 €. Ukupan trošak viši je nego u osnovnom slučaju, što je obrnuto od cijene električne energije (cijene električne energije skuplje su za 1.6.2024.).

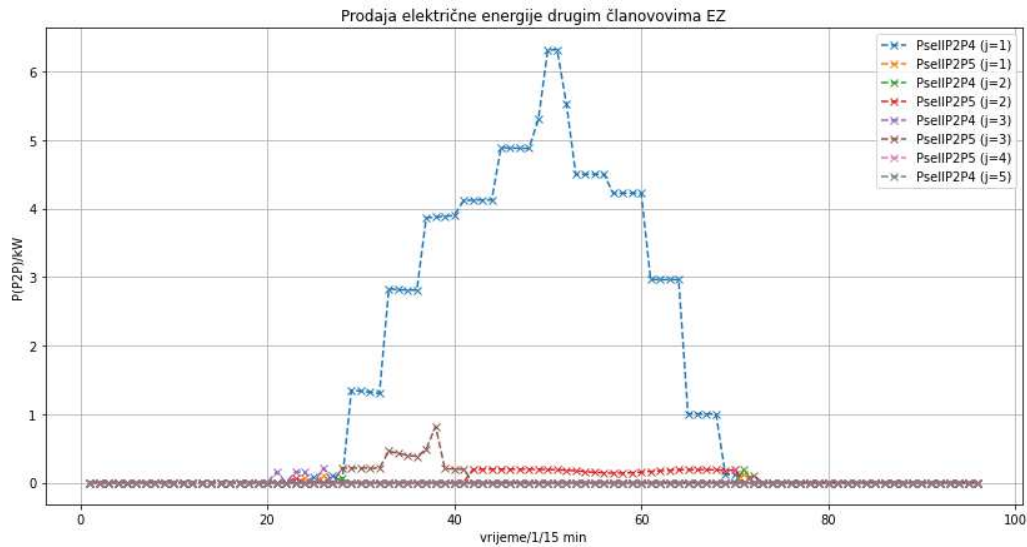


Slika 6.13 Prodaja električne energije trgovinom za 2.6.2024.

Na slici 6.13 vidljive su krivulje prodaje električne energije P2P trgovinom među članovima EZ. Uz niže cijene s obzirom na osnovni slučaj, na P2P tržištu prodaje se manje električne energije.

6.2.2. Cijena električne energije za datum 3.6.2024.

Korištenjem cijena s dan unaprijed tržišta 3. lipnja 2024. u Hrvatskoj dobiven je ukupan trošak od 79,73564 €. Cijene električne energije više su s obzirom na osnovni slučaj, a ukupan trošak je niži.



Slika 6.14 Kupovina električne energije i = 4 P2P trgovinom za 3.6.2024.

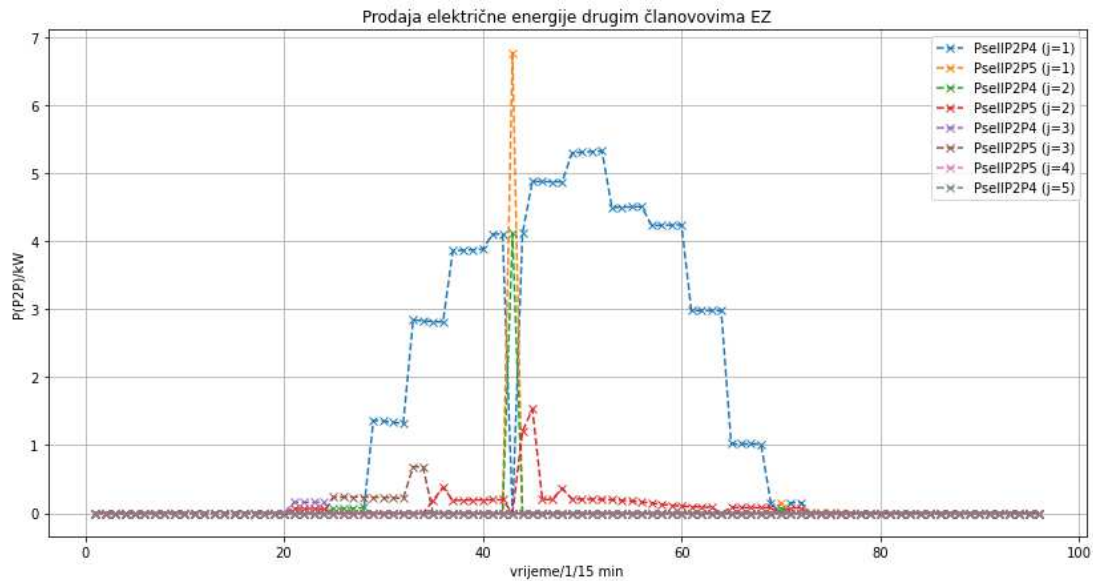
Na slici 6.14 prikazana je prodaje električne energije među članovima energetske zajednice. U slučaju kad su cijene električne energije visoke vidljivo je da farma prodaje veće količine električne energije nego u prijašnjim slučajevima. Kućanstvu farma i dalje prodaje najveći udio električne energije.

6.3. Promjena krivulje opterećenja

Uneseni su podatci za druge krivulje potrošnje svih sudionika na P2P tržištu unutar EZ. U osnovnom slučaju promatrane su krivulje opterećenja za radni dan, dok su u ovom poglavlju promatrani subotnje i nedjeljne krivulje potrošnje. Korištene su cijene s dan unaprijed tržišta električne energije u Hrvatskoj za 1. lipnja 2024.

6.3.1. Subota

Korištenim tipičnim subotnjim krivulja potrošnji za pojedine članove energetske zajednice, dobiven je ukupan trošak energije i iznosi 86,16225 €. Ukupni trošak viši je nego za osnovan slučaj.

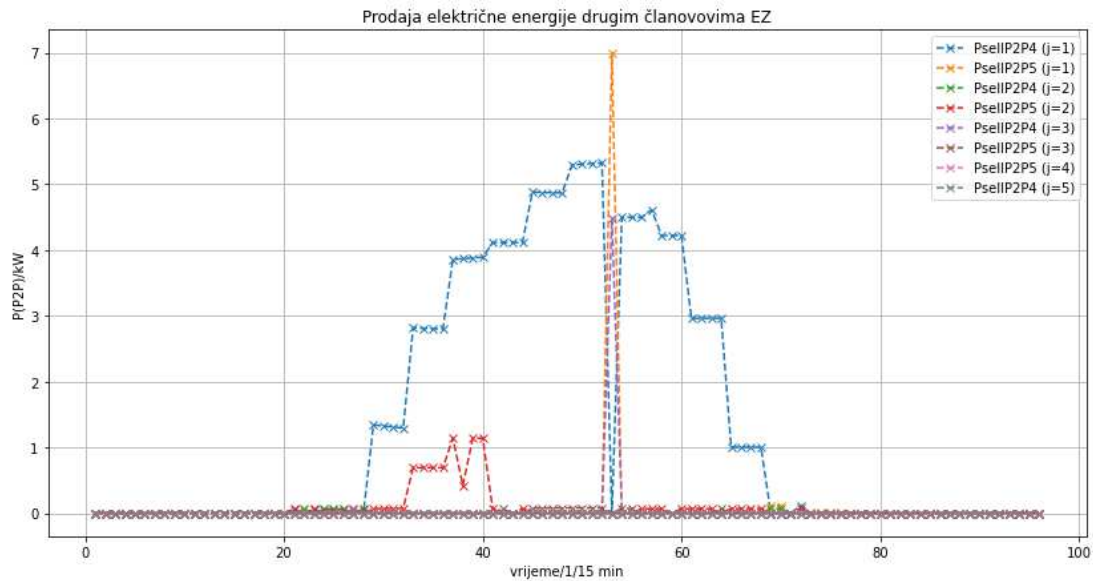


Slika 6.15 Prodaja električne energije P2P trgovinom za subotnju krivulju opterećenja

Na slici 6.15 prikazana je prodaja električne energije P2P trgovinom za subotnje krivulje opterećenja unutar energetske zajednice. Vidljivo je farma sa subotnjom krivuljom opterećenja i dalje najviše električne energije prodaje kućanstvu, ali vidljivo je da u jednom 15 minutnom vremenskom intervalu kućanstvo kupuje električnu energiju od poslovnog prostora snagom od skoro 7 kW. Također, vidljivo je da poslovni prostor prodaje veće količine električne energije drugim članovima EZ nego u osnovnom slučaju.

6.3.2. Nedjelja

Korištenim tipičnih nedjeljnih krivulja potrošnji za pojedine članove energetske zajednice, dobiven je ukupan trošak energije i iznosi: 80,71107 €. Ukupni trošak zajednice niži je nego za osnovni slučaj.



Slika 6.16 Prodaja električne energije P2P trgovinom za nedjeljnu krivulju opterećenja

Na slici 6.16 prikazana je prodaja električne energije P2P trgovinom za nedjeljnu krivulju opterećenja EZ. Poslovni prostor prodaje električnu energiju pekari, a u jednom vremenskom intervalu i kućanstvu. Drugim članovima EZ poslovni prostor ne prodaje električnu energiju za nedjeljnu krivulju potrošnje. Farma isključivo prodaje električnu energiju kućanstvu, a krivulja prodaje nalikuje na krivulju proizvodnje PV panela.

6.4. Slučaj bez P2P trgovanja

Korištenim tipičnim krivulja potrošnji za radni dan za članove energetske zajednice i cijene električne energije s dan unaprijed tržišta od 1. lipnja 2024. dobiven je ukupan trošak energije koji iznosi 120,55488 €. Trošak energije veći je nego kod modela s P2P dijeljenjem energije.

7. Razmatranje

U ovom radu razmatrano je isplativost P2P trgovanja ovisno o profilu potrošnje i cijeni električne energije, te je preveden proračun za isti sustav bez P2P trgovanja. U tablici 3 prikazano je koliko iznosi ukupan trošak ovisno o tome koji se slučaj promatra.

Tablica 4 Prikaz ukupnog troška energije ovisno o slučaju

Slučaj	Ukupni trošak energije
osnovni	84,58978 €
2.6.2024.	87,39122 €
3.6.2024.	79,73564 €
subota	86,16225 €
nedjelja	80,71107 €
bez P2P trgovanja	120,55488 €

Osnovni slučaj promatramo kao referentan. Uočljivo je da najveći utjecaj na konačni trošak energije ima cijena električne energije. Gledajući ukupni trošak energije, razlika između troškova ovisno o profilu potrošnje je također značajna. Najlošiji scenarij s P2P trgovanjem je potrošnja radnog dana s cijenama električne energije od 2. lipnja 2024. Najbolji scenarij s P2P trgovanjem je potrošnja radnog dana s cijenama električne energije od 3. lipnja 2024. Među promatranim cijenama električne energije najniže su 2. lipnja 2024, a najviše 3. lipnja 2024. Vidljivo je da je ukupni trošak obrnuto proporcionalan s cijenama električne energije. Potreba za električnom energijom najveća je radnim danom, zatim subotom, a najniža nedjeljom. Ukupni trošak ne ovisi o ukupnom potrebi za električnom energijom, već ovisi o oblicima krivulja proizvodnje i potrošnje za svaki trenutak.

8. Zaključak

P2P trgovanje energije omogućuje novi pristup trgovanju energijom i decentralizaciju elektroenergetskog sustava. Korištenjem P2P trgovanja EES je fleksibilniji i otporniji. Postoji mnogo matematičkih modela P2P trgovanja energijom. Postoje razne podjele, a najčešća se odnosi na statičku i dinamičku podjelu električne energije.

Iako se u teoriji mogu koristiti razni matematički modeli koji se mogu koristiti za optimizaciju P2P trgovanja, u praksi još nisu zastupljeni. Prisutna su ograničenja zakonodavstva i regulative. Zakonodavni okvir nije prilagođen dinamičkim modelima tržišta, koji se mogu koristiti P2P trgovanjem.

Isplativost trgovanja za članove energetske zajednice prvenstveno ovisi o cijeni električne energije. Što su cijene električne energije više, to je isplativost P2P trgovanja veća. Ukupan trošak energije korištenjem P2P trgovanja ovisi o oblicima krivulja potrošnje i proizvodnje. Trgovanjem unutar zajednice značajno smanjuje ukupne troškove energije u odnosu na slučaj bez zajednice.

P2P trgovanjem moguće je osim ekonomske koristi, omogućuje veću energetske neovisnosti energetske zajednice.

Unatoč trenutnih izazova, P2P trgovanje ima potencijal visoke zastupljenosti u EES-u, potičući održivost i energetske sigurnost.

9. Literatura

[1] M. Domènech Monfort, C. De Jesús, N. Wanapinit i N. Hartmann, »A Review of Peer-to-Peer Energy Trading with Standard Terminology Proposal and a Techno-Economic Characterisation Matrix,« *Energies*, svez. 15(23), br. 9070, 2022.

[2] B. Zhang, Y. Du, E. G. Lim, L. Jiang i K. Yan, »Design and Simulation of Peer-to-Peer Energy Trading Framework with Dynamic Electricity Price,« u 29th Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, Piscataway, NJ, 2019.

[3] Hrvatski sabor, »Zakon o tržištu električne energije,« 14. listopada 2021. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_10_111_1940.html. [Pokušaj pristupa 14. svibnja 2024].

[4] Europski parlament, »Kako EU potiče korištenje energije iz obnovljivih izvora?,« 30. studenog 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20221128STO58001/kako-eu-potice-koristenje-energije-iz-obnovljivih-izvora>. [Pokušaj pristupa 3. lipnja 2024].

[5] M. Ciucci, »Energija iz obnovljivih izvora,« Informativni članci o Europskoj uniji, Europski parlament, ožujak 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/70/renewable-energy>. [Pokušaj pristupa 3. lipnja 2024].

[6] Europska komisija, »Clean energy for all Europeans,« ožujka 2019. [Mrežno]. Available: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=null&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search. [Pokušaj pristupa 22. svibnja 2024].

[7] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche i E. Sorin, »Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review,« ELSEVIER, svez. 104, pp. 367-378, 2019.

[8] Europska komisija, »What is energy community?,« 22. travnja 2024. [Mrežno]. Available: https://wayback.archive-it.org/12090/20240322085217/https://rural-energy-community-hub.ec.europa.eu/energy-communities/what-energy-community_en. [Pokušaj pristupa 14. svibnja 2024].

[9] Hrvatski sabor, »Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji,« 15. prosinca 2021. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_138_2272.html. [Pokušaj pristupa 14. svibnja 2024].

[10] Službeni list, »DIREKTIVA (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (preinaka),« 21. prosinca 2018.. [Mrežno]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001#d1e1132-82-1>. [Pokušaj pristupa 14. svibnja 2024.].

[11] Službeni list Europske unije, »DIREKTIVA (EU) 2019/994 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 5. lipnja 2019. o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i izmjeni Direktive 2012/27/EU (preinaka),« 14 lipnja 2019. [Mrežno]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019L0944#d1e892-125-1>. [Pokušaj pristupa 14 svibnja 2024].

[12] Europska komisija, »Prijedlog DIREKTIVE EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište plinova iz obnovljivih izvora i prirodnih plinova i vodika,« 15. prosinca 2021. [Mrežno]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal->

content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0803. [Pokušaj pristupa 14. svibnja 2024].

[13] B. Fina, »Energy community ex-post electricity allocation based on participants' preferences,« Energy Reports, svez. 9, br. prosinac, pp. 3822-3836, 2023.

[14] P. Zinchenko, »Understanding peer-to-peer energy trading: benefits, examples of platforms, technical requirements,« MindK, [Mrežno]. Available: <https://www.mindk.com/blog/peer-to-peer-energy-trading/>. [Pokušaj pristupa 22 svibnja 2024].

[15] FSR, »Peer-to-peer trading and energy communities,« Florence School of Regulation, 6 prosinca 2019. [Mrežno]. Available: <https://fsr.eu.eu/peer-to-peer-trading-and-energy-communities/>. [Pokušaj pristupa 22 svibnja 2024].

[16] Y. Zhou i J. Wu, »Peer-to-Peer Energy Trading in Microgrids and Local Energy Systems,« u Microgrids and Local Energy Systems, 2021.

[17] International Renewable Energy Agency, »Peer-to-peer electricity trading, innovation landscape brief,« 2020. [Mrežno]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Peer-to-peer_electricity_trading_2020.pdf. [Pokušaj pristupa 29 svibnja 2024].

[18] Y. Develle i J. Thomas, »European Blockchain Sandbox Wiki,« Europska Unija, 23 ožujka 2024. [Mrežno]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/display/EBSISANDCOLLAB/Frequently+Asked+Questions>. [Pokušaj pristupa 29 svibnja 2024].

[19] Y. Jin, J. Choi i D. Won, »Pricing and Operation Strategy for Peer-to-Peer Energy Trading Using Distribution System Usage Charge and Game Theoretic Model,« IEEE Access, svez. 8, pp. 137720-137730, 2020.

- [20] B. Fina, »Energy community ex-post allocation algorithm based on participants' preferences,« Energy Reports 9, pp. 3822-3836, 2023.
- [21] S. Malik, S. D. M. Thankue i J. G. Bersling, »Comparative Double Auction Approach for Peer-to-Peer Energy Trading on Multiple microgrids,« Smart Grids and Sustainable Energy, svez. 8, 2023.
- [22] N. Liu, X. Yu, C. Wang, C. Li, L. Ma i J. Lei, »Energy-Sharing Model With Price-Based Demand Response for Microgrids od Peer-to-Peer Prosumers,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 32, br. 5, pp. 3569-3583, 2017.
- [23] C. De-Pablos-Heredero i M. De-Pablos-Heredero, »Supply Chain Coordination in the Textile and Apparel Industry: A Systematic Literature Review,« u Management and Inter/Intraaaa Organizational Relationship in the Textile and Apperel Industry, 2019.
- [24] R. Faia, J. Soares, T. L. F. Pinto, Z. Vale i J. M. Coechado, »Optimal Model for Local Energy Community Scheduling Considering Peer to Peer Electricity Transactions,« IEEE Access, svez. 9, pp. 12420-12430, 2021.
- [25] Stadtwerke Unna, »VDEW-Lastprofile,« Stadtwerke Unna, [Mrežno]. Available: https://www.gipsprojekt.de/featureGips/Gips?SessionMandant=sw_unna&Anwendung=EnWGKnotenAnzeigen&PrimaryId=133029&Mandantkuerzel=sw_unna&Navigation=J . [Pokušaj pristupa 7 lipnja 2024].
- [26] »Potpuno novi škoda enyaq iV,« [Mrežno]. Available: <https://www.autozubak.hr/wp-content/uploads/2022/06/enyaq-katalog.pdf>. [Pokušaj pristupa 12 lipnja 2024].
- [27] Metar, »Sunčana elektrana za kućanstvo unutar modela samoopskrbe,« [Mrežno]. Available: <https://metar.door.hr/solarni-kalkulator/>. [Pokušaj pristupa 17 srpnja 2024].

[28] Custom Marine Products, »Introduction to LiFePO4 Marine Batteries,« 2019. [Mrežno]. Available: https://www.custommarineproducts.com/uploads/1/4/3/7/1437708/qms_life_po4_manual.pdf. [Pokušaj pristupa 1 srpnja 2024].

[29] Hrvatska energetska regulatorna agencija, »Pravilnik o općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom,« Narodne novine, 29 kolovoza 2022. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_08_100_1473.html. [Pokušaj pristupa 5 srpnja 2024].

[30] Hrvatski Sabor, »Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji,« Narodne novine, 14 srpnja 2023. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_07_83_1298.html. [Pokušaj pristupa 12 srpnja 2024].

[31] HEP Elektra, »Kalkulator v0.3,« [Mrežno]. Available: <https://mojracun.hep.hr/kalkulator/>. [Pokušaj pristupa 13 rujna 2024].

[32] S. Eldrige, »Nash equilibrium,« Britannica, 12 travnja 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.britannica.com/science/Nash-equilibrium>. [Pokušaj pristupa 3 lipnja 2024].

[33] Bilevel Optimization Portal, »Bilevel Optimization,« Bilevel Optimization Portal, Resources on Evolutionary Bilevel Optimization, [Mrežno]. Available: <https://bi-level.org/>. [Pokušaj pristupa 3 lipnja 2024].

[34] A. Raghunathan, A. Cherian i D. Jha, »Game Theoretic Optimization via Gradient-based Nikaido-Isoda Function,« u International Conference on Machine Learning, 2019.

[35] HEP - Operator distributivnog sustava, »Kupac s vlastitom proizvodnjom,« [Mrežno]. Available: <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom/29>. [Pokušaj pristupa 2 kolovoza 2024].

[36] python, »What is Python? Executive Summary,« [Mrežno]. Available: <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>. [Pokušaj pristupa 17 srpnja 2024].

[37] M. Khasanov, S. Kamel, E. H. R. C. Houssein i F. A. Hashim, »Optimal allocation strategy of photovoltaic- and wind turbine-based distributed generation units in radial distribution networks considering uncertainty,« *Neural Computing and Application*, pp. 2883-2908, 2023.

[38] CROPEX, »Dan unaprijed tržište,« [Mrežno]. Available: <https://www.cropex.hr/hr/trgovanja/dan-unaprijed-trziste/rezultati-dan-unaprijed-trzista.html>. [Pokušaj pristupa 6 lipnja 2024].

Sažetak

Povećani udio distribuiranih izvora energije i napredak informacijske i komunikacijske tehnologije utječu na uobičajeni elektroenergetski sustav (EES). U EES-u sve je prisutniji dvosmjerni tok snaga i povećan je broj aktivnih potrošača. Europska unija podržava obnovljive izvore energije i energetske zajednice, potičući *peer-to-peer* (P2P) trgovanje energijom unutar energetskih zajednica. Cilj rada je u teorijskom dijelu napraviti pregled matematičkih modela za *peer-to-peer* trgovanje unutar energetskih zajednica, a u praktičnom napraviti model upravljanja energetskom zajednicom, čiji članovi koriste *peer-to-peer* trgovanje energijom.

Ključne riječi

Energetska zajednica građana, zajednica obnovljive energije, *peer-to-peer* trgovanje energijom, linearna optimizacija, matematički model

Summary

The increase of usage of distributed energy sources and development of information and communication technology impact the conventional energy power system. There is increase in number of prosumers and presence of bidirectional power flow. The European Union supports renewable energy sources and energy communities, therefore supporting peer-to-peer energy trading within the energy communities. The aim of this thesis is to provide an overview of mathematical models for peer-to-peer energy trading within energy communities in the theoretical part, and to create a management model for energy community in the practical part, where community members use peer-to-peer energy trading.

Key words

Citizen energy community, renewable energy community, peer-to-peer energy trading, linear optimization, mathematical models

Popis kratica

ADMM	<i>alternating direction method of multipliers</i>
CEC	energetska zajednica građana (engl. <i>citizen energy community</i>)
CROPEX	Hrvatska burza električne energije
DA	dvostruka dražba (engl. <i>double auction</i>)
DES	distribuirani izvor energije (engl. <i>distributed energy source</i>)
EES	elektroenergetski sustav
EMS	sustav upravljanja energijom (engl. <i>energy managements system</i>)
engl.	engleski
EU	Europska unija
EV	električno vozilo
EZ	energetska zajednica
IKT	informacijska i komunikacijska tehnologija
MSP	malo i srednje poduzeće
P2P	<i>peer-to-peer</i>
PV	fotonapon (engl. <i>photovoltaic</i>)
REC	zajednica obnovljive energije (engl. <i>renewable energy community</i>)
ODS	operator distribucijskog sustava
OI	obnovljivi izvori
OIE	obnovljivi izvori energije
SDR	omjer ponude i potražnje (engl. <i>supply and demand ratio</i>)

Popis tablica

Tablica 1 Razlike između zajednica obnovljivih energija i energetske zajednice građana.....	6
Tablica 2 Cijena električne energije na dan unaprijed tržištu električne energije za datume 1.6-3.6.2024.	46
Tablica 3 Iznos cijena korištenja mreže i opskrbljivača.....	49
Tablica 4 Prikaz ukupnog troška energije ovisno o slučaju.....	62

Popis slika

Slika 3.1 Centralizirano P2P tržište energijom	12
Slika 3.2 Primjer centralnog P2P tržišta energijom	13
Slika 3.3 Decentralizirano P2P tržište	15
Slika 3.4 Primjer decentraliziranog P2P tržišta energijom.....	16
Slika 3.5 Hibridno P2P tržište energijom.....	17
Slika 4.1 Prikaz izračuna PEq i točke ravnotežne cijene mehanizmom dvostruke dražbe.....	23
Slika 4.2 Dijagram toka algoritma za optimalno trgovanje u modelu teorije igara	26
Slika 5.1 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za radni dan ..	43
Slika 5.2 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za subotu	43
Slika 5.3 Krivulje potrošnje članova energetske zajednice za nedjelju.....	44
Slika 5.4 Krivulja proizvodnje PV panela.....	45
Slika 6.1 Kupovina električne energije $i = 1$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	51
Slika 6.2 Kupovina električne energije $i = 2$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	51
Slika 6.3 Kupovina električne energije $i = 3$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	52
Slika 6.4 Kupovina električne energije $i = 4$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	52
Slika 6.5 Kupovina električne energije $i = 5$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	53
Slika 6.6 Prodaja električne energije $i = 4$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	54
Slika 6.7 Prodaja električne energije $i = 5$ P2P trgovinom u osnovnom slučaju.....	54
Slika 6.8 Krivulja punjenja EV kućanstva za osnovni slučaj.....	55
Slika 6.9 Krivulja stanja napunjenosti EV	56

Slika 6.10 Krivulja punjenja baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj	56
Slika 6.11 Krivulja pražnjenja baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj	57
Slika 6.12 Krivulja stanja napunjenosti baterije poslovnog prostora za osnovni slučaj	57
Slika 6.13 Prodaja električne energije trgovinom za 2.6.2024.	58
Slika 6.14 Kupovina električne energije $i = 4$ P2P trgovinom za 3.6.2024.	59
Slika 6.15 Prodaja električne energije P2P trgovinom za subotnju krivulju opterećenja	60
Slika 6.16 Prodaja električne energije P2P trgovinom za nedjeljnu krivulju opterećenja	61

Dodatak: programski kod

Model s P2P trgovanjem energije

```

from gurobipy import *
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

h = 24 #number of hours in a day
min = 4*h #number of 15 min intervals in a day

#max buy from grid or with P2P trading in kW
PmaxB = 7
#max sell to grid or with P2P trading in kW
PmaxS = 22

#load curves of energy community members on working days during summer (in kW)
I1 =
[0,0.08636,0.07696,0.06884,0.062440,0.05804,0.05528,0.0536,0.05244,0.05136,0.05024,0.04924,0.04828,0.0474
4,0.04684,0.04656,0.0466,0.04712,0.048,0.04924,0.05076,0.05264,0.05564,0.06052,0.06824,0.0792,0.09196,0
.10476,0.11568,0.12344,0.12856,0.132,0.13484,0.1378,0.14072,0.1432,0.14484,0.14532,0.14488,0.14376,0.14
232,0.1408,0.13948,0.13852,0.13816,0.13864,0.14008,0.14264,0.14648,0.15152,0.15672,0.16076,0.16232,0.1
6048,0.15608,0.1502,0.144,0.13844,0.1336,0.12936,0.12568,0.12244,0.11964,0.1174,0.11568,0.11464,0.1142
4,0.1146,0.11568,0.1176,0.12032,0.12388,0.12816,0.13324,0.13892,0.14504,0.15148,0.15796,0.1638,0.16828,
0.17064,0.1704,0.16832,0.16528,0.16232,0.16012,0.15844,0.15684,0.1548,0.15192,0.14788,0.14256,0.13568,
0.1272,0.11748,0.10708,0.09656]
I2 =
[0,0.07448,0.07364,0.07284,0.072,0.071,0.07,0.06908,0.0684,0.068,0.06784,0.06772,0.06748,0.067,0.06644,0.
06596,0.06568,0.0658,0.06612,0.06644,0.0666,0.06636,0.06588,0.06532,0.0648,0.0646,0.06536,0.06788,0.07
288,0.08092,0.09164,0.10444,0.11876,0.13396,0.1488,0.16216,0.17276,0.17976,0.18392,0.18632,0.18808,0.1
9004,0.19216,0.194,0.19528,0.19564,0.19528,0.19448,0.19348,0.19232,0.19028,0.18648,0.17996,0.17036,0.1
5932,0.14888,0.14128,0.13812,0.13916,0.14376,0.15116,0.1606,0.17064,0.17972,0.18628,0.18924,0.18948,0.
18832,0.18716,0.18696,0.18716,0.18692,0.18536,0.18172,0.17568,0.16708,0.15568,0.14172,0.12716,0.11424,
0.10528,0.10184,0.10228,0.1042,0.10528,0.10368,0.09996,0.09532,0.09088,0.08756,0.0852,0.08344,0.08188,
0.08024,0.07856,0.07696,0.0756]
I3 =
[0,0.06736,0.06116,0.0546,0.04936,0.04672,0.04596,0.04588,0.04532,0.04392,0.04428,0.05,0.06448,0.08964,
0.12104,0.15264,0.17832,0.19368,0.20056,0.20236,0.20252,0.20376,0.20604,0.20856,0.21056,0.21148,0.2115
2,0.21108,0.21056,0.21028,0.21028,0.2104,0.21056,0.21076,0.21076,0.2104,0.20956,0.20804,0.20576,0.2026,
0.19848,0.1934,0.1878,0.18228,0.17732,0.17332,0.16968,0.16556,0.1602,0.153,0.14464,0.136,0.12796,0.1213
2,0.11656,0.11396,0.11384,0.11628,0.12008,0.1238,0.12596,0.12548,0.123,0.11948,0.11588,0.11296,0.11088,
0.10956,0.1088,0.10856,0.1082,0.10716,0.1048,0.10068,0.09524,0.08904,0.0826,0.07656,0.07116,0.06672,0.0
6348,0.0616,0.06064,0.06008,0.05944,0.05832,0.05696,0.05584,0.0554,0.05604,0.05764,0.06016,0.06348,0.0
6728,0.0706,0.0724,0.07152]
I4 =
[0,0.06616,0.06316,0.06052,0.05836,0.05668,0.0554,0.05444,0.05372,0.05316,0.05268,0.05228,0.05188,0.051
44,0.05096,0.05048,0.05,0.0496,0.04936,0.04948,0.05,0.05116,0.05292,0.05532,0.05836,0.06216,0.06744,0.0
7484,0.0852,0.09892,0.11496,0.13184,0.1482,0.16264,0.17388,0.1806,0.18156,0.17608,0.16612,0.15412,0.14
264,0.1338,0.12816,0.1258,0.12692,0.13116,0.1366,0.14092,0.14172,0.1374,0.1294,0.11992,0.11116,0.10484,
0.10084,0.09852,0.09724,0.09656,0.0962,0.09616,0.09632,0.09664,0.097,0.09724,0.09724,0.097,0.09684,0.09
708,0.0982,0.10056,0.1048,0.11152,0.12136,0.1344,0.14892,0.16264,0.1732,0.17892,0.1798,0.17648,0.16952,
0.1596,0.14808,0.1364,0.12596,0.11792,0.11188,0.10708,0.1028,0.09848,0.09408,0.0896,0.0852,0.08096,0.07
692,0.07308,0.06948]
I5 =
[0,0.02356,0.02204,0.02152,0.0208,0.02048,0.02044,0.0206,0.0208,0.02092,0.021,0.02096,0.0208,0.0206,0.02
04,0.02044,0.0208,0.02156,0.0224,0.02292,0.02268,0.0216,0.02068,0.02124,0.0246,0.03192,0.04384,0.06076,
0.0832,0.11128,0.14372,0.17904,0.2156,0.25168,0.28472,0.31208,0.33096,0.33972,0.34088,0.338,0.33472,0.3
3376,0.33464,0.33604,0.33664,0.33528,0.33176,0.32592,0.31772,0.30712,0.29444,0.2802,0.26476,0.249,0.23
524,0.22636,0.22504,0.23272,0.24528,0.25716,0.26288,0.25836,0.24568,0.22836,0.20992,0.19312,0.1776,0.1
6216,0.1456,0.12732,0.10844,0.09064,0.07564,0.06464,0.05696,0.05152,0.04728,0.04332,0.03964,0.03648,0.
03404,0.03248,0.03156,0.03092,0.03024,0.02932,0.02824,0.0272,0.02648,0.0262,0.0262,0.02636,0.02648,0.0
2636,0.026,0.0254,0.0246]

#load curves of energy community members on Saturdays during summer (in kW)
# I1 =
[0,0.08984,0.08488,0.08072,0.07656,0.07172,0.06656,0.0616,0.05744,0.05448,0.05256,0.05144,0.05076,0.050
32,0.05004,0.04988,0.04992,0.05012,0.0504,0.05064,0.05076,0.05076,0.05088,0.0516,0.05328,0.0562,0.0604,
0.06584,0.0724,0.08004,0.08848,0.0974,0.10652,0.1156,0.1244,0.1328,0.14068,0.1478,0.15396,0.15892,0.162
32,0.16408,0.16472,0.165,0.16564,0.16712,0.16944,0.17236,0.1756,0.17896,0.18184,0.18372,0.18396,0.1821
6,0.17868,0.17412,0.16896,0.16376,0.15884,0.15464,0.15148,0.14956,0.14856,0.148,0.14732,0.14624,0.1450

```

```
4,0.14416,0.144,0.14492,0.14696,0.15,0.15396,0.15876,0.164,0.1692,0.17396,0.1778,0.18052,0.1818,0.18144,
0.17928,0.17564,0.17096,0.16564,0.16012,0.15504,0.15112,0.149,0.14892,0.1496,0.14936,0.14648,0.1398,0.1
3028,0.11952,0.10904]
# I2 =
[0,0.07532,0.07548,0.07572,0.0756,0.07484,0.07364,0.07228,0.07108,0.07028,0.0698,0.06952,0.06928,0.0690
4,0.0688,0.06856,0.0684,0.06832,0.06832,0.06832,0.0684,0.0684,0.06832,0.06804,0.06748,0.06688,0.06768,0
.0718,0.081,0.09628,0.11544,0.13536,0.15296,0.16592,0.17472,0.18048,0.18448,0.18764,0.19024,0.19248,0.1
9436,0.19604,0.19748,0.19872,0.19976,0.2006,0.2014,0.20228,0.20336,0.20468,0.20552,0.20508,0.20248,0.1
97,0.18868,0.17756,0.16376,0.14772,0.13096,0.11532,0.1026,0.09412,0.0892,0.08672,0.08548,0.08448,0.083
48,0.08236,0.081,0.07936,0.07784,0.07676,0.07648,0.07728,0.07872,0.08016,0.081,0.08088,0.08032,0.08008,
0.081,0.08344,0.08664,0.08952,0.09088,0.09,0.08748,0.08416,0.081,0.07868,0.07708,0.07588,0.07468,0.0732
8,0.07176,0.07036,0.06928]
# I3 =
[0,0.09176,0.11824,0.14556,0.16828,0.1822,0.18844,0.1894,0.1874,0.1846,0.18224,0.18116,0.18236,0.18644,
0.1926,0.19968,0.20656,0.21228,0.217,0.221,0.22468,0.22824,0.23152,0.23412,0.23576,0.23624,0.2358,0.234
84,0.23376,0.23264,0.23044,0.22588,0.21764,0.20496,0.1894,0.17308,0.1582,0.1464,0.13768,0.13168,0.1279
6,0.12604,0.12532,0.1252,0.12492,0.12416,0.12316,0.12256,0.12292,0.12444,0.12592,0.12292,0.12292,0.115
96,0.1064,0.096,0.08664,0.07984,0.0756,0.0736,0.07356,0.075,0.07724,0.07936,0.0806,0.08032,0.07884,0.07
672,0.07456,0.07276,0.07116,0.06952,0.06752,0.06496,0.06228,0.05996,0.05844,0.05808,0.05852,0.05916,0.
05944,0.05896,0.0578,0.0562,0.0544,0.05264,0.05096,0.04952,0.04836,0.04756,0.04712,0.04704,0.04736,0.0
48,0.04872,0.04928,0.04936]
# I4 =
[0,0.0672,0.0656,0.06428,0.063,0.06144,0.05976,0.05804,0.05652,0.05524,0.05424,0.05344,0.0528,0.05224,0.
0518,0.05136,0.05096,0.05056,0.0502,0.05,0.05,0.05028,0.05084,0.05168,0.0528,0.05436,0.05716,0.06216,0.
0704,0.08244,0.09744,0.1142,0.13152,0.1482,0.16276,0.17376,0.17968,0.17964,0.17488,0.1672,0.1584,0.150
16,0.14344,0.13912,0.138,0.14044,0.1444,0.14752,0.14728,0.142,0.13308,0.12268,0.113,0.10576,0.1006,0.09
68,0.09356,0.09028,0.08712,0.0844,0.08244,0.08148,0.08128,0.0814,0.08152,0.08132,0.08124,0.08176,0.083
36,0.08656,0.09172,0.09916,0.10932,0.12208,0.13584,0.14864,0.1584,0.16356,0.1644,0.16152,0.1556,0.1474,
0.1378,0.12788,0.11856,0.11068,0.10412,0.09852,0.09356,0.08896,0.08464,0.0806,0.07688,0.07344,0.07028,
0.0674,0.06484]
# I5 =
[0,0.02356,0.02248,0.02152,0.0208,0.02048,0.02048,0.02064,0.0208,0.02088,0.02088,0.02084,0.0208,0.0208,
0.0208,0.02084,0.0208,0.02072,0.02068,0.02068,0.0208,0.02112,0.02156,0.02212,0.02268,0.02324,0.02376,0.
02424,0.0246,0.02488,0.0252,0.02568,0.02648,0.02772,0.0294,0.03148,0.03404,0.03696,0.04004,0.04292,0.0
454,0.04716,0.04832,0.04896,0.04916,0.049,0.0484,0.04724,0.0454,0.04284,0.03984,0.0368,0.03404,0.03188,
0.03032,0.02916,0.02836,0.0278,0.02732,0.02692,0.02648,0.02592,0.02536,0.02488,0.0246,0.02456,0.02468,
0.02476,0.0246,0.02408,0.02344,0.02288,0.02268,0.023,0.0236,0.02424,0.0246,0.02444,0.02396,0.02328,0.02
268,0.02232,0.0222,0.02232,0.02268,0.02328,0.02392,0.0244,0.0246,0.02432,0.02376,0.02316,0.02268,0.022
56,0.02264,0.02276,0.02268]
#load curves of energy community members on Sundays during summer (in kW)
# I1 =
[0,0.10008,0.09252,0.08592,0.07992,0.07412,0.06868,0.06388,0.05992,0.057,0.05496,0.05352,0.05244,0.0515
2,0.05076,0.05024,0.04992,0.04992,0.05,0.05008,0.04992,0.04948,0.04892,0.0484,0.04828,0.04868,0.04984,0.
05188,0.05492,0.0592,0.06488,0.07224,0.08156,0.09288,0.10564,0.11904,0.13232,0.14484,0.15616,0.166,0.1
7396,0.17996,0.1846,0.18872,0.19308,0.19828,0.20376,0.20868,0.21224,0.21372,0.21276,0.20904,0.20224,0.
19244,0.18088,0.1692,0.15896,0.1514,0.14596,0.1416,0.13732,0.1324,0.127,0.12156,0.11652,0.11224,0.1088
8,0.10668,0.10572,0.10612,0.10776,0.11044,0.11404,0.11836,0.1234,0.12916,0.13568,0.1428,0.14976,0.1557
2,0.1598,0.16136,0.16084,0.15896,0.15648,0.15396,0.15156,0.14932,0.14732,0.14544,0.143,0.1392,0.13316,0
.12444,0.1138,0.10248,0.09156]
# I2 =
[0,0.06864,0.06828,0.068,0.06748,0.06664,0.0656,0.0646,0.06388,0.06364,0.06372,0.06388,0.06388,0.06356,
0.06304,0.06248,0.06208,0.06196,0.06204,0.06212,0.06208,0.06184,0.06148,0.0612,0.0612,0.0616,0.06244,0.
0638,0.06568,0.068,0.07036,0.07216,0.07288,0.0722,0.07048,0.06844,0.0666,0.06548,0.06508,0.0652,0.0656
8,0.06644,0.06732,0.06828,0.06928,0.07024,0.07108,0.07168,0.072,0.07192,0.07156,0.07096,0.0702,0.06932,
0.06848,0.06784,0.06748,0.06756,0.06788,0.06824,0.0684,0.0682,0.06784,0.06752,0.06748,0.06788,0.06848,
0.06904,0.06928,0.06908,0.06872,0.06864,0.06928,0.07088,0.07304,0.07512,0.07648,0.0768,0.07652,0.07648
,0.0774,0.07968,0.08268,0.08524,0.0864,0.08536,0.08276,0.07948,0.07648,0.07444,0.07316,0.0722,0.07108,0.
06956,0.068,0.06684,0.0666]
# I3 =
[0,0.04884,0.04784,0.0466,0.04532,0.04428,0.04344,0.04276,0.04232,0.04204,0.04196,0.04204,0.04232,0.042
8,0.04332,0.04388,0.04432,0.0446,0.04476,0.045,0.04532,0.04596,0.04684,0.04796,0.04936,0.051,0.05264,0.
0542,0.0554,0.05616,0.05652,0.05656,0.05644,0.05616,0.05588,0.0556,0.0554,0.0554,0.05572,0.05668,0.058
44,0.06116,0.06452,0.06812,0.07152,0.07444,0.07672,0.07844,0.0796,0.08016,0.08008,0.07924,0.0776,0.075
08,0.07212,0.06912,0.06648,0.0646,0.06348,0.06312,0.06348,0.06444,0.06568,0.06684,0.06752,0.0674,0.066
8,0.06604,0.06548,0.0654,0.06548,0.06532,0.06448,0.06272,0.06036,0.05776,0.0554,0.05368,0.05248,0.0517
6,0.0514,0.05124,0.05116,0.05092,0.05036,0.0494,0.04824,0.04712,0.04636,0.04616,0.0464,0.04688,0.04736,
0.04768,0.04792,0.04812,0.04836]
# I4 =
[0,0.06256,0.0606,0.05888,0.05744,0.0562,0.0552,0.0544,0.05372,0.05316,0.05272,0.05228,0.05188,0.05144,
0.05096,0.05048,0.05,0.0496,0.0494,0.04948,0.05,0.05116,0.05308,0.05604,0.0602,0.0658,0.07316,0.08264,0.
09448,0.10884,0.12472,0.14104,0.15656,0.17008,0.18048,0.18656,0.18712,0.18156,0.17176,0.16016,0.14912,
```

```

0.14076,0.1356,0.13368,0.13524,0.13988,0.1456,0.14984,0.15004,0.14464,0.13524,0.12448,0.11484,0.10836,
0.10464,0.1028,0.10188,0.10112,0.1004,0.09972,0.09912,0.09856,0.09812,0.09768,0.09724,0.09692,0.09688,
0.09752,0.09912,0.10204,0.10676,0.11364,0.1232,0.13544,0.14892,0.16184,0.17228,0.1788,0.18108,0.1792,0.
1732,0.16344,0.1514,0.13892,0.12784,0.11952,0.11348,0.10884,0.10468,0.10024,0.09544,0.0904,0.0852,0.08
004,0.07504,0.07052,0.06668]
# l5 =
[0,0.02236,0.0218,0.02124,0.0208,0.0206,0.0206,0.02068,0.0208,0.02084,0.02084,0.02084,0.0208,0.0208,0.02
084,0.02084,0.0208,0.02072,0.02064,0.02064,0.0208,0.02116,0.02164,0.0222,0.02268,0.02308,0.02324,0.023
16,0.02268,0.02184,0.0208,0.01976,0.01892,0.01844,0.01836,0.01852,0.01892,0.01944,0.02,0.02048,0.0208,0
.02088,0.02084,0.02076,0.0208,0.02104,0.02148,0.02204,0.02268,0.0234,0.02404,0.02448,0.0246,0.02432,0.0
238,0.02316,0.02268,0.02248,0.02244,0.02256,0.02268,0.0228,0.02284,0.0228,0.02268,0.02252,0.0224,0.022
44,0.02268,0.02324,0.02392,0.02444,0.0246,0.02424,0.02356,0.02296,0.02268,0.023,0.02364,0.02428,0.0246,
0.02428,0.02364,0.023,0.02268,0.02296,0.0236,0.02424,0.0246,0.0244,0.02384,0.0232,0.02268,0.02256,0.022
64,0.02272,0.02268]

#pv production
pv = [0,0,0,0,0,0.03, 0.09, 0.35, 0.57, 0.72, 0.75, 0.86, 0.92, 0.8, 0.76, 0.58, 0.3, 0.1, 0.01, 0, 0, 0, 0, 0]
pv4 = {}
pv5 = {}
pv4[0] = 0
pv5[0] = 0
k = 1
for i in range(h):
    for j in range(1,5):
        pv4[k] = pv[i]*7
        pv5[k] = pv[i]*3
        k = k + 1

#electricity price in €/MWh
#june 1st 2024
pr =
[83.26,79.79,70.71,77.42,63.42,63.78,68.2,66.1,77.69,65.69,51.04,44.89,22.93,8.07,2.63,5.16,14.11,58.74,84.7
1,112.74,126.39,116.22,86.59,81.69]
#june 2nd 2024
#pr = [51.25,46.59,37.24,31.99,10.8,9.35,4.96,4.11,0.97,0,0,1.03,-0.23,-5.05,-13.42,-13.45,-
6.89,4.12,49.8,92.42,128.49,110.04,99.72,88.92]
#june 3rd 2024
#pr =
[90.32,92.45,91.89,89.9,87.53,103.35,128.53,193.06,162.96,127.57,107.63,100.24,86.57,87.47,88.68,97.53,107
.96,134.43,170.42,194.18,212.03,192.96,147.43,120.56]

pB = {}
pS = {}
pP2P = {}
k = 1
pB[0] = 0
p_trans = 0.011945
p_dist = 0.029199
p_supply = 0.982
p_meas = 1.54
p_renew = 0.013239
vat = 1.13

#electricity price for 15-minute intervals in €/kWh
for i in range(h):
    for j in range(1,5):
        pB[k] = pr[i]/1000
        k = k + 1
for i in range(min + 1):
    pS[i] = 0.9*pB[i]
    pP2P[i] = (pS[i]+pB[i])/2

def cost():
    sum = 0
    for t in range(1, min + 1):
        sum = sum + vat*(pB[t] + p_trans + p_dist + p_supply + p_meas + p_renew)*(PbuyG1[t] + PbuyG2[t] +
PbuyG3[t] + PbuyG4[t] + PbuyG5[t])/4 - pS[t]*(PsellG1[t] + PsellG2[t] + PsellG3[t] + PsellG4[t] + PsellG5[t])
        for i in range(1,6):
            for j in range(4,6):
                sum = sum + vat*(pP2P[t] + p_trans + p_dist + p_meas)*(PbuyP2P[i][j][t])/4
        for i in range(4,6):
            for j in range(1,6):

```

```

sum = sum - pP2P[t]*PsellP2P[i][j][t]/4
return sum

ec = Model("Energy Community")

#electrical vehicle od consumer 1
PchMax1 = 11
Etach1 = 58/62 #Eneto/Ebruto
SOCmax1 = 62 #kWh

#battery of prosumer 5
PchMax5 = 9 #kW
PdchMax5 = 10 #kW
Etach5 = .9
Etadch5 = .95
SOCmax5 = 5.12 #kWh

#variables
Pch1 = {}
SOC1 = {}
xch1 = {}
Pch5 = {}
Pdch5 = {}
SOC5 = {}
xch5 = {}
xdch5 = {}
Pgen4 = {}
Pgen5 = {}
PbuyG1 = {}
PbuyG2 = {}
PbuyG3 = {}
PbuyG4 = {}
PbuyG5 = {}
XbuyG1 = {}
XbuyG2 = {}
XbuyG3 = {}
XbuyG4 = {}
XbuyG5 = {}
PsellG1 = {}
PsellG2 = {}
PsellG3 = {}
PsellG4 = {}
PsellG5 = {}
XsellG1 = {}
XsellG2 = {}
XsellG3 = {}
XsellG4 = {}
XsellG5 = {}

#initial value
SOC1[0] = 30
SOC5[0] = 0

for t in range(1,min + 1):
    Pch1[t] = ec.addVar()
    SOC1[t] = ec.addVar()
    Pch5[t] = ec.addVar()
    Pdch5[t] = ec.addVar()
    SOC5[t] = ec.addVar()
    xch5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    xdch5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    Pgen4[t] = ec.addVar() #generated energy
    Pgen5[t] = ec.addVar()
    PbuyG1[t] = ec.addVar() #energy bought from grid
    PbuyG2[t] = ec.addVar()
    PbuyG3[t] = ec.addVar()
    PbuyG4[t] = ec.addVar()
    PbuyG5[t] = ec.addVar()
    XbuyG1[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG2[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG3[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG4[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)

```

```

PsellG1[t] = ec.addVar() #energy sold to the grid
PsellG2[t] = ec.addVar()
PsellG3[t] = ec.addVar()
PsellG4[t] = ec.addVar()
PsellG5[t] = ec.addVar()
XsellG1[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG2[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG3[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG4[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)

#P2P sharing variables
PbuyP2P = {}
XbuyP2P = {}
PsellP2P = {}
XsellP2P = {}
for i in range(1, 6):
    PbuyP2P[i] = {}
    XbuyP2P[i] = {}
    for j in range(4, 6):
        PbuyP2P[i][j] = {}
        XbuyP2P[i][j] = {}
        for t in range(1, min + 1):
            PbuyP2P[i][j][t] = ec.addVar()
            XbuyP2P[i][j][t] = ec.addVar(vtype=GRB.BINARY)
for i in range(4, 6):
    PsellP2P[i] = {}
    XsellP2P[i] = {}
    for j in range(1, 6):
        PsellP2P[i][j] = {}
        XsellP2P[i][j] = {}
        for t in range(1, min + 1):
            PsellP2P[i][j][t] = ec.addVar()
            XsellP2P[i][j][t] = ec.addVar(vtype=GRB.BINARY)

#constraints
ec.addConstr(SOC1[min] == SOCmax1)
ec.addConstr(SOC5[min] == SOCmax5)
for t in range(1, min + 1):
    #equation 64
    ec.addConstr(PbuyG1[t] + PbuyP2P[1][4][t] + PbuyP2P[1][5][t] == I1[t] + Pch1[t] + PsellG1[t])
    ec.addConstr(PbuyG2[t] + PbuyP2P[2][4][t] + PbuyP2P[2][5][t] == I2[t] + PsellG2[t])
    ec.addConstr(PbuyG3[t] + PbuyP2P[3][4][t] + PbuyP2P[3][5][t] == I3[t] + PsellG3[t])
    ec.addConstr(pv4[t] + PbuyG4[t] + PbuyP2P[4][5][t] == I4[t] + PsellG4[t] + PsellP2P[4][1][t] + PsellP2P[4][2][t]
    + PsellP2P[4][3][t] + PsellP2P[4][5][t])
    ec.addConstr(pv5[t] + PbuyG5[t] + Pch5[t] + PbuyP2P[5][4][t] == I5[t] + PsellG5[t] + Pch5[t] + PsellP2P[5][1][t]
    + PsellP2P[5][2][t] + PsellP2P[5][3][t] + PsellP2P[5][4][t])
    #equation 65
    ec.addConstr(PbuyG1[t] <= PmaxB*XbuyG1[t])
    ec.addConstr(PbuyG2[t] <= PmaxB*XbuyG2[t])
    ec.addConstr(PbuyG3[t] <= PmaxB*XbuyG3[t])
    ec.addConstr(PbuyG4[t] <= PmaxB*XbuyG4[t])
    ec.addConstr(PbuyG5[t] <= PmaxB*XbuyG5[t])
    #equation 66
    ec.addConstr(PsellG1[t] <= PmaxS*XsellG1[t])
    ec.addConstr(PsellG2[t] <= PmaxS*XsellG2[t])
    ec.addConstr(PsellG3[t] <= PmaxS*XsellG3[t])
    ec.addConstr(PsellG4[t] <= PmaxS*XsellG4[t])
    ec.addConstr(PsellG5[t] <= PmaxS*XsellG5[t])
    #equation 67
    ec.addConstr(XbuyG1[t] + XsellG1[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG2[t] + XsellG2[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG3[t] + XsellG3[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG4[t] + XsellG4[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG5[t] + XsellG5[t] <= 1)
    #
    for i in range(1, 6):
        for j in range(4, 6):
            if (i == j):
                ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] == 0)
            else:
                #dodatno

```

```

ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] == PsellP2P[i][j][t])
#equation 68
ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] <= PmaxB*XbuyP2P[i][j][t])
for i in range(4, 6):
  for j in range(1, 6):
    if (i == j):
      ec.addConstr(PsellP2P[i][j][t] == 0)
    else:
      #equation 69
      ec.addConstr(PsellP2P[i][j][t] <= PmaxS*XsellP2P[i][j][t])
#equation 70
ec.addConstr(XbuyG1[t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyG2[t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyG3[t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyG4[t] + XsellP2P[4][1][t] + XsellP2P[4][2][t] + XsellP2P[4][3][t] + XsellP2P[4][5][t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyG5[t] + XsellP2P[5][1][t] + XsellP2P[5][2][t] + XsellP2P[5][3][t] + XsellP2P[4][5][t] <= 1)
#equation 71
ec.addConstr(XbuyP2P[1][4][t] + XbuyP2P[1][5][t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyP2P[2][4][t] + XbuyP2P[2][5][t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyP2P[3][4][t] + XbuyP2P[3][5][t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyP2P[4][5][t] + PsellG4[t] <= 1)
ec.addConstr(XbuyP2P[5][4][t] + PsellG5[t] <= 1)
#equation 72
ec.addConstr(PbuyP2P[1][4][t] + PbuyP2P[1][5][t] + PbuyP2P[2][4][t] + PbuyP2P[2][5][t] + PbuyP2P[3][4][t] +
PbuyP2P[3][5][t] + PbuyP2P[4][5][t] + PbuyP2P[5][4][t] ==
PsellP2P[4][1][t] + PsellP2P[4][2][t] + PsellP2P[4][3][t] + PsellP2P[4][5][t] + PsellP2P[5][1][t] +
PsellP2P[5][2][t] + PsellP2P[5][3][t] + PsellP2P[5][4][t])
#equation 73
ec.addConstr(XbuyP2P[1][4][t] + XbuyP2P[2][4][t] + XbuyP2P[3][4][t] + XbuyP2P[5][4][t] + XsellP2P[4][1][t] +
XsellP2P[4][2][t] + XsellP2P[4][3][t] + XsellP2P[4][5][t] <= 2)
ec.addConstr(XbuyP2P[1][5][t] + XbuyP2P[2][5][t] + XbuyP2P[3][5][t] + XbuyP2P[4][5][t] + XsellP2P[5][1][t] +
XsellP2P[5][2][t] + XsellP2P[5][3][t] + XsellP2P[5][4][t] <= 2)
#equation 74
ec.addConstr(XbuyP2P[1][4][t] + XbuyP2P[1][5][t] + XsellP2P[4][1][t] + XsellP2P[5][1][t] <= 2)
ec.addConstr(XbuyP2P[2][4][t] + XbuyP2P[2][5][t] + XsellP2P[4][2][t] + XsellP2P[5][2][t] <= 2)
ec.addConstr(XbuyP2P[3][4][t] + XbuyP2P[3][5][t] + XsellP2P[4][3][t] + XsellP2P[5][3][t] <= 2)
ec.addConstr(XbuyP2P[4][5][t] + XsellP2P[5][4][t] <= 2)
ec.addConstr(XbuyP2P[5][4][t] + XsellP2P[4][5][t] <= 2)
#equation 75
ec.addConstr(Pch5[t] <= xch5[t]*PchMax5)
#equation 76
ec.addConstr(Pdch5[t] <= xdch5[t]*PdchMax5)
#equation 77
ec.addConstr(xch5[t] + xdch5[t] <= 1)
#equation 78
ec.addConstr(SOC1[t] == SOC1[t-1] + Pch1[t]*Etach1/4)
ec.addConstr(SOC5[t] == SOC5[t-1] + Pch5[t]*Etach5/4 - Pdch5[t]/(Etadch5*4))
#equation 79
ec.addConstr(PbuyG1[t] >= 0)
ec.addConstr(PbuyG2[t] >= 0)
ec.addConstr(PbuyG3[t] >= 0)
ec.addConstr(PbuyG4[t] >= 0)
ec.addConstr(PbuyG5[t] >= 0)
ec.addConstr(PbuyG1[t] <= PmaxB)
ec.addConstr(PbuyG2[t] <= PmaxB)
ec.addConstr(PbuyG3[t] <= PmaxB)
ec.addConstr(PbuyG4[t] <= PmaxB)
#equation 80
ec.addConstr(PsellG1[t] >= 0)
ec.addConstr(PsellG2[t] >= 0)
ec.addConstr(PsellG3[t] >= 0)
ec.addConstr(PsellG4[t] >= 0)
ec.addConstr(PsellG5[t] >= 0)
ec.addConstr(PsellG1[t] <= PmaxS)
ec.addConstr(PsellG2[t] <= PmaxS)
ec.addConstr(PsellG3[t] <= PmaxS)
ec.addConstr(PsellG4[t] <= PmaxS)
#equation 81
ec.addConstr(Pdch5[t] >= 0)
ec.addConstr(Pdch5[t] <= PdchMax5)
#equation 82

```



```

ec.addConstr(Pch1[t] >= 0)
ec.addConstr(Pch1[t] <= PchMax1)
ec.addConstr(Pch5[t] >= 0)
ec.addConstr(Pch5[t] <= PchMax5)
#equation 83 & 84
for i in range (1,6):
    for j in range (4,6):
        if (i == j):
            ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] == 0)
        else:
            ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] >= 0)
            ec.addConstr(PbuyP2P[i][j][t] <= PmaxB)
for i in range (4,6):
    for j in range (1,6):
        if (i == j):
            ec.addConstr(PsellP2P[i][j][t] == 0)
        else:
            ec.addConstr(PsellP2P[i][j][t] >= 0)
            ec.addConstr(PsellP2P[i][j][t] <= PmaxS)
#equation 85
ec.addConstr(SOC5[t] >= 0)
ec.addConstr(SOC5[t] <= SOCmax5)
ec.addConstr(SOC5[t] <= SOCmax5)
#dodatno
ec.addConstr(PsellP2P[4][1][t] + PsellP2P[4][2][t] + PsellP2P[4][3][t] + PsellP2P[4][5][t] == PbuyP2P[1][4][t] +
PbuyP2P[2][4][t] + PbuyP2P[3][4][t] + PbuyP2P[5][4][t])
ec.addConstr(PsellP2P[5][1][t] + PsellP2P[5][2][t] + PsellP2P[5][3][t] + PsellP2P[5][4][t] == PbuyP2P[1][5][t] +
PbuyP2P[2][5][t] + PbuyP2P[3][5][t] + PbuyP2P[4][5][t])

ec.setObjective(cost(), GRB.MINIMIZE)
ec.setParam('MIPGap', 0.01) # Allow a 1% gap

ec.optimize()

```

Model bez P2P trgovanja energijom

```

from gurobipy import *
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

h = 24 #number of hours in a day
min = 4*h #number of 15 min intervals in a day

#max buy from grid in kW
PmaxB = 22
#max sell to grid in kW
PmaxS = 22

#load curves of energy community members on working days during summer (in kW)
I1 =
[0,0.08636,0.07696,0.06884,.062440,.05804,0.05528,0.0536,0.05244,0.05136,0.05024,0.04924,0.04828,0.0474
4,0.04684,0.04656,0.0466,0.04712,0.048,0.04924,0.05076,0.05264,0.05564,0.06052,0.06824,0.0792,0.09196,0
.10476,0.11568,0.12344,0.12856,0.132,0.13484,0.1378,0.14072,0.1432,0.14484,0.14532,0.14488,0.14376,0.14
232,0.1408,0.13948,0.13852,0.13816,0.13864,0.14008,0.14264,0.14648,0.15152,0.15672,0.16076,0.16232,0.1
6048,0.15608,0.1502,0.144,0.13844,0.1336,0.12936,0.12568,0.12244,0.11964,0.1174,0.11568,0.11464,0.1142
4,0.1146,0.11568,0.1176,0.12032,0.12388,0.12816,0.13324,0.13892,0.14504,0.15148,0.15796,0.1638,0.16828,
0.17064,0.1704,0.16832,0.16528,0.16232,0.16012,0.15844,0.15684,0.1548,0.15192,0.14788,0.14256,0.13568,
0.1272,0.11748,0.10708,0.09656]
I2 =
[0,0.07448,0.07364,0.07284,0.072,0.071,0.07,0.06908,0.0684,0.068,0.06784,0.06772,0.06748,0.067,0.06644,0.
06596,0.06568,0.0658,0.06612,0.06644,0.0666,0.06636,0.06588,0.06532,0.0648,0.0646,0.06536,0.06788,0.07
288,0.08092,0.09164,0.10444,0.11876,0.13396,0.1488,0.16216,0.17276,0.17976,0.18392,0.18632,0.18808,0.1
9004,0.19216,0.194,0.19528,0.19564,0.19528,0.19448,0.19348,0.19232,0.19028,0.18648,0.17996,0.17036,0.1
5932,0.14888,0.14128,0.13812,0.13916,0.14376,0.15116,0.1606,0.17064,0.17972,0.18628,0.18924,0.18948,0.
18832,0.18716,0.18696,0.18716,0.18692,0.18536,0.18172,0.17568,0.16708,0.15568,0.14172,0.12716,0.11424,
0.10528,0.10184,0.10228,0.1042,0.10528,0.10368,0.09996,0.09532,0.09088,0.08756,0.0852,0.08344,0.08188,
0.08024,0.07856,0.07696,0.0756]
I3 =
[0,0.06736,0.06116,0.0546,0.04936,0.04672,0.04596,0.04588,0.04532,0.04392,0.04428,0.05,0.06448,0.08964,
0.12104,0.15264,0.17832,0.19368,0.20056,0.20236,0.20252,0.20376,0.20604,0.20856,0.21056,0.21148,0.2115
2,0.21108,0.21056,0.21028,0.21028,0.2104,0.21056,0.21076,0.21076,0.2104,0.20956,0.20804,0.20576,0.2026,
0.19848,0.1934,0.1878,0.18228,0.17732,0.17332,0.16968,0.16556,0.1602,0.153,0.14464,0.136,0.12796,0.1213

```

```

2,0.11656,0.11396,0.11384,0.11628,0.12008,0.1238,0.12596,0.12548,0.123,0.11948,0.11588,0.11296,0.11088,
0.10956,0.1088,0.10856,0.1082,0.10716,0.1048,0.10068,0.09524,0.08904,0.0826,0.07656,0.07116,0.06672,0.0
6348,0.0616,0.06064,0.06008,0.05944,0.05832,0.05696,0.05584,0.0554,0.05604,0.05764,0.06016,0.06348,0.0
6728,0.0706,0.0724,0.07152]
I4 =
[0,0.06616,0.06316,0.06052,0.05836,0.05668,0.0554,0.05444,0.05372,0.05316,0.05268,0.05228,0.05188,0.051
44,0.05096,0.05048,0.05,0.0496,0.04936,0.04948,0.05,0.05116,0.05292,0.05532,0.05836,0.06216,0.06744,0.0
7484,0.0852,0.09892,0.11496,0.13184,0.1482,0.16264,0.17388,0.1806,0.18156,0.17608,0.16612,0.15412,0.14
264,0.1338,0.12816,0.1258,0.12692,0.13116,0.1366,0.14092,0.14172,0.1374,0.1294,0.11992,0.11116,0.10484,
0.10084,0.09852,0.09724,0.09656,0.0962,0.09616,0.09632,0.09664,0.097,0.09724,0.09724,0.097,0.09684,0.09
708,0.0982,0.10056,0.1048,0.11152,0.12136,0.1344,0.14892,0.16264,0.1732,0.17892,0.1798,0.17648,0.16952,
0.1596,0.14808,0.1364,0.12596,0.11792,0.11188,0.10708,0.1028,0.09848,0.09408,0.0896,0.0852,0.08096,0.07
692,0.07308,0.06948]
I5 =
[0,0.02356,0.02204,0.02152,0.0208,0.02048,0.02044,0.0206,0.0208,0.02092,0.021,0.02096,0.0208,0.0206,0.02
04,0.02044,0.0208,0.02156,0.0224,0.02292,0.02268,0.0216,0.02068,0.02124,0.0246,0.03192,0.04384,0.06076,
0.0832,0.11128,0.14372,0.17904,0.2156,0.25168,0.28472,0.31208,0.33096,0.33972,0.34088,0.338,0.33472,0.3
3376,0.33464,0.33604,0.33664,0.33528,0.33176,0.32592,0.31772,0.30712,0.29444,0.2802,0.26476,0.249,0.23
524,0.22636,0.22504,0.23272,0.24528,0.25716,0.26288,0.25836,0.24568,0.22836,0.20992,0.19312,0.1776,0.1
6216,0.1456,0.12732,0.10844,0.09064,0.07564,0.06464,0.05696,0.05152,0.04728,0.04332,0.03964,0.03648,0.
03404,0.03248,0.03156,0.03092,0.03024,0.02932,0.02824,0.0272,0.02648,0.0262,0.0262,0.02636,0.02648,0.0
2636,0.026,0.0254,0.0246]

#pv production
pv = [0,0,0,0,0,0.03, 0.09, 0.35, 0.57, 0.72, 0.75, 0.86, 0.92, 0.8, 0.76, 0.58, 0.3, 0.1, 0.01, 0, 0, 0, 0]
pv4 = {}
pv5 = {}
pv4[0] = 0
pv5[0] = 0
k = 1
for i in range(h):
    for j in range(1,5):
        pv4[k] = pv[i]*7
        pv5[k] = pv[i]*3
        k = k + 1

#electricity price in â,-/MWh
#june 1st 2024
pr =
[83.26,79.79,70.71,77.42,63.42,63.78,68.2,66.1,77.69,65.69,51.04,44.89,22.93,8.07,2.63,5.16,14.11,58.74,84.7
1,112.74,126.39,116.22,86.59,81.69]
pB = {}
pS = {}
pP2P = {}
k = 1
pB[0] = 0
p_trans = 0.011945
p_dist = 0.029199
p_supply = 0.982
p_meas = 1.54
p_renew = 0.013239
vat = 1.13

#electricity price for 15-minute intervals in â,-/kWh/4
for i in range(h):
    for j in range(1,5):
        pB[k] = pr[i]/(1000)
        k = k + 1
for i in range(min + 1):
    pS[i] = 0.9*pB[i]
    pP2P[i] = (pS[i]+pB[i])/2

def cost():
    sum = 0
    for t in range(1, min + 1):
        sum = sum + vat*(pB[t] + p_trans + p_dist + p_supply + p_meas + p_renew)*(PbuyG1[t] + PbuyG2[t] +
PbuyG3[t] + PbuyG4[t] + PbuyG5[t])/4 - pS[t]*(PsellG1[t] + PsellG2[t] + PsellG3[t] + PsellG4[t] + PsellG5[t] +
Pdch5[t])
    return sum

ec = Model("Energy Community")

```

```

#electrical vehicle od consumer 1
PchMax1 = 11
Etach1 = 58/62 #Eneto/Ebruto
SOCmax1 = 62 #kWh

#battery of prosumer 5
PchMax5 = 9 #kW
PdchMax5 = 10 #kW
Etach5 = .9
Etadch5 = .95
SOCmax5 = 5.12 #kWh

#variables
Pch1 = {}
SOC1 = {}
xch1 = {}
Pch5 = {}
Pdch5 = {}
SOC5 = {}
xch5 = {}
xdch5 = {}
Pgen4 = {}
Pgen5 = {}
PbuyG1 = {}
PbuyG2 = {}
PbuyG3 = {}
PbuyG4 = {}
PbuyG5 = {}
XbuyG1 = {}
XbuyG2 = {}
XbuyG3 = {}
XbuyG4 = {}
XbuyG5 = {}
PsellG1 = {}
PsellG2 = {}
PsellG3 = {}
PsellG4 = {}
PsellG5 = {}
XsellG1 = {}
XsellG2 = {}
XsellG3 = {}
XsellG4 = {}
XsellG5 = {}

#initial value
SOC1[0] = 30
SOC5[0] = 0

for t in range(1,min + 1):
    Pch1[t] = ec.addVar()
    SOC1[t] = ec.addVar()
    Pch5[t] = ec.addVar()
    Pdch5[t] = ec.addVar()
    SOC5[t] = ec.addVar()
    xch5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    xdch5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    Pgen4[t] = ec.addVar() #generated energy
    Pgen5[t] = ec.addVar()
    PbuyG1[t] = ec.addVar() #energy bought from grid
    PbuyG2[t] = ec.addVar()
    PbuyG3[t] = ec.addVar()
    PbuyG4[t] = ec.addVar()
    PbuyG5[t] = ec.addVar()
    XbuyG1[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG2[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG3[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG4[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    XbuyG5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
    PsellG1[t] = ec.addVar() #energy sold to the grid
    PsellG2[t] = ec.addVar()
    PsellG3[t] = ec.addVar()
    PsellG4[t] = ec.addVar()
    PsellG5[t] = ec.addVar()

```

```

XsellG1[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG2[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG3[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG4[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)
XsellG5[t] = ec.addVar(vtype = GRB.BINARY)

#constraints
ec.addConstr(SOC1[min] == SOCmax1)
ec.addConstr(SOC5[min] == SOCmax5)
for t in range(1, min + 1):
    #equation 64
    ec.addConstr(PbuyG1[t] == I1[t] + Pch1[t] + PsellG1[t])
    ec.addConstr(PbuyG2[t] == I2[t] + PsellG2[t])
    ec.addConstr(PbuyG3[t] == I3[t] + PsellG3[t])
    ec.addConstr(pv4[t] + PbuyG4[t] == I4[t] + PsellG4[t])
    ec.addConstr(pv5[t] + PbuyG5[t] + Pdch5[t] == I5[t] + PsellG5[t] + Pch5[t])
    #equation 65
    ec.addConstr(PbuyG1[t] <= PmaxB*XbuyG1[t])
    ec.addConstr(PbuyG2[t] <= PmaxB*XbuyG2[t])
    ec.addConstr(PbuyG3[t] <= PmaxB*XbuyG3[t])
    ec.addConstr(PbuyG4[t] <= PmaxB*XbuyG4[t])
    ec.addConstr(PbuyG5[t] <= PmaxB*XbuyG5[t])
    #equation 66
    ec.addConstr(PsellG1[t] <= PmaxS*XsellG1[t])
    ec.addConstr(PsellG2[t] <= PmaxS*XsellG2[t])
    ec.addConstr(PsellG3[t] <= PmaxS*XsellG3[t])
    ec.addConstr(PsellG4[t] <= PmaxS*XsellG4[t])
    ec.addConstr(PsellG5[t] <= PmaxS*XsellG5[t])
    #equation 67
    ec.addConstr(XbuyG1[t] + XsellG1[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG2[t] + XsellG2[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG3[t] + XsellG3[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG4[t] + XsellG4[t] <= 1)
    ec.addConstr(XbuyG5[t] + XsellG5[t] <= 1)
    ec.addConstr(Pch5[t] <= xch5[t]*PchMax5)
    #equation 76
    ec.addConstr(Pdch5[t] <= xdch5[t]*PdchMax5)
    #equation 77
    ec.addConstr(xch5[t] + xdch5[t] <= 1)
    #equation 78
    ec.addConstr(SOC1[t] == SOC1[t-1] + Pch1[t]*Etach1/4)
    ec.addConstr(SOC5[t] == SOC5[t-1] + Pch5[t]*Etach5/4 - Pdch5[t]/(Etadch5*4))
    #equation 79
    ec.addConstr(PbuyG1[t] >= 0)
    ec.addConstr(PbuyG2[t] >= 0)
    ec.addConstr(PbuyG3[t] >= 0)
    ec.addConstr(PbuyG4[t] >= 0)
    ec.addConstr(PbuyG5[t] >= 0)
    ec.addConstr(PbuyG1[t] <= PmaxB)
    ec.addConstr(PbuyG2[t] <= PmaxB)
    ec.addConstr(PbuyG3[t] <= PmaxB)
    ec.addConstr(PbuyG4[t] <= PmaxB)
    #equation 80
    ec.addConstr(PsellG1[t] >= 0)
    ec.addConstr(PsellG2[t] >= 0)
    ec.addConstr(PsellG3[t] >= 0)
    ec.addConstr(PsellG4[t] >= 0)
    ec.addConstr(PsellG5[t] >= 0)
    ec.addConstr(PsellG1[t] <= PmaxS)
    ec.addConstr(PsellG2[t] <= PmaxS)
    ec.addConstr(PsellG3[t] <= PmaxS)
    ec.addConstr(PsellG4[t] <= PmaxS)
    #equation 81
    ec.addConstr(Pdch5[t] >= 0)
    ec.addConstr(Pdch5[t] <= PdchMax5)
    #equation 82
    ec.addConstr(Pch1[t] >= 0)
    ec.addConstr(Pch1[t] <= PchMax1)
    ec.addConstr(Pch5[t] >= 0)
    ec.addConstr(Pch5[t] <= PchMax5)
    #equation 85

```

```
ec.addConstr(SOC5[t] >= 0)
ec.addConstr(SOC5[t] <= SOCmax5)
    ec.setObjective(cost(), GRB.MINIMIZE)
ec.optimize()
```