

# Unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

Mišljenović, Nemanja

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:822931>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Nemanja Mišljenović

**UNAPRIJEĐENI MODEL DVOSLOJNOG  
ADAPTIVNOG SUSTAVA ZA  
KRATKOROČNO UPRAVLJANJE  
ENERGIJOM UNUTAR ENERGETSKE  
ZAJEDNICE**

Doktorski rad

Osijek, 2024.

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za elektroenergetiku  
Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek  
Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Doktorska disertacija izrađena je u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost  
„Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca“  
(broj projekta: UIP-2020-02-5796)

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

Doktorska disertacija ima 248 stranica.

Doktorska disertacija broj: 98

# Sadržaj

	Stranica
1. Uvod . . . . .	1
1.1. Temeljni cilj, plan i metodologija istraživanja . . . . .	3
1.1.1. Temeljni cilj istraživanja . . . . .	3
1.1.2. Plan istraživanja . . . . .	4
1.1.3. Metodologija istraživanja. . . . .	5
1.2. Organizacija i struktura doktorske disertacije . . . . .	6
2. Pregled literature. . . . .	9
2.1. Integracija obnovljivih izvora energije i električna vozila . . .	10
2.2. Sustav upravljanje energijom aktivnog kupca . . . . .	12
2.3. Tržište električne energije. . . . .	19
2.4. Predviđanje ulaznih podataka. . . . .	20
2.5. Modeliranje baterijskog sustava za pohranu električne ener- gije. . . . .	22
2.6. Upravljanje električnom energijom unutar zgrade . . . . .	25
2.7. Upravljanje električnom energijom unutar energetske zajed- nice . . . . .	28
2.8. Znanstveni doprinosi . . . . .	32
3. Energetske zajednice . . . . .	33
4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. . . . .	38
4.1. Optimizacijski pristup primijenjen u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unu- tar energetske zajednice . . . . .	44

4.2.	Optimizacijski pristup primijenjen u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice . . . . .	47
4.3.	Optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge u komercijalnim zgradama . . .	50
5.	Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice . . . . .	56
5.1.	Funkcija cilja višeg sloja . . . . .	56
5.1.1.	Funkcija cilja višeg sloja (opcionalno) . . . . .	60
5.2.	Funkcija cilja nižeg sloja . . . . .	62
5.3.	Modeli upravljivih trošila električne energije . . . . .	64
5.3.1.	Trošila s mogućnošću pomjeranja profila potrošnje električne energije . . . . .	67
5.3.2.	Trošila s mogućnošću dinamičkog upravljanja potrošnjom električne energije . . . . .	69
5.3.3.	Trošila s mogućnošću statičkog upravljanja potrošnjom električne energije . . . . .	72
5.4.	Model mreže i lokalnog tržišta električne energije . . . . .	74
5.4.1.	Cijene električne energije. . . . .	77
5.5.	Model fotonaponskog sustava . . . . .	81
5.6.	Model baterijskog sustava za pohranu električne energije . .	85
5.7.	Model baterije električnog vozila . . . . .	91
5.8.	Degradacija baterije . . . . .	96
5.9.	Model energetskog pretvarača. . . . .	99
6.	Rezultati anketnog upitnika istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila . . . . .	108
6.1.	Opći podaci . . . . .	108
6.2.	Tip stambene jedinice - obiteljska kuća . . . . .	109
6.2.1.	Upravljanje električnom energijom u kućanstvu . . . . .	111
6.2.2.	Osiguravanje ušteda i povećanje udobnosti u kućanstvu. . . . .	112
6.3.	Tip stambene jedinice - stambena zgrada . . . . .	112

<b>7.</b>	<b>Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>7.1.</b>	<b>Opis ulaznih podataka . . . . .</b>	<b>116</b>
7.1.1.	Tehničke karakteristike mreže . . . . .	117
7.1.2.	Tehničke karakteristike fotonaponskog sustava. . . . .	118
7.1.3.	Tehničke karakteristike baterijskog sustava za pohranu električne energije . . . . .	120
7.1.4.	Tehničke karakteristike upravljivih trošila električne energije. . .	133
7.1.5.	Profili intenziteta sunčevog zračenja, potrošnje električne energije i vanjske temperature . . . . .	137
<b>7.2.</b>	<b>Određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge u komercijalnim zgradama . . . . .</b>	<b>141</b>
<b>7.3.</b>	<b>Rezultati modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. . . . .</b>	<b>150</b>
7.3.1.	Rezultati optimizacijskog modela u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom . . . . .	151
7.3.2.	Utjecaj virtualnog troška degradacije baterija električnih vozila .	161
7.3.3.	Osiguravanje fleksibilnosti u radu energetske zajednice . . . . .	163
7.3.4.	Rezultati optimizacijskog modela u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom . . . . .	165
7.3.5.	Usporedba rezultata optimizacijskog modela u višem i nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom . . . . .	168
7.3.6.	Rezultati optimizacijskog modela u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom - utjecaj prisutnosti električnih vozila . . . . .	175
<b>8.</b>	<b>Zaključak. . . . .</b>	<b>179</b>
	<b>Literatura. . . . .</b>	<b>182</b>
	<b>Popis slika . . . . .</b>	<b>197</b>
	<b>Popis tablica . . . . .</b>	<b>203</b>
	<b>Popis kratica . . . . .</b>	<b>206</b>
	<b>Prilozi . . . . .</b>	<b>208</b>

Sažetak . . . . .	244
Abstract . . . . .	246
Životopis . . . . .	248

# 1. Uvod

U cilju postizanja smanjenja emisija stakleničkih plinova neophodna je integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav i zamjena konvencionalnih vozila s energetski učinkovitijim vozilima. Nadalje, provedena istraživanja su pokazala da se najmanji gubici postižu smještajem izvora električne energije u blizini mjesta potrošnje iz čega proizlazi da je u distribucijsku mrežu optimalno smjestiti obnovljive izvore energije. Ovakav pristup svakog pasivnog kupca električne energije koji je kupovao električnu energiju od strane opskrbljivača, uz integraciju obnovljivih izvora energije, pretvara u aktivnog kupca električne energije koji, osim što kupuje električnu energiju iz mreže, može prodavati električnu energiju u mrežu. S obzirom na gore navedeno, dolazi do promjena tokova snaga u elektroenergetskom sustavu što predstavlja probleme prilikom planiranja i vođenja pogona te parametriranja zaštite. S druge strane, aktivnom kupcu omogućeno je postizanje ušteda optimalnim upravljanjem energijom. U cilju postizanje većih ušteda te smanjenju povratnog djelovanja aktivnih kupaca na distribucijsku mrežu, primjenjuje se koncept napredne elektroenergetske mreže te se istražuje djelovanje različitih organizacijskih struktura aktivnih kupaca. Neke od organizacijskih struktura su smještaj aktivnih kupaca u mikromrežu ili energetska zajednicu te agregiranje obnovljivih izvora i električnih vozila od strane agregatora. Izborom odgovarajuće organizacijske strukture nastoji se osigurati povećanje ukupne društvene dobrobiti svih njenih članova. Istraživači se slažu da energetske zajednice posjeduju potencijal za integraciju obnovljivih izvora energije i električnih vozila u elektroenergetski sustav. Članovi energetske zajednice imaju nekoliko mogućnosti s obzirom na zadovoljavanje svojih potreba za električnom energijom. U cilju zadovoljavanja potreba članova energetske zajednice za električnom energijom uz postizanje maksimalne ukupne društvene dobrobiti i zadovoljavanja ograničenja, neophodno je osigurati sustav upravljanja energijom. Glavni dio sustava upravljanja energijom je optimizacijski model koji se sastoji od modela pojedinačnih elemenata energetske zajednice. Točnost rješenja optimizacijskog modela ovisi će o preciznosti modeliranja elemenata energetske zajednice, točnosti predviđanja ulaznih podataka i opti-



mizacijskom okviru. Optimizacijski pristup i okvir najčešće primjenjivani od strane autora optimizacijskih modela su deterministički jednoslojni s horizontom planiranja od 24 h u budućnost s vremenskim korakom od 1 h. Nedostatak vremenskog koraka od 1 h je taj što su iznosi varijabli odluka konstantni u tom koraku što je teško primjenjivo u stvarnom vremenu. Pozitivno je promatrati horizont planiranja što dalje u budućnost zbog postizanja kvalitetnijih rezultata, dok je nedostatak horizonta planiranja od 24 h u budućnost taj da pogreška prognoze ulaznih podataka raste s vremenom te je potrebna korekcija prognoze. Kao rješenje problema proizlazi primjena višeslojnog sustava upravljanja energijom, uz primjenu različitih optimizacijskih okvira, na pristupu pomičnog horizonta. Tako u višem sloju se osigurava dulji vremenski horizont planiranja uz dulji vremenski korak, a u nižem sloju se osigurava vremenski horizont planiranja jednak vremenskom koraku iz višeg sloja. Vremenski korak u nižem sloju mora osigurati promjenjivost iznosa varijabli odluka približan gotovo stvarnom vremenu i tako se odabrati. Nadalje, prognozirani ulazni podaci sadrže određenom pogrešku što u slučaju primjene determinističkog pristupa rezultira s pogreškom u rješenjima optimizacijskog modela, a u nekim slučajevima moguća je i neizvedivost modela, s obzirom na pogrešku prognoze, u stvarnom vremenu izvođenja. Rješenje ovoga problema je primjena stohastičkog pristupa u višem sloju koji u obzir uzima nesigurnost prognoze ulaznih podataka i kao rješenja daje skupove podataka s obzirom na mogući ishod ulaznih podataka. Na ovaj način se kontrolira i izvedivost modela s obzirom na pogrešku prognoze i mogući ishod. Nadalje, u znanstvenoj literaturi autori optimizacijskih modela većinom koriste pojednostavljene modele elemenata koji uzrokuju pogrešku u rješenjima optimizacijskog modela. U cilju postizanja veće razine točnosti rezultata optimizacije neophodno je elemente energetske zajednice modelirati s dovoljnom točnošću u usporedbi s mjerenim vrijednostima na stvarnim elementima. Nadalje, prilikom integracije električnih vozila ostaje prostora da se osigura vlasnicima električnih vozila punjenje električnih vozila na parkingu komercijalnih zgrada uz osiguranje društvene dobrobiti. Tako se ovdje otvara mogućnost za određivanjem optimalnih cijena za primjenu tzv. *Vehicle-to-Grid* (V2G) usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i mreže. Iz V2G usluge, koja predstavlja osnovu za razmjenu električne energije između električnih vozila i mreže, proizlaze usluge kao što su *Vehicle-to-Building* (V2B), *Prosumer-to-Vehicle* (P2V) te *Vehicle-to-Home* (V2H) koje pobliže opisuju razmjenu električne energije između vozila i druge strane. Nadalje, istraživanje se temelji na razvoju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar

energetske zajednice uz integraciju unaprijeđenih modela elemenata energetske zajednice i električnih vozila čime se povećava točnost rješenja uz osiguranje adekvatne računalne kompleksnosti modela. Model dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice realiziran u višem sloju stohastičkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i proširenog matematičkog programiranja s ciljem minimizacije društvenog troška, a u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i proširenog matematičkog programiranja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu. Optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge, za komercijalne zgrade, realiziran je pomoću MATLAB-a i GAMS-a. Model baterijskog sustava pohrane energije koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetske pretvarač, energetske model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije, primijenjen na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila, unaprijeđen je s energetske modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju.

### 1.1. Temeljni cilj, plan i metodologija istraživanja

#### 1.1.1. Temeljni cilj istraživanja

Istraživačka zajednica ulaže napore u razvoj organizacijskih struktura, sustava upravljanja energijom aktivnih kupaca i integraciju električnih vozila. Temeljni cilj istraživanja je razvoj sustava upravljanja energijom energetske zajednice za kratkoročno planiranje pogona uz adaptivnu prilagodbu sustava na promjene u ulaznim podacima u cilju postizanja učinkovitijeg planiranja pogona energetske zajednice. Prilikom razvoja sustava upravljanja energijom energetske zajednice, neophodno je sve modele elementa energetske zajednice modelirati s dovoljnom točnošću, u usporedbi s mjerenim vrijednostima na stvarnim elementima, što često i nije slučaj kod autora znanstvenih radova koji razvijaju sustave upravljanja energijom. Nadalje, potrebno je unaprijediti rješenje problema optimalnog održavanja razine napunjenosti baterija električnih vozila u cilju maksimizacije društvene dobrobiti. Rješenje problema optimalnog održavanja razine napunjenosti baterija električnih vozila je određivanje optimalnih cijena punjenja i pražnjenja električnih vozila (primjena V2B usluge) na parkingu komercijalnih zgrada. Shodno gore navedenom, ovim istraživanjem se

nastoje unaprijediti modeli elemenata energetske zajednice u cilju dobivanja kvalitetnijih rezultata optimizacijskog modela te razvoj optimizacijskog algoritma za određivanje cijena za primjenu V2B usluge. Predloženo rješenje problema je razvoj modela dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice realiziran u višem sloju stohastičkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i proširenog matematičkog programiranja s ciljem minimizacije društvenog troška, a u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i proširenog matematičkog programiranja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu. U cilju određivanja cijena za primjenu V2B usluge predložen je optimizacijski algoritam, za komercijalne zgrade, realiziran pomoću MATLAB-a i GAMS-a. Model baterijskog sustava pohrane energije koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije, primijenjen je na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila te je unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju. Predložen model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenim modelima elemenata energetske zajednice omogućuje provedbu analize za različita pogonska stanja te analize osjetljivosti vrijednosti funkcije cilja s obzirom na članove unutar funkcije cilja i s obzirom na promjene u ulaznim podacima (dostupnost električnih vozila na punionici).

### 1.1.2. Plan istraživanja

Istraživanje u sklopu izrade ovog doktorskog rada planirano je u sljedećim koracima:

- Istraživanje relevantne znanstvene literature iz područja razvoja sustava upravljanja energijom energetske zajednice za kratkoročno planiranje pogona uz adaptivnu prilagodbu sustava na promjene u ulaznim podacima te detektiranju zahtjeva za sustav;
- Istraživanje relevantne znanstvene literature iz područja integracije električnih vozila i primjene V2G usluge u cilju optimalnog održavanja stanja napunjenosti baterije električnih vozila;
- Istraživanje relevantne znanstvene literature iz područja modeliranja baterijskog sus-

tava pohrane energije;

- Izložiti rješenje problema razvoja sustava upravljanja energijom energetske zajednice za kratkoročno planiranje pogona uz adaptivnu prilagodbu sustava na promjene u ulaznim podacima;
- Izložiti rješenje problema integracije električnih vozila i primjene V2G usluge u cilju optimalnog održavanja stanja napunjenosti baterije električnih vozila;
- Izložiti unaprijeđeni model baterijskog sustava pohrane energije;
- Napisati programski kod optimizacijskog modela sustava upravljanja energijom energetske zajednice za kratkoročno planiranje pogona uz adaptivnu prilagodbu sustava na promjene u ulaznim podacima;
- Napisati programski kod za određivanje optimalnih cijena električne energije za primjenu V2B usluge u cilju optimalnog održavanja stanja napunjenosti baterije električnih vozila;
- Analizirati svojstva modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenim modelima elemenata energetske zajednice u različitim pogonskim stanjima te provesti analizu osjetljivosti vrijednosti funkcije cilja s obzirom na članove unutar funkcije cilja i s obzirom na promjene u ulaznim podacima.

### 1.1.3. Metodologija istraživanja

Metodološki pristup u izradi ovog doktorskog rada je sljedeći:

- Definiranje problema razvoja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenim modelima elemenata energetske zajednice;
- Razvoj predloženog optimizacijskog modela u višem sloju stohastičkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i primjenom proširenoga matematičkog programiranja s ciljem minimizacije društvenog troška u GAMS-u;

- Razvoj predloženog optimizacijskog modela u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i primjenom proširenoga matematičkog programiranja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu pomoću MATLAB-a i GAMS-a;
- Razvoj optimizacijskog algoritma za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge, za komercijalne zgrade, pomoću MATLAB-a i GAMS-a;
- Analiza kvalitete predstavljenog dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenim modelima elemenata energetske zajednice u različitim pogonskim stanjima te provođenje analize osjetljivosti vrijednosti funkcije cilja s obzirom na članove unutar funkcije cilja i s obzirom na promjene u ulaznim podacima.

## 1.2. Organizacija i struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija sastoji se od 8 poglavlja:

1. **poglavlje** daje motivaciju i uvod u područje istraživanja. Naglasak se stavlja na energetske zajednice, pristup razvoju sustava upravljanja energijom, razvoj elemenata te primjenjivane optimizacijske metode i algoritme. Nadalje, dan je temeljni cilj, plan i metodologija istraživanja.
2. **poglavlje** daje pregled globalnih ciljeva koji se žele dostići, prednosti i nedostatke te rješenja za integraciju obnovljivih izvora energije i električnih vozila. Nadalje, dan je pregled znanstvene literature u području razvoja sustava upravljanja energijom, tržišta električne energije i predviđanja ulaznih podataka. Važan naglasak se stavlja na pregled znanstvene literature u području modeliranja baterijskog sustava za pohranu energije te upravljanja električnom energijom unutar zgrade i energetske zajednice jer iz navedenih područja proizlaze znanstveni doprinosi ove disertacije koji su na kraju poglavlja predstavljeni.
3. **poglavlje** daje detaljan opis i važnost energetskih zajednica oslanjajući se na odredbe Europske unije o uređenju energetskog tržišta i okvire za nove energetske inicijative te

Zakon o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj.

4. **poglavlje** daje detaljno opisan predložen dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Kako je predloženi sustav upravljanja energijom dvoslojni, detaljno je opisan optimizacijski pristup primijenjen u višem i nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Nadalje, detaljno je opisan predloženi optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge u komercijalnim zgradama što je, uz prethodno predložen sustav upravljanja energijom, jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije.
5. **poglavlje** prikazuje matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Definirana je funkcija cilja višeg i nižeg sloja, a nakon toga su detaljno definirani modeli upravljivih trošila električne energije, model mreže i lokalnog tržišta električne energije, model fotonaponskog sustava te modeli baterijskog sustava za pohranu energije i baterije električnog vozila uz implementaciju degradacije baterije i efikasnosti pretvarača energetske elektronike ovisne o opterećenju.
6. **poglavlje** prikazuje rezultate anketnog upitnika istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila koji su korišteni prilikom primjene modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.
7. **poglavlje** prikazuje moguću primjenu modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Detaljno je opisana energetska zajednica za primjenu modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Dani su rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge, rezultati dobiveni optimizacijskim modelom u višem i nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom te su međusobno uspoređeni. Nadalje, ispitan je utjecaj virtualnog troška degradacije baterija električnih vozila na vrijednost funkcije cilja, mogućnost osiguravanja fleksibilnosti u radu energetske zajednice te izvedivost optimizacijskog modela u nižem sloju s obzirom na promijenjen broj priključenih električnih vozila na punionicama zgrada unutar energetske zajednice.

- 8. poglavlje** daje zaključak disertacije na osnovu razvijenog i primijenjenog optimizacijskog algoritma za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

## 2. Pregled literature

U cilju zadovoljavanja potreba gospodarstva i poboljšanja životnog standarda sve veće količine električne energije je potrebno proizvesti, čime se povećava štetan utjecaj na okoliš. Međunarodnim sporazumima se pokušava riješiti problem štetnog utjecaja na okoliš, počevši od Kyoto protokola iz 1997. koji ima za cilj ograničavanje i smanjenje stakleničkih plinova (engl. *Greenhouse gas emissions*) do Pariškog sporazuma iz 2015. koji ima za cilj ograničiti porast globalne prosječne temperature znatno ispod 2°C u odnosu na predindustrijske razine [1,2]. Europska komisija prati međunarodne sporazume te nastoji kroz klimatski i energetske okvir do 2030. (engl. *The 2030 climate and energy framework*) smanjiti emisije stakleničkih plinova za 40% u usporedbi s 1990. godinom, povećati potrošnju energije iz obnovljivih izvora energije (engl. *Renewable Energy Sources - RES*) za najmanje 27% te poboljšati energetske učinkovitost, što su samo određeni ciljevi iz okvira [3].

Uz već spomenutu proizvodnju električne energije, industrija i promet, u značajnoj mjeri, dovode do emisija  $CO_2$  prema [4]. Prema tome, smanjenje emisija stakleničkih plinova mora se osigurati u svim sektorima od proizvodnje električne energije, kućanstava, industrije, komercijalnih i stambenih zgrada te prometa. Nadalje, prema dugoročnoj strategiji do 2050. (engl. *2050 long-term strategy*), Europska komisija ima za cilj postići nultu emisiju stakleničkih plinova te postati prvi svjetski klimatski neutralan kontinent [5]. Ovaj je cilj u središtu Europskog zelenog plana i pravno je obvezujući cilj zbog Europskog zakona o klimi.

S obzirom na navedeno, potiče se ulaganje u obnovljive izvore energije, električna vozila (engl. *Electric Vehicle - EV*), hibridna vozila (engl. *Hybrid Vehicle - HEV*) te se uvodi niz mjera pod nazivom „Paket čiste energije za sve Europljane“ (*Clean energy package for all Europeans*) [6]. Glavne direktive i uredbe koje proizlaze iz paketa su energetska svojstva zgrada (engl. *Energy performance in buildings*) [7], obnovljivi izvori (engl. *Renewable energy*) [8], energetska učinkovitost (engl. *Energy efficiency*) [9], regulacija upravljanja (engl. *Governance regulation*) [10], dizajn tržišta električne energije (engl. *Electricity market design*) [11–13] te snažnija uloga Agencije Europske unije za suradnju energetske regulatora



(engl. *European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators - ACER*) [14, 15]. Rezultati su vidljivi u pogledu integracije obnovljivih izvora energije te prijelazu na električna vozila [16, 17].

## 2.1. Integracija obnovljivih izvora energije i električna vozila

Integracijom obnovljivih izvora energije dosad pasivni kupci električne energije postaju aktivni kupci (engl. *prosumer*) električne energije koji, osim što mogu kupovati električnu energiju iz mreže, mogu skladištiti i prodavati vlastitu proizvedenu električnu energiju u mrežu te pružati određene dodatne usluge sustavu [18, 19]. Prema [20], sektor proizvodnje električne energije pridonosi 40 % emisiji stakleničkih plinova, dok je drugi sektor po značaju transportni sektor koji pridonosi 31 % emisiji stakleničkih plinova.

Istraživanja su pokazala da je optimalno smjestiti distribuiranu proizvodnju električne energije (engl. *Distributed Generation - DG*) što je bliže moguće potrošnji električne energije. Tako se smanjuju gubici prilikom prijenosa električne energije, a time i ukupni gubici u mreži jer se proizvedena električna energija troši na mjestu proizvodnje. Trenutak kada su ukupni gubici u mreži najmanjeg iznosa je kada je proizvodnja, u distributivnom dijelu mreže, jednaka potrošnji električne energije. Problemi koji nastaju prilikom integracije distribuirane proizvodnje su povećanje iznosa napona na mjestu zajedničkog spoja s distribucijskom mrežom i mogućnost promjene tokova snaga prema distribucijskoj mreži, posebno u slučaju minimalnih opterećenja. U slučaju ako je proizvodnja električne energije viša od potrošnje električne energije, prvo će doći do povećanja napona na mjestu zajedničkog spoja, a zatim (ako se proizvodnja nastavi povećavati) i do promjene smjera tokova snaga, što može uzrokovati višestruke problema u distribucijskoj mreži. S promjenom smjera tokova snaga (zbog znatno veće proizvodnje od potrošnje električne energije) značajno se povećavaju gubici jer su elementi distribucijske mreže značajno opterećeni ili čak preopterećeni. Također, distribuirana proizvodnja utječe na kvalitetu električne energije i na struje kratkog spoja, iz čega proizlazi da se zaštita mora prilagoditi novonastaloj situaciji odnosno integriranoj distributivnoj proizvodnji koja ima utjecaj na promjenu struje kvara u distribucijskoj mreži. [21–25]

Kako bi se postigli ciljevi smanjenja ukupne količine stakleničkih plinova, neophodno je uz prelazak na obnovljive izvore električne energije, u transportni sektor uvesti električna vozila. Upotrebom električnih vozila, umjesto vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem,

utjecalo bi se na ukupno smanjenje stakleničkih plinova i povećanje efikasnosti samih vozila. Nadalje, osim dobrih strana električnih vozila javlja se i potreba za kontroliranim punjenjem električnih vozila jer zbog snage punjenja, kapaciteta baterije i količine električnih vozila integriranih u mrežu mogu nastati problemi. Problemi koji se javljaju prilikom nekontroliranog punjenja električnih vozila su varijacije napona, preopterećenja elemenata mreže, narušavanje kvalitete električne energije, potrebna za rezervom snage i/ili energijom uravnoteženje te na kraju i mogućnost ozbiljnog povratnog djelovanja na cijeli elektroenergetski sustav. Kako bi se gore navedeni problemi ublažili ili u potpunosti eliminirali, neophodno je osigurati kontrolirano punjenje električnih vozila. [26] Autori u [27] prikazali su dobrobiti primjene određenih metoda održavanja stanja napunjenosti baterije električnog vozila te su se složili da tzv. V2G usluga, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i mreže posjeduje potencijal za smanjenje troška električne energije, osigurava rezervno napajanje, smanjenje ugljični otisak (zgrade) omogućavanjem integracije obnovljivih izvora energije.

Kako obnovljivi izvori energije i električna vozila posjeduju potencijal za smanjenja emisija stakleničkih plinova s jedne strane, s druge strane njihova integracija zahtijeva optimalno upravljanje električnom energijom. Optimalno upravljanje električnom energijom je neophodno osigurati zbog neizvjesnosti proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, posebice promjene u intenzitetu sunčevog zračenja i brzini puhanja vjetra te neizvjesnosti ponašanja korisnika električnog vozila tijekom promatranog vremenskog horizonta. Dodatne su usluge koje aktivni kupci mogu pružiti sustavu, sudjelovanje u programima fleksibilnosti i energetske učinkovitosti. Povećanje fleksibilnosti aktivnog kupca je neophodno osigurati zbog već spomenutog nedostatka obnovljivih izvora energije, a to je neizvjesnost proizvodnje. Integracijom sustava pohrane energije, korištenjem naprednih usluga kao što je V2G usluga te sudjelovanje u programima odgovora na potražnju (engl. *Demand Response Programs* - DRP) osigurava se visoka fleksibilnost aktivnog kupca u radu. Kombinacijom navedenih sustava pohrane energije i programa odgovora na potražnju omogućeno je skladištenje energije kada je dostupna i kontrola upravljivih uređaja s obzirom na cjenovne signale u cilju minimizacije troška rada ili osiguravanje dodatnih ciljeva u ovisnosti o definiranju funkcije cilja.

## 2.2. Sustav upravljanje energijom aktivnog kupca

Rješenja koja se nameću za prethodno navedene probleme su razvoj sustava za optimalno upravljanje električnom energijom te razvoj organizacijskih struktura aktivnih kupaca [28]. Pregledom znanstvene literature može se zaključiti da određeni autori razvijaju sustave upravljanja energijom na razini aktivnog kupca [29–42]. S druge strane u cilju postizanja dodatnih benefita, autori razvijaju sustave upravljanja energijom uzimajući u obzir udruživanje i zajedničko djelovanje aktivnih kupaca [40, 43–52].

Istraživanje različitih organizacijskih struktura aktivnih kupaca omogućuje postizanje većih ušteda uz istovremeno smanjenje povratnog djelovanja na mrežu te neposredno i na okoliš. Ova prednost proizlazi iz činjenice da više aktivnih kupaca se udružuje i zajednički djeluje u cilju ostvarivanja određenih društvenih dobrobiti. Primjer rada gdje autori nastoje maksimizirati profit jedne zgrade (aktivnog kupca) i uštede pomoćnih zgrada (s kojim imaju sklopljen ugovor) može se pronaći u [53]. Osnovne organizacijske strukture se mogu podijeliti na mikromreže i energetske zajednice, prema [28]. Također, u znanstvenoj literaturi može se pronaći pristup temeljen na agregiranju aktivnih kupaca posredstvom agregatora [54–56] te formiranje virtualnog aktivnog kupca (grupiranje/zajedničko djelovanje aktivnih kupaca) [57].

U [45] autori se slažu da će energetske zajednice imati ključnu ulogu nadolazećoj energetskej tranziciji. Kako bi se aktivni kupci (pa i pasivni kupci) mogli optimalno integrirati u energetske zajednice neophodno je da posjeduju sustav upravljanja energijom kućanstva (engl. *Home Energy Management Systems* - HEMS) [43, 49] ili da postoji centralni sustav koji upravlja cijelom energetskeom zajednicom. Primjer sustava upravljanja energijom kućanstva prikazan je na slici 2.1 dok je energetska zajednica s centralnim sustavom upravljanja (centralni kontroler) prikazana na slici 4.1.

U znanstvenoj literaturi autori su dali nekoliko definicija za koncept pametne kuće (engl. *Smart Home* - SM), jedna od definicija pametne kuće je „*Koncept pametne kuće je integracija različitih usluga unutar kućanstva korištenjem zajedničkog komunikacijskog sustava. Integracija osigurava ekonomičan, siguran i komforan pogon i visok stupanj inteligentne funkcionalnosti i fleksibilnosti kućanstva.*“ [58].

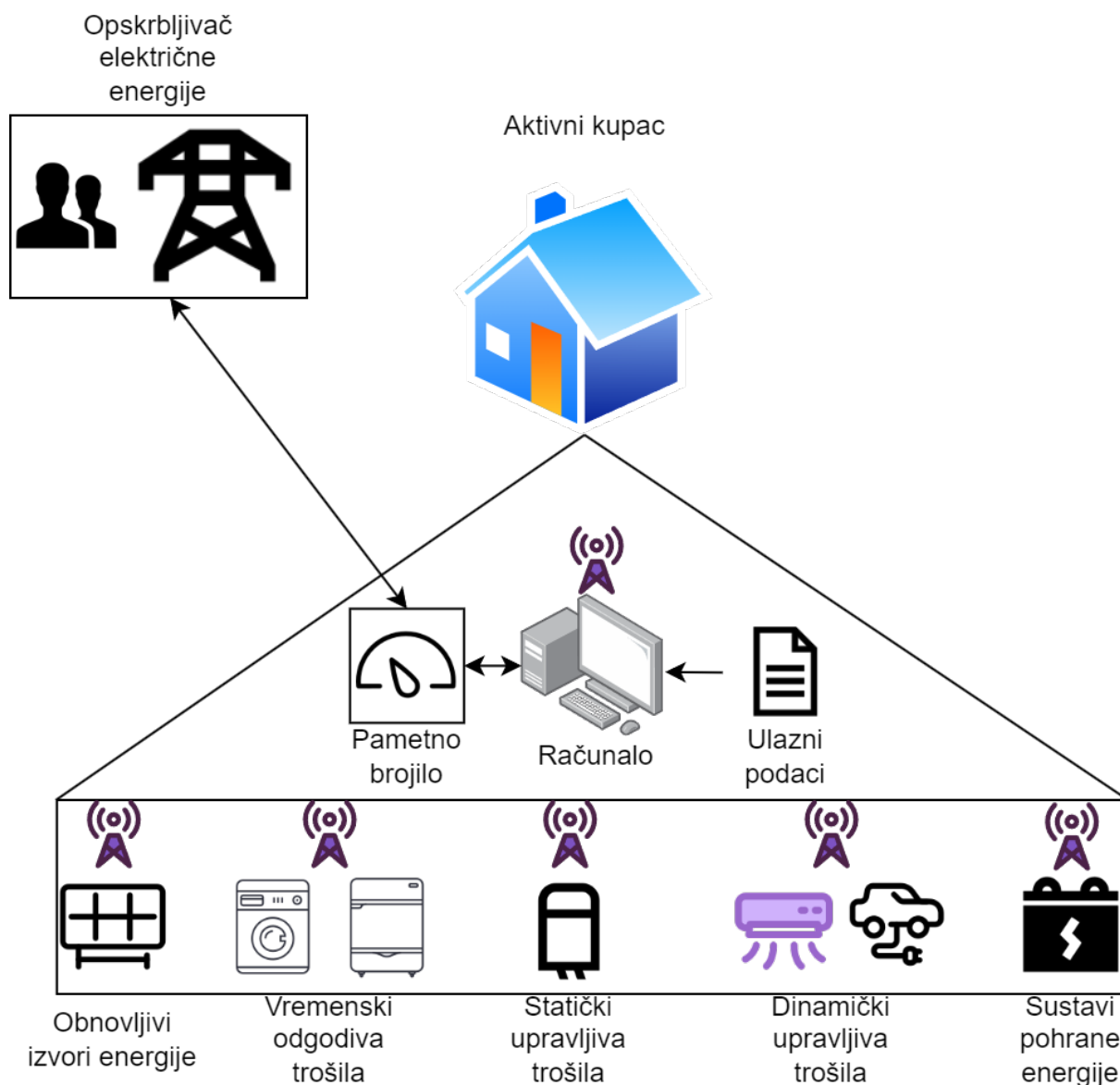
Sustav upravljanja energijom kućanstva neophodna je komponenta pametnih kuća koja se sastoji od sklopovske opreme (računala i pametnih uređaja) i programske podrške te

korisnicima omogućuje optimalno upravljanje energijom unutar kućanstva [58]. Slika 2.1 prikazuje primjer sustava upravljanja energijom aktivnog kupca.

Kontroler za upravljanje energijom (engl. *Energy Management Controller* - EMC), odnosno računalo (upravljačko računalo) glavni je dio sustava upravljanja energijom kućanstva zadužen za povezivanje i razmjenu podataka između komponenti (elemenata) sustava upravljanja energijom koji je povezan putem senzora (i aktuatora) s pametnim uređajima u kućanstvu te korisnicima putem aplikacija. Nadalje, osim komunikacije unutar kućanstva, putem pametnog brojila opskrbljivači električne energije trebali bi komunicirati s kućanstvima (i industrijom) te im slati signale za trenutnu cijenu električne energije koje bi pametno brojilo prosljedilo kontroleru za upravljanje energijom u cilju donošenja optimalnih odluka, dok bi istovremeno opskrbljivaču vraćao status korisnika. [58]

Uz pametne uređaje, autori prilikom razvoja sustava upravljanja energijom integriraju i obnovljive izvore energije [30, 43, 59]. Obnovljivi izvori energije su najčešće fotonaponske elektrane jer se radi o aktivnim kupcima u kombinaciji sa spremnicima električne energije, najčešće baterijama.

Komunikacijski protokoli korišteni unutar sustav upravljanja energijom (ostvarivanje komunikacije i razmjena podataka) su WiFi, ZigBee, Bluetooth and KNX pomoću kojih se komunikacija može ostvariti žično ili bežično s pametnim uređajima, vremenskim stanicama, obnovljivim izvorima energije i sustavima pohrane energije [59]. Pametno brojilo je u komunikaciji s opskrbljivačima električne energije (odnosno naprednom mrežom) putem interneta [59].



Slika 2.1: Primjer sustava upravljanja energijom aktivnog kupca

Problem upravljanja energijom kućanstva (engl. *Power Scheduling Problem in Smart Home - PSPSH*) je optimizacijski problem kojem je primarni cilj planiranje rada uređaja u kućanstvu, u unaprijed definiranom vremenskom horizontu, kako bi se postigli određeni ciljevi, a definiran je na način: „Planiranje (engl. *Scheduling*) je raspodjela, podložna ograničenjima ili resursima, objektima smještenim u prostor-vrijeme, na takav način da se minimizira ukupni trošak nekog skupa korištenih resursa.“. Ograničenja optimizacijskog problema upravljanja energijom kućanstva mogu se podijeliti na tvrda ograničenja (engl. *Hard constrains*) i meka ograničenja (engl. *Soft constrains*). Tvrda ograničenja moraju biti zadovoljena u rješenju za planiranje da bi bilo izvedivo dok meka ograničenja ne moraju biti zadovoljena u rješenju za planiranje, ali je poželjno. [58] Osim ekonomskog cilja, kako je

gore navedena definicija ograničena, postoji ekološki cilj, tehnički cilj i kombinacija nekoliko navedenih ciljeva, što predstavlja višeciljnu optimizaciju [28].

Sustav upravljanja energijom opisan za kućanstva može se koristiti i na razini pametnih zgrada jer je potrebno postići isti cilj, a to je osigurati optimalan i pouzdan pogon uz (najčešće) minimizaciju troškova rada [38].

Upravljačka struktura sustava upravljanja energijom ugrubo se može podijeliti na hijerarhijsku (pomoću lokalnih i centralnog kontrolera), centraliziranu (centralni kontroler) i decentraliziranu (lokalni kontroleri), pri čemu ovakva podjela proizlazi iz odgovornosti svakog kontrolera unutar sustava upravljanja energijom. Prema [49] prednost centralizirane strukture je minimizacija konflikata tijekom rada sustava upravljanja energijom jer se optimalne postavke (odluke) upravljanja određuju na razini donošenja odluka, dok decentralizirana struktura možda ne jamči pronalaženje optimalnog rješenja za cijelu zajednicu. Razvoj sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice u kojima autori koriste hijerarhijski i centralizirani pristup može se pronaći u radovima [40, 43–53, 60–63]. Primjer razvoja decentraliziranog sustava upravljanja energijom su višeagentni sustavi (engl. *Multi-agent systems*) [64]. Također, može se pronaći da autori u svojim radovima razvijaju višerazinske sustave kao kombinaciju hijerarhijsko-centraliziranog i decentraliziranog sustava upravljanja energijom [42]. U ovoj disertaciji fokus je na razvoju sustava upravljanja energijom energetske zajednice na centraliziranom pristupu.

Prilikom razvoja sustava upravljanja energijom može se primijetiti da autori razvijaju sustave upravljanje energijom u jednom sloju [30, 32–36, 38–41, 43, 44, 47, 48, 50, 52, 53, 61, 63]. Nedostatak jednoslojnog sustava upravljanja energijom je što autori ne omogućuju korekciju rezultata u nekom idućem (višem) sloju s obzirom na novonastale promjene odnosno prognoze. Višeslojni sustav upravljanja energijom, gdje se radi korekcija rezultata u višim slojevima, mogu se pronaći u radovima [31, 37, 60, 62]. Također, postoje primjeri višeslojnih sustava upravljanja energijom realiziranih pomoću lokalnih i centralnog kontrolera [46, 49], realiziranih rješavanjem optimizacijskog problema u višem sloju i prosljeđivanje vrijednosti varijabli u niži sloj u cilju rješavanja tokova snaga [51] te realiziranih kao višeslojni sustav upravljanja energijom u kojem se na osnovu dobivenih varijabli iz višeg sloja optimalno upravlja određenim kontrolerima u stvarnom vremenu u nižem sloju [42].

U cilju pronalaska optimalnog rješenja optimizacijskog problema, najčešće u što kraćem mogućem vremenu, koje je robusno ili otporno na nesigurnost povezano s proizvodnjom elek-

trične energije iz obnovljivih izvora i potrošnjom električne energije, nove metode i pristupi se konstantno istražuju i razvijaju [28].

Nadalje, pristup prilikom razvoja sustava upravljanja energijom može se podijeliti na deterministički i stohastički, slika 2.2. Osim ova dva osnovna pristupa u znanstvenim radovima mogu se pronaći i primjeri robusnog programiranja (engl. *Robust programming*) [65]. Razlika između stohastičkog i robusnog pristupa je u tome da se stohastički pristup temelji na funkcijama razdiobe vjerojatnosti pomoću kojih se generiraju scenariji za korištenje u optimizacijskim problemima (simulacijama), dok se pristup robusnog programiranja temeljni na unosu svojstva slučajnosti pomoću funkcija razdiobe vjerojatnosti za određene ulazne parametre, ali posjeduje i deterministička obilježja [66]. Deterministički pristup prilikom razvoja sustava upravljanja energijom može se naći u radovima [38–43, 46–53, 60, 63, 67, 68]. Determinističkim pristupom se ne uzima u obzir moguće promjene u ulaznim podacima (nesigurnost prognoze proizvodnje i potrošnje električne energije) što može utjecati na izvedivost optimizacijskog modela i dobivene rezultate optimizacije. U cilju korekcije dobivenih rezultata ili djelovanja na određene donesene odluke determinističkim pristupom, autori rješavaju optimizacijski problem u više iteracija što se može vidjeti u radovima [46, 60, 68]. Stohastički pristup uzima u obzir nesigurnost prognoze ulaznih podataka što osigurava izvedivost optimizacijskog modela s obzirom na moguće ishode. Razvoj sustava upravljanja energijom stohastičkim pristupom može se pronaći u radovima [44, 61, 62].

Autori u svojim optimizacijskim modelima najčešće minimiziraju trošak rada što se može primijetiti iz radova [38–41, 43, 47–52, 60, 62, 63, 67, 68]. U [37] autori nastoje minimizirati izmjenu energije s mrežom. Nadalje, u radovima može se primijetiti da određeni autori funkciju cilja zapisuju kao višeciljnu, minimizirajući trošak rada i emisiju  $CO_2$  [61] ili minimizirajući trošak rada i vršnu snagu opterećenja [44], slika 2.2. Također, može se pronaći pristup u kojem autori nastoje maksimizirati profit jedne zgrade (glavne) i uštede pomoćnih zgrada (s kojima imaju sklopljen ugovor) definirajući pri tome jednu funkciju cilja [53]. Primjer rada u kojem autori nastoje minimizirati operativni trošak, praćenje zadane temperature i zadovoljavanje zahtjeva za punjenje električnih vozila, primjenjujući normalizaciju kroz vrijednosti Nadir-Utopije kako bi se usporedili različiti ciljevi, može se pronaći u [42]. U znanstvenoj literaturi mogu se pronaći primjeri gdje autori određenim iterativnim postupkom nastoje minimizirati trošak rada jednog subjekta uz maksimizaciju profita drugog subjekta [46].

Točnost rezultata optimizacijskog modela ovisi o optimizacijskom okviru koji se može

podijeliti na tzv. *online* i *offline* te se sastoji od horizonta planiranja i vremenskog koraka [28, 66], slika 2.2. *Online* pristup podrazumijeva izvođenje procesa optimizacije u svakom vremenskom koraku ili kada su dostupne nove prognoze ulaznih podataka [31, 37, 60], što osigurava otpornost sustava na neizvjesnost. Najčešća strategija u znanstvenoj literaturi koja implementira online pristup je strategija pomičnog horizonta (engl. *Rolling horizon strategy*) u kombinaciji s modelskim prediktivnim upravljanjem (engl. *Model predictive control*) prema [66], ali se mogu pronaći i drugi pristupi s korekcijom rezultata iz prvog sloja u višim slojevima. Također, može se pronaći u radovima da autori u određenim slojevima sustava upravljanja primjenjuju modelsko prediktivno upravljanje [42]. S druge strane, *offline* pristupom se izvodi optimizacija samo jednom na početku vremenskog horizonta planiranja [29, 30, 32–36, 38–41, 43, 44, 46–48, 50–53, 61–63, 67]. Točnost rezultata optimizacije uvelike ovisi o horizontu planiranja (diskretizirani vremenski period) u budućnosti te što je dulji horizont planiranja i u slučaju *offline* pristupa, pogreška dobivenih rezultata je veća. Također, što je dulji vremenski korak (radna točka) u horizontu planiranja pogreška dobivenih rezultata je veća jer varijable odluke su istog iznosa tijekom trajanja vremenskog koraka. U radovima autori najčešće planiraju raspored rada s horizontom planiranja od 1 h [42], 24 h [29–31, 33–36, 38, 39, 41–44, 46–48, 50–53, 60–62, 67], ali se mogu naći i radovi u kojima se uzima horizont planiranja od 48 h [49], 168 h [37] pa čak i višemjesečni [32, 63]. Vremenski koraci (radne točke) unutar horizonta planiranja su najčešće 1 h [32, 33, 38, 42, 46, 48, 50, 51, 53, 61], ali se mogu naći i 30 min [43, 44, 60, 62, 63, 67], 15 min [29–31, 37, 41, 47, 53], 10 min [34, 36, 49, 52], 5 min [42, 60] i 1 min [37].

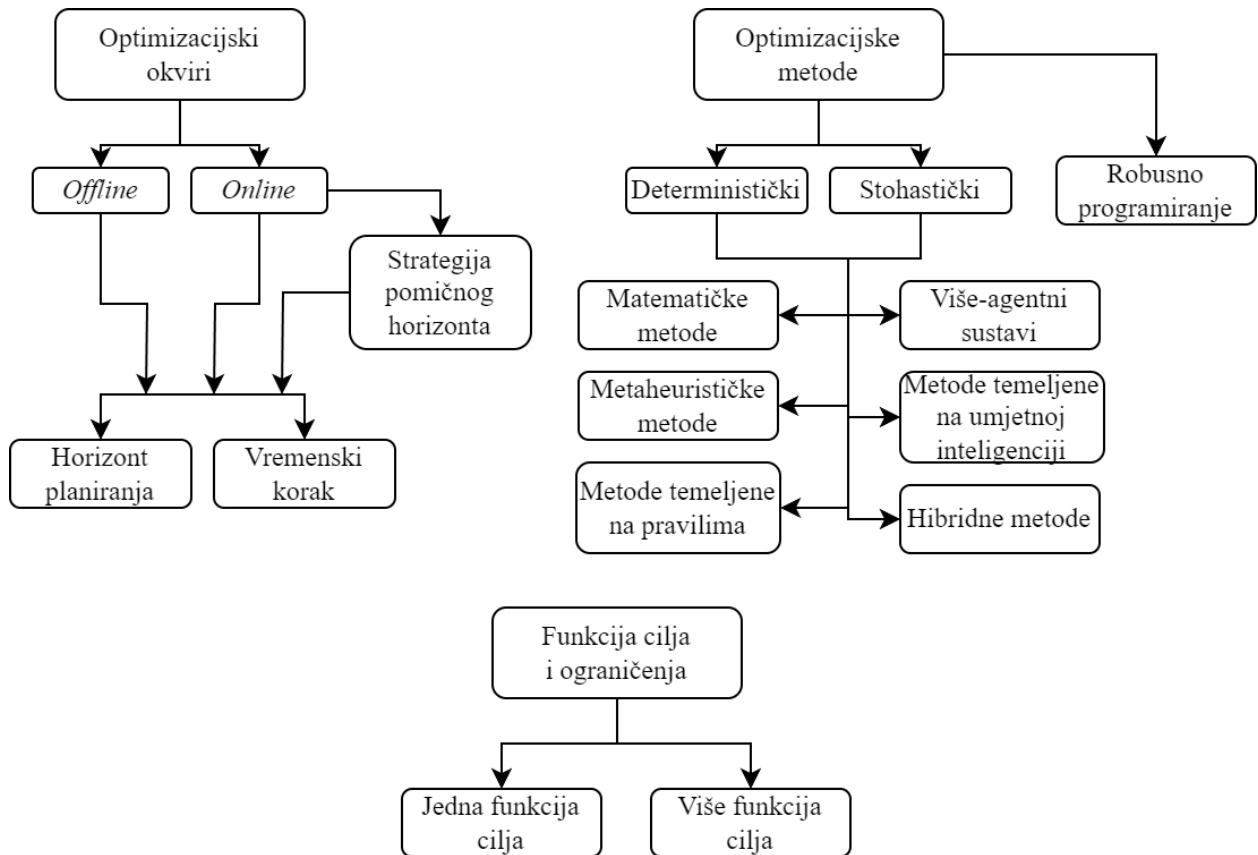
U cilju pronalaska optimalnog rješenja optimizacijskog problema (pronalaženje minimalne ili maksimalne vrijednosti funkcije cilja uz poštivanje ograničenja) u prihvatljivom vremenu, koje je robusno ili otporno na neizvjesnosti, autori u svojim radovima koriste i konstantno razvijaju različite optimizacijske metode [28]. Optimizacijske metode korištene prilikom razvoja optimizacijskog modela sustava upravljanja energijom mogu se podijeliti na:

- Matematičke metode [30, 35, 38, 40, 41, 44, 47, 49, 50, 52, 53, 61, 67],
- Metaheurističke metode [69, 70],
- Metode temeljene na pravilima [71],
- Više-agentni sustavi [64],



- Metode temeljene na umjetnoj inteligenciji [72],
- Hibridne metode (kombinacija nekoliko navedenih metoda) [31, 42].

Slika 2.2 prikazuje glavne elemente optimizacijskog modela sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice.



**Slika 2.2:** Glavni element optimizacijskog modela sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice

Kako je već navedeno, važnost integracije obnovljivih izvora energije proizlazi iz dugoročnih ciljeva za smanjenje emisije stakleničkih plinova. Na osnovu toga, primjećuju se da autori prilikom razvoja sustava upravljanja energijom uzimaju u obzir obnovljive izvore energije, posebice fotonaponske sustave [37–43, 46–53, 60–63, 67, 68]. Također, mogu se pronaći radovi gdje autori ne uzimaju u obzir proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora [44]. S druge strane u cilju osiguravanja fleksibilnosti, primjetni su radovi gdje autori u svojim modelima integriraju sustave pohrane električne energije, posebice baterijske sustave pohrane [38, 43, 44, 46–51, 53, 60–63, 67, 68]. Također se mogu pronaći radovi gdje autori u svoje modele integriraju sustave za pohranu toplinske energije [42].

Kako je već napomenuto, električna vozila posjeduju potencijal za smanjenje iznosa emisija stakleničkih plinova. Shodno tomu, primjećuje se da autori u svojim radovima prilikom razvoja sustav upravljanja uzimaju u obzir električna vozila i napredne usluge koje električna vozila mogu pružiti [37–42, 47, 49, 52, 53]. Neki autori električna vozila modeliraju kao upravljiva trošila s poznatim profilom potrošnje električne energije te na taj način zanemaruju procjenu stanja napunjenosti baterije električnog vozila [43, 44]. Također, primjetan je broj radove gdje autori ne uzimaju u obzir električna vozila u svojim modelima, a to je nedostatak zbog sve veće prisutnosti električnih vozila [46, 48, 50, 51, 60–63, 67, 68].

Osim integracije obnovljivih izvora električne energije i električnih vozila važnost se posvećuje i programima odgovora na potražnju. Prema [59], osnovna podjela programa odgovora na potražnju je na programe temeljene na cijeni (engl. *Price based programs*) i programe temeljene na poticaju (engl. *Incentive based programs*). Primjeri sudjelovanja aktivnih kupaca u programima odgovora na potražnju mogu se pronaći u radovima [41–44, 46, 49, 51].

### 2.3. Tržište električne energije

Rekonstruiranje i deregulacija u elektroenergetskom sektoru omogućuju uvođenje konkurentnosti u proizvodnju i trgovanje električnom energijom [73]. Kako je prethodno definirano, integracijom obnovljivih izvora, dosada pasivni kupci električne energije, postaju aktivni kupci koji mogu prodavati ili dijeliti viškove električne energije. Osim već navedenih problema prilikom integracije obnovljivih izvora u mrežu, javlja se problem i nastupa aktivnog kupca na tržištu električne energije. Tržište električne energije je podijeljeno na veleprodajno i maloprodajno tržište [73]. Na veleprodajnom tržištu se trguje s velikim količinama električne energije putem ugovora (kratkoročno ili dugoročno) i/ili putem burze [73]. Tržišni sudionici veleprodajnog tržišta su veliki proizvođači, veliki kupci i opskrbljivači [73]. Trgovanje električnom energijom na veleprodajnom tržištu je već uvelike istraženo i dobro funkcionira u praksi. Primjer veleprodajnog tržišta električne energije u Republici Hrvatskoj je Hrvatska burza električne energije (CROPEX) [74]. Nastupanje aktivnog kupca na veleprodajnom tržištu nije optimalno u pogledu male instalirane snage, uvjeta za pristup tržištu i svakodnevne aktivnosti prilikom prognoziranja i trgovanja električnom energijom.

U cilju osiguravanja profita odnosno ušteda, aktivnim kupcima se otvara mogućnost sudjelovanja na maloprodajnom tržištu električne energije jer zbog relativno malih instaliranih snaga obnovljivih izvora nisu u mogućnosti samostalno nastupati na veleprodajnom tržištu.

Shodno navedenom, pristupa se istraživanju ovog problema [75]. Hibridni modeli tržišta, kao što je lokalno tržište u kombinaciji s maloprodajnim tržištem ili veleprodajnom tržištem električne energije posredstvom distributivnih tehnologija, agregiranja i zajedničkog nastupa pokazale su potencijal [62, 63].

U cilju podizanja društvene dobrobiti autori prilikom razvoja sustava upravljanja energijom uvode mogućnost razmjene električne energije lokalno između aktivnih i/ili pasivnih kupaca [40, 43, 47–52, 60, 62, 63]. Razmjena električne energije lokalno, putem lokalnog tržišta električne energije, osigurava smanjenje utjecaja lokalne proizvodnje električne energije na mrežu jer se proizvedena energija troši na mjestu proizvodnje. Osim smanjenog utjecaja na mrežu osigurava se i društvena dobrobit članova energetske zajednice koji sudjeluju u dijeljenju električne energije lokalno. Također, mogu se naći radovi gdje autori zanemaruju mogućnost razmjene energije lokalno [44, 46, 61, 67, 68]. Nadalje, primjeri radova gdje autori uzimaju u obzir nastup energetske zajednice na maloprodajnom tržištu su [43, 47–52, 60, 63], dok se mogu pronaći i radovi u kojima autori pokušavaju integrirati energetska zajednicu na veleprodajno tržište električne energije [62]. Primjer rada gdje autori definiraju cijenu električne energije kupljenu iz mreže kao cijenu s prosječnim troškom jednakim stvarnom prosječnom trošku tarife u referentnoj zgradi, ali s varijacijama proporcionalnim veleprodajnom tržištu i cijenu električne energije prodane u mrežu kao 90 % mjesečnog prosjeka na veleprodajnom tržištu može se naći u [40]. Nadalje, autori su cijene na lokalnom tržištu odabrali tako da se nalaze između cijene električne energije preuzete iz mreže i cijene električne energije predane u mrežu. Na taj način, kupac električne energije kupuje električnu energiju po povoljnijoj cijeni u odnosu na onu iz mreže, a prodavač prodaje po skupljoj cijeni viškove električne energije lokalno u odnosu na prodajnu cijenu prema mreži.

### 2.4. Predviđanje ulaznih podataka

U ovoj disertaciji neće se raditi predviđanje ulaznih podataka, iako je to predloženo od strane autora u radu [28] jer je fokus na razvoju sustava upravljanja energijom energetske zajednice. Pretpostavit će se da su prognoze ulaznih podataka dostupne s određenom točnošću te će se dati kratak pregled metoda predviđanja korištenih od strane autora znanstvenih radova.

Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora i potrošnja električne energije mogu se predvidjeti s određenom točnošću pri čemu točnost predviđanja direktno utječe na re-

zultat optimizacije, jer se optimizacija provodi na osnovu ulaznih podataka, naročito pri determinističkom pristupu. Metode predviđanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora (sunčevo zračenje, brzina puhanja vjetra) i potrošnje električne energije u cilju podizanja točnosti prognoza prikazane su u [76]. U radu su metode predviđanja sunčevog zračenja i brzine puhanja vjetra podijeljene na statističke, fizičke, umjetne inteligencije i hibridne dok su metode predviđanja opterećenja podijeljene na statističke, umjetne inteligencije i hibridne. Kvalifikacija predviđanja snage fotonaponskog sustava može se podijeliti s obzirom na horizont prognoziranja i to na kratkoročno (1 h - 1 tjedan), srednje (1 tjedna - 1 mjesec) i dugoročno (1 mjesec - 1 godina) prognoziranje, prema [77]. Također, ovakva kvalifikacija se može primijeniti i na ostale prognoze predviđanja. Nadalje, autori su zaključili da točnost prognoze ovisi o vremenskom horizontu (u budućnosti) prognoziranja i metodi predviđanja [77]. Modeli predviđanja temeljeni na strojnom učenju, odnosno metodama potpornih vektora (engl. *Support Vector Machine* - SVM) i umjetnim neuronskim mrežama (engl. *Artificial Neural Network* - ANN) pokazali su se dobri u brzim promjenama prilikom predviđanja proizvodnje fotonaponske elektrane [77].

U [78], prikazane su hibridne metode predviđanja potrošnje električne energije koje se baziraju na tehnikama strojnog učenja za koje autori tvrde da daju najbolje rezultate i potencijal primjenom SVM i ANN i njihovih relevantnih modela. U [79] autori su se bazirali dati pregled metoda kratkoročnog predviđanja potrošnje električne energije za koje tvrde da su od iznimne važnosti. Inteligentni sustavi, kako su ih autori nazvali također se baziraju na SVM, neuronskim mrežama, i neizrazitim skupovima (engl. *Fuzzy sets*) s kojima su postignuti najbolji rezultati.

Osim predviđanja proizvodnje i potrošnje električne energije od velike je važnosti predvidjeti cijenu električne energije, posebice na veleprodajnom tržištu. U [80] dan je prikaz metoda optimizacije u fazi odabira skupa podataka i treninga umjetnih neuronskih mreža i adaptivnog tzv. *neuro-fuzzy* sustava zaključivanja kako bi se što preciznije mogla predvidjeti cijena električne energije na dan unaprijed tržištu. Primjenom optimizacijske tehnike selekcije ulaznih podataka i treninga umjetnih neuronskih mreža i adaptivnog *neuro-fuzzy* sustava zaključivanja, postignut je veliki napredak u preciznosti kratkoročnog predviđanja cijene električne energije.

Također, u radovima se može pronaći da autori predlažu prognozu profila korištenja električnih vozila temeljenih na agregaciji dosljednog broja vozila [81, 82] te prognozu profila

korištenja jednog vozila [37]. Korištene metode i modeli temelje se na rudarenju podataka (engl. *Data mining*), modelskom prediktivnom upravljanju, statistici i tehnikama grupiranja (engl. *Clustering techniques*).

## 2.5. Modeliranje baterijskog sustava za pohranu električne energije

U ovoj disertaciji nastoji se unaprijediti model baterijskog sustava za pohranu električne energije te se na osnovu toga daje detaljan pregled znanstvenih radova u kojima se autori bave navedenom problematikom.

Prilikom razvoja sustava upravljanja energijom, autori u svojim modelima najčešće koriste osnovni model baterijskog sustava pohrane energije (engl. *Battery Energy storage System* - BESS). Osnovni model baterijskog sustava pohrane energije sastoji se od učinkovitosti punjenja i pražnjenja ili povratne učinkovitosti (engl. *Round-trip efficiency*), koje ne ovise o snazi punjenja i pražnjenja te snage punjenja i pražnjenja u cilju procijene stanja napunjenosti baterije (engl. *State of Energy* - SOE). Procjena stanja napunjenosti baterije pomoću osnovnog modela baterijskog sustava pohrane energije unosi pogrešku. Nadalje, prema osnovnom modelu baterijskog sustava, stanje napunjenosti baterije ne utječe na snagu punjenja odnosno snagu pražnjenja što isto tako unosi određenu pogrešku. Snaga punjenja ovisna je o stanju napunjenosti te što je veće stanje napunjenosti baterije snaga punjenja je manja prema [83]. Također u obzir treba uzeti ovisnost stanja napunjenosti baterije o dostupnoj snazi pražnjenja baterije.

Modeliranje baterijskog sustava pohrane energije ključan je dio prilikom razvoja optimizacijskog modela jer je potrebno osigurati što točniju procjenu stanja napunjenosti baterije. Baterijski sustav pohrane energije se sastoji od pretvarača energetske elektronike i baterije prema [84]. U većini znanstvenih radova, autori prilikom modeliranja sustava pohrane energije koriste konstantne vrijednosti za učinkovitosti punjenja i pražnjenja ili učinkovitosti ne uzimaju u obzir prilikom razvoja modela baterijskog sustava pohrane energije [29–36, 38–41, 43, 44, 46–53, 60–63, 67, 85].

S obzirom na to da se baterijski sustav pohrane energije sastoji iz dva dijela, učinkovitost dvosmjernog pretvarača energetske elektronike i učinkovitost baterije (punjenje i pražnjenje) mogu se promatrati odvojeno prema [84]. Učinkovitost dvosmjernog pretvarača energetske

elektronike i učinkovitost baterije ovisi o opterećenju odnosno snazi punjenja ili pražnjenja. Učinkovitost ovisnu o opterećenju dvosmjernog energetskog pretvarača autori uzimaju u obzir u svojim modelima dok učinkovitost, ovisnu o snazi punjenja odnosno pražnjenja, baterije ne uzimaju u obzir [68,86]. Autori u [84] određuju učinkovitost punjenja i pražnjenja baterije s obzirom na snagu punjenja i pražnjenja koja se najčešće pojavljuje. Iako ovakav pristup daje nešto točniju procjenu stanja napunjenosti baterije i dalje je učinkovitost konstantna vrijednost što rezultira s pogreškom u procjeni stanja napunjenosti baterije.

Prilikom modeliranja baterijskog sustava pohrane energije važno je u obzir uzeti i virtualne troškove degradacije baterije koji se sastoje od virtualnog troška kalendarskog starenja baterije i virtualnog troška cikličkog starenja baterije prema [84]. Virtualni trošak kalendarskog starenja baterije ovisi o stanju napunjenosti baterije dok virtualni trošak cikličkog starenja baterije ovisi o dubini pražnjenja ciklusa (vremenski korak) (engl. *Depth of Discharge* - DOD) baterije odnosno snazi pražnjenja unutar ciklusa [84]. Autori prilikom razvoja sustava za upravljanje energijom, u većini slučajeva, zanemaruju virtualne troškove degradacije baterije [29,31–36,38,41,43,44,46–48,50–53,60–63,85] ili ih uzimaju prilikom definiranja cijene pražnjenja [39,40]. Zanemarivanje virtualnih troškova degradacije baterije dovodi do bržeg starenja baterije i potrebe za zamjenom stare baterije, što predstavlja dodatni investicijski trošak. S druge strane virtualni troškovi degradacije baterije mogu se uvrstiti u funkciju cilja kako su to napravili autori u radovima [68,84,86]. Uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije, virtualni troškovi rezultiraju manjim korištenjem baterije (punjenje - pražnjenje, energetska arbitraža) što dovodi do većeg troška rada ili manjeg ostvarenog profita. Nadalje, autori u [87] dokazali su da je točniji model koji u obzir uzima stanje napunjenosti baterije odnosno dubinu pražnjenja u usporedbi s linearnim degradacijskim modelom. Analiza je napravljena na temelju stvarnih podataka dobivenih mjerenja.

Pregledom znanstvenih radova, pronađeni su radovi u kojim autori prilikom razvoja sustava upravljanja energijom integriraju složenije modele baterijskog sustava za pohranu energije. U [30] autori uzimaju u obzir neku vrstu virtualnog troška degradacije baterije, definirajući virtualni trošak nastao tijekom pražnjenja baterije. Virtualni trošak definiran je na osnovu srednje cijene električne energije uvezene iz mreže koja se množi s određenim faktorom. Nadalje, virtualni trošak degradacije baterije konstantne vrijednosti koriste autori u radu [67]. U ovom slučaju virtualni trošak degradacije baterije uzima se u obzir, prilikom primjene V2G usluge, te bi se mogao koristiti za smanjenje troškova. Virtualni trošak

cikličkog starenja baterije, koji se računa na osnovu tzv. *rainflow* algoritma, predstavljen je u [88]. Autori tvrde da ponuda na tržištu električne energije mora sadržavati virtualni trošak degradacije baterije kako bi se mogli izračunati stvarni prihodi od sudjelovanja na tržištu električne energije. Nedostatak je da autori koriste konstantu vrijednost učinkovitosti za punjenje i pražnjenje baterije baterijskog sustava pohrane energije koja ne ovisi o snazi punjenja odnosno snazi pražnjenja baterije. Unaprijeđen model baterijskog sustava pohrane energije predstavljen je u radu [68]. Predstavljen model uzima u obzir virtualni trošak kalendarskog starenja baterije i virtualni trošak cikličkog starenja baterije te učinkovitosti dvosmjernog energetskog pretvarača energetske elektronike ovisne o opterećenju, ali učinkovitost punjenja odnosno pražnjenja baterije je konstantne vrijednosti te ne ovisi o snazi punjenja odnosno snazi pražnjenja baterije. Nadalje, autori u predstavljenom modelu koriste metodu konstantnog napona (engl. Constant-Voltage - CV) prilikom punjenja baterije i konstante struje (engl. Constant-Current - CC) prilikom pražnjenja baterije što podiže kvalitetu predstavljenog modela jer se prati stanje napunjenosti baterije i korigira snaga punjenja odnosno snaga pražnjenja. Predstavljen model razvijen je u cilju pružanja usluga fleksibilnosti od strane agregatora. Nadalje, autori su u radu [83] predstavili energetski model punjenja baterije (engl. Energy Charging Model - ECM) te dokazali da predstavljen model daje točnije rezultate od modela koji primjenjuje metodu konstante struje odnosno konstantnog napona (engl. *Constant Current/Constant Voltage* - CC/CV). Osnova energetskog modela punjenja je da se korigira snaga punjenja s obzirom na stanje napunjenosti baterije. Nedostatak predstavljenog modela je da autori prilikom pražnjenja koriste osnovni model te ne korigiraju snagu pražnjenje u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije. Također, autori koriste povratnu učinkovitost u predloženom modelu koja je konstantne vrijednosti te ne ovisi o snazi punjenja odnosno snazi pražnjenja baterije. Uzimajući u obzir nedostatke metode konstante struje odnosno konstantnog napona i prepoznajući dobre strane energetskog modela punjenja baterije, autori u [86] razvijaju model baterijskog sustava pohrane za korištenje u mikromreži. Autori u predstavljenom modelu baterijskog sustava pohrane uzimaju u obzir virtualni trošak kalendarskog starenja baterije i virtualni trošak cikličkog starenja baterije te učinkovitosti dvosmjernog energetskog pretvarača energetske elektronike ovisne o opterećenju te energetski model punjenja baterije. Nedostatak u predstavljenom modelu je da autori koriste povratnu učinkovitost koja je konstantne vrijednosti te ne ovisi o snazi punjenja odnosno snazi pražnjenja baterije. Određivanje kapaciteta litij-ionske ba-

terije za praktične primjene može se pronaći u [89]. Autori su eksperimentalno određivali jednosmjernu učinkovitost ovisnu o opterećenju koja ima direktan utjecaj na određivanja (procjenu) stanja napunjenosti baterije. Iz provedenih mjerenja su zaključili da *P-rate* ima direktan utjecaj na jednosmjernu učinkovitost te da jednosmjerna učinkovitost opada s rastom *P-rate*-a. *P-rate* su autori definirali kao omjer snage punjenja ili pražnjenja u vatima (W) i nazivnog energetskeg kapacitet baterije u vat-satima (Wh).

Iz pregleda znanstvenih radova može se zaključiti da autori, prilikom modeliranja baterijskog sustava za pohranu energije, u većini slučajeva koriste pojednostavljene modele što rezultira pogreškom prilikom procijene stanja napunjenosti baterije. Pogreška prilikom procjene stanja napunjenosti baterije se javlja jer se u pojednostavljenim modelima baterijskog sustava pohrane ne uzimaju u obzir učinkovitosti punjenja i pražnjenja ovisne o snagama punjenja i pražnjenja baterijskog sustava pohrane energije. Drugi nedostatak pojednostavljenih modela je što se u obzir ne uzima ovisnost snage punjenja odnosno pražnjenje o stanju napunjenosti baterije nego se pretpostavlja da baterija, odnosno baterijski sustav pohrane energije, može osigurati konstantnu snagu punjenja odnosno pražnjenja bez obzira na stanje napunjenosti baterije. Snaga punjenja i pražnjenja je ovisna o stanju napunjenosti baterije što treba uzeti u obzir prilikom razvoja modela baterijskog sustava pohrane energije.

S obzirom na pregled radova i uočene nedostatke, u ovoj disertaciji se predlaže razvoj modela baterijskog sustava pohrane energije koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetske pretvarač, energetske model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije, primijenjen na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila, unaprijeđen s energetske modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju. Unaprijeđeni model baterijskog sustava pohrane ujedno je i jedan od znanstvenih doprinosa koji proizlaze iz ove disertacije.

### 2.6. Upravljenje električnom energijom unutar zgrade

S obzirom na to da se u ovoj disertaciji nastoji razviti algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge odnosno cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada, što je ujedno znanstveni doprinos, u nastavku će se prikazati pregled radova u kojima autori razvijaju stav upravljanja energijom zgrade.

Optimalna uporaba električnih vozila na parkiralištu zgrade fakulteta, u cilju povećanja ukupnog društvenog blagostanja, prikazna je u [38]. Integracija punionica na parking zgrade



omogućuje vlasnicima da pune baterije svojih električnih vozila po povoljnijim cijenama u odnosu na javne punionice. S druge strane, trošak za električnu energiju zgrade fakulteta može se smanjiti optimalnim upravljanjem punionicama integriranih na parkingu te baterijskim sustavom pohrane energije. Nedostatak je što autori nisu odredili optimalne cijene električne energije za primjenu V2G usluge. Višeciljni optimizacijski okvir za pametno punjenje i pražnjenje baterija električnih vozila s ciljevima maksimizacije prihoda i ušteda glavne (pametne) zgrade te pomoćnih zgrada (s kojima su sklopljeni ugovori) predložen je u radu [53]. Rezultati pokazuju moguću dnevnu uštedu troška električne energije do 9 % za pomoćne zgrade, dok glavna zgrada može postići dnevni profit do 158 %. Također, električna vozila mogu uštedjeti do 69 % troška punjenja primjenjujući predložen okvir. Nedostatak je što autori ne određuju optimalne cijene električne energije za primjenu V2G usluge, ali zaključuju da su važne za određivanje profita i ušteda. Upravljačka shema za optimizaciju planiranja (engl. *Scheduling*) rada mikromreže (zgrade) koja integrira upravljive klima uređaje, fotonaponski sustav i električna vozila predložena je u [41]. Također autori uzimaju u obzir stohastičke karakteristike električnih vozila u cilju boljeg modeliranja ponašanja (vlasnika) električnih vozila. Predložena strategija osigurava smanjenje troška električne energije do 50 % u usporedbi sa slučajem ako mikromreža ne integrira fotonaponski sustav i električna vozila. Nedostatak je što autori u svom modelu koriste V2G uslugu bez uvođenja cijena za korištenje, odnosno vlasnici električnih vozila nemaju nikakvu korist od pružanja usluge fleksibilnosti.

U [90] autori su predložili pristup koji se bazira na kombinaciji primjene V2G usluge na parkingu zgrade i kod kuće te proveli proračune u cilju zaključivanja isplativosti predloženog pristupa. Ideja autora je da djelatnici pune vozila kod kuće tijekom noćnih sati te energiju iz baterija električnih vozila predaju zgradi tijekom dnevnih sati smanjujući dnevnu vršnu snagu zgrade,  $CO_2$  i troškove energije. Rezultati pokazuju da je metodologija izvediva i može dovesti do bolje energetske učinkovitosti, reducirati dnevnu vršnu snagu zgrade do 50 %, povećati broj električnih vozila djelatnika te da postoje benefiti za obje strane. Dvoslojni sustav upravljanja energijom zgrade za optimalnu kontrolu temperature unutar zgrade i električnih vozila predloženo je u [42]. Predloženi sustav upravljanja je testiran na zgradi koja integrira fotonaponski sustav, geotermalnu dizalicu topline, infrastrukturu za punjenje električnih vozila, sustav za pohranu topline i ventilokonvektore. Rezultati pokazuju da predloženi algoritam omogućava smanjenje dnevnog troška oko 20 % u usporedbi s jed-

nostavnom heuristikom te osigurava ispunjenje zahtjeva za punjenje (napunjenost baterija) električnih vozila. Dodatno, uz odgovor na potražnju, uštede se mogu povećati do 35 %. Nedostatak prethodno analizirana dva rada je da autori ne uvide cijene električne energije za primjenu V2G usluge nego samo nastoje zadovoljiti potrebe za električnom energijom primjenom iste [42, 90].

U [39] predložen je okvir za upravljanje interakcijama između zgrade i električnih vozila u kontekstu trajanja parkinga i usluga dodane vrijednosti za razdoblja punjenja i pražnjenja. Rezultati dobiveni predloženim okvirom pokazali su mogućnost povećanja vlastite potrošnje (engl. *Self-consumption*) i smanjenje troška zgrade za slučajeve bez električnih vozila i s električnim vozilima. Nedostatak je što autori ne određuju optimalne cijene električne energije za primjenu V2G usluge nego koriste cijene koje su proizvoljno odredili. Dijeljenje viška električne energije između zgrada posredstvom električnih vozila predloženo je u radu [40]. Rezultati pokazuju postignuto povećanje vlastite potrošnje energije iz obnovljivih izvora na razini zgrade i zajednice, kao i smanjenje troškova električne energije u usporedbi s osnovnim slučajem bez integracije električnih vozila. Nedostatak je što autori ne uzimaju u obzir određivanje optimalne cijene za primjenu V2G usluge. Važno je napomenuti da su autori u prethodno dva spomenuta rada primjenu V2G usluge, odnosno obračun punjenja, pražnjenja i usluge fleksibilnosti, definirali na osnovu vremena korištenja navedenih usluga, odnosno po satu [39, 40]. Ovakav pristup nije uobičajen s obzirom na to da se električna energija ne naplaćuje po satu nego po količini potrošene električne energije (u kWh), što bi trebao biti slučaj i kod električnih vozila.

U [91] autori istražuju kako punionice za električna vozila utječu na potrošnju električne energije velikih trgovačkih centara uzimajući u obzir instaliranu snagu punionice, faktor korištenja punionice, klimatske zone i godišnja doba. Autori utjecaj punionica uspoređuju s procjenom promjena u mjesečnoj vršnoj potražnji snage, potrošnje električne energije i godišnjem računu za električnu energiju te zaključuju da brzo punjenje može značajno utjecati na mjesečnu vršnu snagu, povećavajući je za više od 250 %, uz relativno malu razliku u mjesečnoj potrošnji električne energije.

## 2.7. Upravljenje električnom energijom unutar energetske zajednice

U ovoj disertaciji nastoji se unaprijediti sustav upravljanja energijom unutar energetske zajednice te se na osnovu toga daje detaljan pregled znanstvenih radova u kojima se autori bave navedenom problematikom.

U [43] predstavljen je tzv. *pool* model trgovanja unutar lokalne energetske zajednice s transparentnim mehanizmom čišćenja tržišta u kombinaciji s programima odgovora na potražnju. Autori su usporedili dva scenarija, nezavisni i integriran način rada, pri čemu su rezultati pokazali smanjenje troškova od 16.63% u nezavisnom načinu rada i 21.38% u integriranom načinu rada u usporedbi s osnovnim scenarijem bez primjene programa odgovora potražnje. Također, autori modeliraju električna vozila kao upravljiva trošila i pri tome zane-maruju mogućnost procijene stanja napunjenosti baterije električnog vozila i primjenu nekih dodatnih usluga kao što je V2G usluga. U [47] autori se slažu da koncept lokalnog tržišta električne energije može doprinijeti integraciji električnih vozila, pri čemu predlažu optimizacijski model za rješavanje problema transakcija električne energije između aktivnih kupaca i električnih vozila. Na predložen način aktivni kupci (i pasivni kupci) električne energije mogu raditi transakcije električne energije između članova na lokalnoj razini energetske zajednice, smanjujući zagašenja i troškove. Autori uzimaju u obzir da se energetska zajednica sastoji od različitih tipova aktivnih kupaca pri čemu svaki aktivni kupac ima integriranu fotonaponsku elektranu i baterijski sustav pohrane energije. Rezultati pokazuju smanjenje troška energetske zajednice između 1.6% i 3.5% u usporedbi sa slučajem bez predloženog P2V lokalnog tržišta električne energije odnosno lokalnog tržišta za razmjenu električne energije između članova i električnih vozila. Cijena električne energije za punjenje baterije električnog vozila (za slučaj ako se električna energija kupuje od aktivnog kupca) jednaka je srednjoj vrijednosti cijena električne energije između minimalne cijene električne energije iz mreže, koju vlasnik električnog vozila plaća opskrbljivaču, i cijene za izvoz energije u mrežu. Nedostatak je da autori nisu uzeli u obzir V2G uslugu koju električna vozila mogu ponuditi. U [48] predstavljen je eksperimentalni okvir za integraciju socioekonomskih ciljeva i ciljeva ponašanja za lokalnu energetska zajednicu u cilju poticanja ušteda energije i usvajanje obnovljivih izvora energije. Autori koriste unaprijed određene cijene električne energije, od opskrbljivača, za izmjenu električne energije s mrežom dok cijenu unutar lokalne energetske zajednice (na

lokalnom tržištu) formiraju kao srednju cijenu na osnovu cijene izmjene električne energije s mrežom. Model lokalne zajednice uzima u obzir potrošnju, skladištenje i izvoz električne energije za 20 kućanstava koji su, u različitim scenarijima, subjekti empirijskog eksperimenta i prihvaćaju očuvanje (uštedu) energije i obnovljive izvore energije. Rezultati pokazuju da interakcija socioekonomskih ciljeva i ciljeva ponašanja dovodi do smanjenja troška od 19.26% u usporedbi s osnovnim slučajem bez očuvanja (uštede) energije i bez usvajanja veće proizvodnje energije iz obnovljivih izvora odnosno veće integracije obnovljivih izvora. U [51] predstavljen je kosimulacijski (engl. *Co-simulation*) okvir koji se sastoji od modela lokalnog tržišta električne energije zajedno sa simulatorom trofazne distribucijske mreže. Autori su istražili potencijal trgovanja na lokalnom tržištu električne energije, uzimajući u obzir baterijske sustave pohrane energije kod aktivnih kupaca, i zaključili da bi određene tarife (cijene) električne energije mogle imati negativan utjecaj na distribucijsku mrežu. Virtualni troškovi degradacije baterije su zanemareni, što bi moglo dovesti do pogrešnog zaključka, te na osnovu zanemarenja sustav za upravljanje energijom iskorištava baterije ne uzimajući u obzir visoke troškove zamjene baterija. Električna vozila su također zanemarena od strane autora što isto tako može imati utjecati na trgovanje električnom energijom na lokalnom tržištu.

Upravljanje potrošnjom kućanstva, tzv. inteligentno višeciljno (engl. *Multi-objective*), u kombinaciji sa sustavima pohrane energije uz istovremeno smanjenje troškova kućanstva i vršnog opterećenja predstavljeno je u radu [44]. Predloženi model testiran je na sustavu koji se sastoji od četiri različita kućanstva. Autori nisu uzeli u obzir mogućnost trgovanja na lokalnom tržištu, električna vozila i tehnička ograničenja vezana za distribucijsku mrežu. Rezultati su prikazani s obzirom na provedene scenarije i ciljeve koji su se nastojali postići. U [46] autori su istražili mogućnost dvosmjernog interaktivnog ponašanja između energetskih sustava s više sudionika te strategije upravljanja energijom u susjednim zajednicama. Istraživanje se temelji na razvoju tzv. suradničkog hijerarhijskog okvira za koordinaciju interakcije električne i toplinske energije unutar i među zajednicama. Optimalnim upravljanjem energijom, uključujući porez na  $CO_2$ , autori nastoje minimizirati troškove energetske zajednice uz maksimizaciju profita svakog sudionika. Rezultati pokazuju da je moguće postići tzv. *win-win* situaciju za sve sudionike s predloženim suradničkim hijerarhijskim okvirom za koordinaciju, što znači smanjenje ukupnog troška i emisije  $CO_2$ . Nedostatak je što autori zanemaruju električna vozila prilikom razvoja sustava predloženog suradničkog hijerarhijskog

okvira. Utjecaj električnih vozila i vremenski odgodivih trošila na tzv. *Peer-to-Peer* trgovanje energijom u kombinaciji s unaprijeđenom V2H uslugom, odnosno razmjenom električne energije između električnih vozila i kućanstva, u cilj smanjenja razmijene električne energije s mrežom istraženo je u [49]. Primjena V2H usluge predvodi u smanjenju troška svakog aktivnog kupca za 23% i smanjenju troška energetske zajednice za 15% u usporedbi bez primjene predložene V2H usluge. Nedostatak je što su autori koristili pojednostavljeni model baterijskog sustava pohrane energije. Pojednostavljenim modelom unosi se pogreška prilikom procijene stanja napunjenosti baterije jer se u obzir ne uzimaju učinkovitosti, punjenja i pražnjenja baterijskog sustava energije, ovisne o snazi punjenja odnosno snazi pražnjenja. U [50] prikazan je sustavni pristup kvantificiranju prednosti pametnih kuća, počevši od pasivnih kupaca do aktivnih kupaca odnosno pametnih kuća na lokalnom tržištu unutar energetske zajednice. Predstavljen pristup, s aktivnim kupcima i predloženim modelom lokalnog tržišta, osigurava uštede od 50% i potiče lokalnu potrošnju električne energije od 31% tijekom ljetnih mjeseci. Nedostatak je što autori zanemaruju mogućnost korištenja električnih vozila kao sustava pohrane energije, virtualne troškove degradacije baterije te koriste jednostavan model baterijskog sustava za pohranu energije. U [60] predložena je strategija upravljanja energetskom zajednicom u tri faze uzimajući u obzir lokalno tržište električne energije u cilju minimizacije troška. Prva faza se provodi dan unaprijed (engl. *Day-ahead*), druga faza se odnosi na upravljanje u stvarnom vremenu (engl. *Real-time operation*) kako bi se ublažile nesigurnosti prognoza i poremećaji napona te treća faza ugovorno raspodjeljuje energiju zajednice među kućanstvima u vremenskom koraku od 30 min u cilju osiguravanja pravednog pojedinačnog smanjenja troškova i eventualnog stvaranja ekonomskog višak u zajednici. U usporedbi s osnovnim scenarijem, rezultati pokazuju da predložena strategija osigurava prosječno 30% individualno smanjenje troška među članovima. Nedostatak je da autori ne uzimaju u obzir električna vozila prilikom razvoja strategije upravljanja.

U [61] predložen je stohastički (engl. *Stochastic*) optimizacijski model formuliran pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *Mixed-Integer Linear Programming* - MILP) s ciljem optimizacije operativnih strategija različitih tehnologija unutar lokalne energetske zajednice kao i strategija ponude lokalne zajednice na tržištu dan unaprijed. Autori predloženi model temelje na višeciljnom pristupu uzimajući u obzir troškove energije i emisiju  $CO_2$ . Koristeći tzv. *roulette wheel* metodu, generira se početni broj scenarija sunčevog zračenja, nakon čega se odabiru najprikladniji scenariji pomoću tzv. *fast-forward*

algoritma u cilju smanjenja računalnog opterećenja sljedeće faze optimizacije. Rezultati pokazuju da predloženi model osigurava smanjenje dnevnog troška energije u rasponu od 5% do 14% te smanjenje emisije  $CO_2$  u rasponu od 6% do 18%. Autori u predloženom modelu nisu uzeli u obzir električna vozila i mogućnost trgovanja električnom energijom na lokalnom tržištu što su nedostaci predloženog modela.

Uzimajući u obzir ambiciozne ciljeve Europske unije (EU) za integraciju obnovljivih izvora energije, autori se u [45] slažu da će u nadolazećoj energetskej tranziciji ključnu ulogu imati energetske zajednice. Na osnovu tehno-ekonomske usporedbe, autori su pokazali da bi energetske zajednice mogle ubrzati integraciju obnovljivih izvora energije u zgradama u usporedbi bez primjene koncepta energetske zajednice. Prednost proizlazi iz veće stope vlastite potrošnje energije iz obnovljivih izvora, što rezultira stvaranjem ušteda. Autori nisu uzeli u obzir baterijske sustave pohrane energije i električna vozila što je nedostatak.

Iz pregleda znanstvenih radova može se zaključiti da autori, prilikom razvoja sustava za upravljanje energijom unutar energetske zajednice, zanemaruju sve veći broj električnih vozila kojima je potrebno osigurati sigurno punjenje odnosno optimalno održavati stanje napunjenosti baterije. Nadalje, određena grupa autora prilikom razvoja sustava upravljanja energijom modelira električna vozila kao vremenski odgodiva trošila s poznatim profilom potrošnje električne energije. Nedostatak navedenog pristupa je što se u obzir ne uzima mogućnost procijene stanja napunjenosti baterije električnog vozila kao i mogućnost primjene naprednih usluga kao što je V2G usluga. Također, može se primijetiti da određeni autori u svojim radovima uzimaju u obzir mogućnost procijene stanja napunjenosti baterije električnog vozila i V2G uslugu, ali koriste pojednostavljene modele baterijskog sustava pohrane energije što je nedostatak.

Doprinos ove disertacije je da se električna vozila uzimaju u obzir prilikom razvoja sustava za upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Električna vozila modeliraju se kao baterijski sustavi pohrane energije koji obuhvaćaju učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetske pretvarač, energetske model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije te su unaprijeđeni s energetske modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju.

## 2.8. Znanstveni doprinosi

Na temelju detaljnog pregleda znanstvene literature i s obzirom na preporuke autora u [28] za budući istraživački rad, u ovoj disertaciji nastoji se razviti model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge i unaprijeđenim modelima elemenata energetske zajednice, uključujući i električna vozila. Također, znanstveni doprinosi koji proizlaze iz ove disertacije su u značajnoj mjeri potvrđeni objavljivanjem znanstvenog rada [92].

Znanstveni doprinosi koji proizlaze iz ove disertacije su:

- Unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice uzimajući u obzir stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu;
- Optimizacijski algoritam za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada;
- Model baterijskog sustava za pohranu energije unaprijeđen s energetske modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju baterije.

### 3. Energetske zajednice

Kako je već definirano u 2. poglavlju, promijene u elektroenergetskom sektoru omogućile su uvođenje konkurentnosti u proizvodnju i trgovanje električnom energijom te aktivni kupci mogu kupovati električnu energiju iz mreže i prodavati električnu energiju u mrežu te pružati pomoćne usluge sustavu. U cilju smanjenja povratnog djelovanja aktivnih kupaca na mrežu, integracije aktivnih kupaca na tržište električne energije te povećanja društvene dobrobiti, istražuju se različiti načini grupiranja aktivnih kupaca. Energetske zajednice pokazuju velik potencijal u nadolazećoj energetske tranziciji s čime se slažu autori u [45]. Osim spomenutih, postoje prednosti u pogledu zajedničkog investiranja u postrojenja za proizvodnju i skladištenje energije, prostornoga ograničenja za integraciju postrojenja, osiguravanja pristupačnih cijena električne energije (integracija, odnosno nastup na različitim tržištima električne energije), poticanja integracije obnovljivih izvora energije, osiguravanja fleksibilnost potrošnje (programi odgovora na potražnju), osiguravanja samodostatnosti energetske zajednice te smanjenja troškova, gubitaka i emisija stakleničkih plinova [93,94]. Iz spomenutih prednosti može se zaključiti da energetske zajednice mogu direktno utjecati na ispunjenje globalnih i lokalnih klimatskih i energetske ciljeva Europske unije. Također, ako bi se pretpostavilo formiranje većeg broja energetske zajednice to bi moglo utjecati i na cijene električne energije odnosno cijenu energenata.

Prema odredbama Europske unije o uređenju energetske tržišta i okvirima za nove energetske inicijative spadaju:

- Zajednice obnovljivih izvora energije - Direktiva (EU) 2019/944 [12] i
- Energetske zajednice građana - Direktiva (EU) 2018/2001 [95].

Glavna razlika između zajednica obnovljivih izvora energije i energetske zajednice građana je ta što zajednice obnovljivih izvora energije lokalno iskorištavaju sve oblike obnovljivih izvora energije, toplinske i električne, dok su energetske zajednice građana ograničeni na



električnu energiju i s njom povezane usluge [93]. Primjer energetske zajednice prikazuje slika 4.1.

U ovoj disertaciji fokus je na razvoju modela dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice tako da će se u nastavku detaljnije obraditi energetske zajednice građana.

Energetske zajednice građana su pokriveno:

- Europskom direktivom o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije (Direktiva (EU) 2019/944) [12] i
- Zakonom o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj [96].

U Europskoj direktivi su navedena pravila za proizvodnju, prijenos, distribuciju, opskrbu i skladištenje električne energije, zajedno s aspektima zaštite potrošača, u cilju stvaranja integriranih, konkurentnih, fleksibilnih, poštenih i transparentnih tržišta električne energije u Europskoj uniji orijentiranih na potrošače (građane) [12]. Pravila o maloprodajnim tržištima električne energije sadržana su u Direktivi 2019/944 [12], dok su pravila o veleprodajnom tržištu i djelovanju mreže sadržana u Uredbi 2019/943 [13].

Prema Direktivi 2019/944 [12], Energetske zajednice građana:

- „*Jesu subjekti pod kontrolom vlasnika udjela ili članova zasnovani na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju, koji imaju pravo sudjelovati u proizvodnji, distribuciji, opskrbi, potrošnji, uslugama energetske učinkovitosti ili uslugama punjenja za električna vozila ili pružaju druge energetske usluge svojim članovima ili vlasnicima udjela*“;
- „*Imaju pravo biti priključene na distribucijske mreže i tretirane na nediskriminirajući način u smislu regulacije ili pristupa svim tržištima električne energije*“;
- „*Imaju pravo dijeliti vlastitu proizvodnju električne energije sa svojim članovima u skladu analizom troškova i koristi distribuiranih energetske izvora*“;
- „*Imaju pravo, ako to dotična zemlja EU-a dopušta, posjedovati, uspostavljati, kupovati ili iznajmljivati distribucijske mreže u skladu s primjenjivim propisima*“.

U Direktivi 2019/944 također stoji da operatori distribucijskog sustava „*odgovorni su za osiguranje dugoročne sposobnosti sustava da udovolji zahtjevima za distribuciju električne*

energije, uključujući troškovno učinkovitu integraciju novih postrojenja za proizvodnju električne energije, posebno onih koja proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, kao i za pružanje korisnicima sustava informacija potrebnih za učinkovit pristup i upotrebu sustava“ [12].

Kako je Republika Hrvatska članica Europske unije, Zakon o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj preuzima Direktivu 2019/944 [96] koja je dio paketa *Čista energija za sve Europljane* [6].

Energetska zajednica građana u Zakonu o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj 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“. [96]

Prema prvobitnom Zakonu o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj, uvjet za formiranje energetske zajednice je da su članovi zajednice morali biti priključeni na istu transformatorsku stanicu [96], što je kasnije u izmjenama Zakona uklonjeno [97].

Iz Zakona o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj proizlaze još neka važna pravila:

- „Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela odnosno člana energetske zajednice građana vrijede prava i obveze krajnjeg kupca ili aktivnog kupca odnosno korisnika mreže“;
- „Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela ili člana energetske zajednice građana primjenjuju se tarifne stavke za prijenos električne energije u skladu s metodologijom za određivanje iznosa tarifnih stavki za prijenos električne energije i odlukom o iznosu tarifnih stavki za prijenos električne energije te tarifne stavke za distribuciju električne energije u skladu s metodologijom za određivanje iznosa tarifnih stavki za distribuciju električne energije i odlukom o iznosu tarifnih stavki za distribuciju električne energije“;

- „Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela odnosno člana energetske zajednice zasebno se razmatra i uzima u obzir električna energija koja je predana u mrežu i električna energija koja je preuzeta iz mreže, u skladu sa zakonom kojim se uređuje energetska sektor i zakonom kojim se uređuje područje regulacije energetske djelatnosti, te člankom 18. Uredbe (EU) 2019/943 osiguravajući odgovarajući i uravnotežen doprinos raspodjeli ukupnih troškova sustava“;
- „Energetska zajednica građana može sudjelovati na svim tržištima električne energije izravno ili putem agregiranja u skladu s pravilima kojima se uređuju pojedina tržišta električne energije;
- „Energetska zajednica građana ima pravo na obračunskim mjernim mjestima vlasnika udjela i članova energetske zajednice urediti dijeljenje električne energije iz proizvodnih postrojenja i postrojenja za skladištenje energije energetske zajednice građana ili aktivnog kupca koji je član energetske zajednice građana u skladu s općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom dok se na obračunskim mjernim mjestima vlasnika udjela i članova energetske zajednice građana zadržavaju prava i obveze krajnjih kupaca odnosno korisnika mreže“.

Ako energetska zajednica sudjeluje na veleprodajnom tržištu financijski je odgovorna za odstupanja koje uzorkuje u elektroenergetskom sustavu. Za slučaj dijeljenja električne energije ne dovodi se u pitanje primjenjiva naknada za korištenje distribucijske mreže i druga propisana davanja, a analizu troškova i koristi distribuiranih izvora električne energije izrađuje Hrvatska energetska regulatorna agencija [98]. Nadalje, u svrhu dijeljenja električne energije, energetska zajednica dužna je operatoru distribucijskog sustava dostaviti popis obračunskih mjernih mjesta članova energetske zajednice građana koja su uključena u dijeljenje električne energije te ključ prema kojem se električna energija dijeli po obračunskim mjernim mjestima koja su uključena u dijeljenje električne energije. Također, obračunska mjerna mjesta moraju biti opremljena naprednim brojilom i u skladu s tehničkim zahtjevima propisanim u mrežnim pravilima distribucijskog sustava. Važno je još napomenuti da ukupna priključna snaga u smjeru predaje električne energije u mrežu ne smije biti veća od ukupne priključne snage u smjeru preuzimanja električne energije te da je višak električne energije proizvedene u okviru energetske zajednice građana, a koja nije potrošena pri dijeljenju električne energije unutar energetske zajednice, preuzima opskrbljivač na obračunskom mjernom mjestu člana

energetske zajednice koji sudjeluje u dijeljenju energije. [96,97]

Dijeljenjem električne energije, članovi energetske zajednice mogu kupovati potrebnu električnu energiju od drugih članova energetske zajednice (npr. višak električne energije iz fotonaponske elektrane) ili proizvodnih postrojenja po povoljnijim cijenama u odnosu na cijenu električne energije iz mreže. Koliko će biti povoljnija cijena električne energije unutar energetske zajednice ovisi o više faktora koji utječu na formiranje cijena. Neki od faktora su investicije projekata (zajedničke ili privatne investicije), naknade za korištenje distribucijske mreže, porezi te realizacija lokalnog tržišta električne energije. Također, članovima energetske zajednice je povoljnije prodavati električnu energiju na lokalnom tržištu zbog veće cijene u odnosu na prodaju viškova električne energije u mrežu. [94] Osim osiguravanja dobrobiti članova energetske zajednice implementacijom lokalnog tržišta, autori se slažu da lokalno tržište električne energije može doprinijeti i integraciji električnih vozila [47].

Prema Zakonu o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj, energetska zajednica može pružati usluge punjenja za električna vozila. Shodno navedenom i s obzirom na prednosti lokalnog tržišta u vidu doprinosa integraciji električnih vozila, u ovoj disertaciji fokus je na razvoju optimizacijskog algoritma za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada. Razvoj optimizacijskog algoritma za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i aktivnih kupaca je ujedno i jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije.

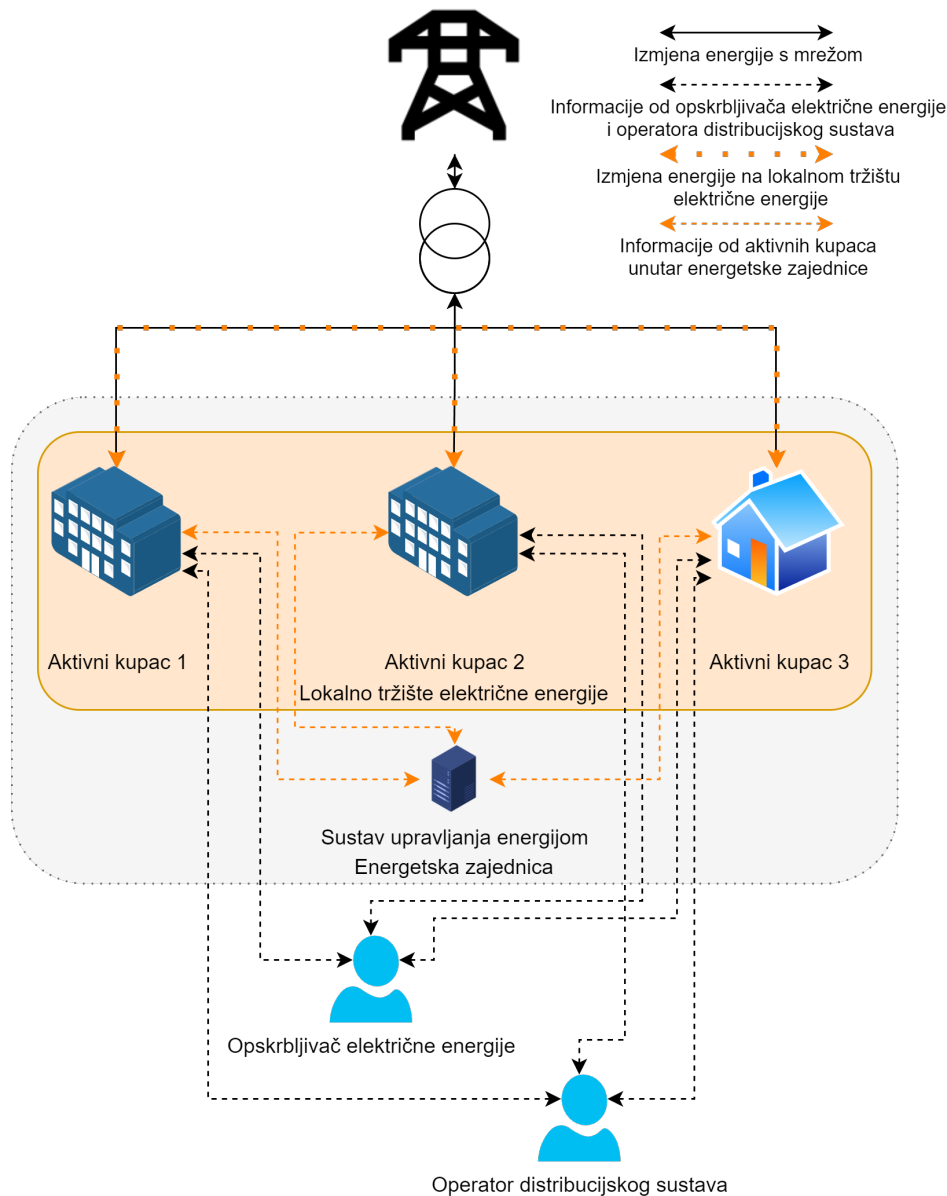
## 4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

Energetske zajednice građana predstavlja koncept koji potiče lokalnu suradnju i inicijative građana u području energetike. Udruživanjem građana, formiraju se energetske zajednice kojima su primarni ciljevi pružanje okolišne, gospodarske ili socijalne koristi svojim članovima. U ostvarenju ciljeva, fokus je u proizvodnji električne energije, posebice iz obnovljivih izvora, distribuciji, potrošnji, agregiranju, skladištenju, uslugama energetske učinkovitosti, uslugama punjenja električnih vozila te drugih energetske usluga. Udruživanjem građana odnosno formiranjem energetske zajednice, građanima je omogućeno zajedničko ulaganje u obnovljive izvore energije, sustave pohrane energije, infrastrukturu za punjenje električnih vozila i električna vozila te svega neophodnoga za održivu budućnost. Dodatno, energetske zajednice također promoviraju edukaciju i svijest o energetske pitanjima, potiču solidarnost i zajednički pristup resursima, što rezultira ostvarenju ciljeva održivog razvoja i borbi protiv klimatskih promjena na lokalnom i globalnom nivo. U ovoj disertaciji fokus je na razvoju unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Slika 4.1 prikazuje primjer jedne energetske zajednice koja se sastoji od dvije komercijalne zgrade i jednog kućanstva. Na primjeru sa slike može se pretpostaviti da barem jedna od zgrada (aktivni kupac 1 ili aktivni kupac 2) ima integriranu fotonaponsku elektranu za proizvodnju električne energije i punionice za električna vozila. Za drugu zgradu može se pretpostaviti da nema fotonaponsku elektranu, ali ima punionice za električna vozila (nema slobodnog prostora za integraciju fotonaponske elektrane). Pretpostavka za aktivnog kupca 3 je da posjeduje proizvodnju električne energije iz fotonaponskog sustava i ima punionicu za potrebe punjenja vlastitog električnog vozila. Svi aktivni kupca unutar zajednice posjeduju mogućnost upravljanja trošilima (potrošnjom) električne energije koja se mogu podijeliti na vremenski odgodiva trošila te dinamički i statički upravljiva trošila. Uz upravljanje trošilima,

omogućuje se dijeljenje energije unutar energetske zajednice posredstvom lokalnog tržišta električne energije. Dijeljenjem energije osigurava se da aktivni kupcu s viškom proizvedene električne energije, proizvedenu električnu energiju prodaju lokalno članovima zajednice čime se osigurava potrošnja električne energije na mjestu proizvodnje kao i dobrobit članova energetske zajednice. Nadalje, komercijalnim zgradama se otvara mogućnost pružanja usluga punjenja električnih vozila na parkingu zgrada članovima i ne članovima energetske zajednice. Pružanje usluga punjenja električnih vozila nečlanovima energetskih zajednica otvara se mogućnost dodatnog smanjenja troška rada energetske zajednice, a s druge strane i korist vlasnicima električnih vozila jer mogu povoljnije održavati stanje napunjenosti baterije električnog vozila. Osim pružanja usluga punjenja, otvara se mogućnost i primjene naprednih usluga kao što je V2B usluga, odnosno razmjena električne energije između električnih vozila i aktivnih kupaca primjenom koje se može postići povećanje ukupnog društvenog blagostanja. Također, osim navedenih usluga, energetske zajednice posjeduju određen stupanj fleksibilnosti u radu zbog integracije baterijskih sustava pohrane energije i električnih vozila što se može iskoristiti u pogledu odgode ulaganja u mrežnu infrastrukturu, uravnoteženja bilančne grupe te potencijalno povećanja potrošnje i uravnoteženja elektroenergetskog sustava, prema [99].

#### 4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



**Slika 4.1:** *Primjer energetske zajednice s prikazom informacijskih i energetske tokova*

Prilikom razvoja unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice potrebno je uzeti u obzir čimbenike neizvjesnosti kao što su proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora, potrošnja električne energije od strane aktivnog kupca, ponašanja vlasnika električnih vozila te i druge čimbenika koji u manjoj mjeri mogu utjecati na rezultate optimizacijskog problema (npr. vanjska temperatura i temperatura ulazne vode). U cilju osiguravanja izvedivosti optimizacijskog modela i pronalaska optimalnih rješenja predlaže se dvoslojni stohastički pristup za razvoj modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Pretpostavka prilikom razvoja optimizacijskog modela kao glavnog dijela sustava upravljanja energijom je da najveći utjecaj na izvedivost modela ima proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije jer je nemoguće točno predvidjeti proizvodnju električne energije, naročito iz fotonaponskih sustava koji su u najvećoj mjeri prisutni kod aktivnih kupaca. Shodno navedenom, prilikom razvoja optimizacijskog modela u obzir se uzima stohastika proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u višem sloju modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Predloženim pristupom uzet će se u obzir svi bitni scenariji koji mogu nastati. Termin stohastika se odnosi na nepredvidljivu prirodu proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora uzrokovanu fluktuacijama atmosferskih faktora.

Ponašanje vlasnika električnih vozila također ima utjecaj na izvedivost optimizacijskog modela jer se radi o znatnim snagama potrebnim za punjenje baterije električnog vozila. Pretpostavka prilikom razvoja optimizacijskog modela je da vlasnici električnih vozila donose dan unaprijed vrijeme dolaska na punionicu i vrijeme odlaska s punionice kao i stanje napunjenosti baterije s čime se osigurava dosta velika točnost ulaznih podataka. Ono što može biti problem je dolazak i odlazak na minutnoj razini kao i relativno mala odstupanja u stanju napunjenosti baterije što se nastoji riješiti u nižem sloju modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice kao i nedolazak vlasnika električnog vozila zbog izvanrednih okolnosti. Ako se radi o nedolasku jednog električnog vozila, sustav za upravljanje energijom bi u nižem sloju otklonio poremećaj ponovnim planiranjem rada ostalih sustava. S druge strane ono što dodatno osigurava izvedivost modela je da većina vlasnika električnih vozila ne određuje stanje napunjenosti baterije električnog vozila (osim onih koji imaju opravdan razlog), nego sustav nastoji osigurati povećanje ukupne društvene dobrobiti optimalnim održavanjem stanja napunjenosti baterije električnih vozila.

Promjene u potrošnji električne energije uzimat će se u obzir u nižem sloju modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice jer se radi o temeljnoj potrošnji odnosno kritičnim trošilima. S obzirom na to da se radi o temeljnoj potrošnji, očekuju se male devijacije potrošnje koje sustav za upravljanje energijom može riješiti u nižem sloju i osigurati izvedivost optimizacijskog modela.

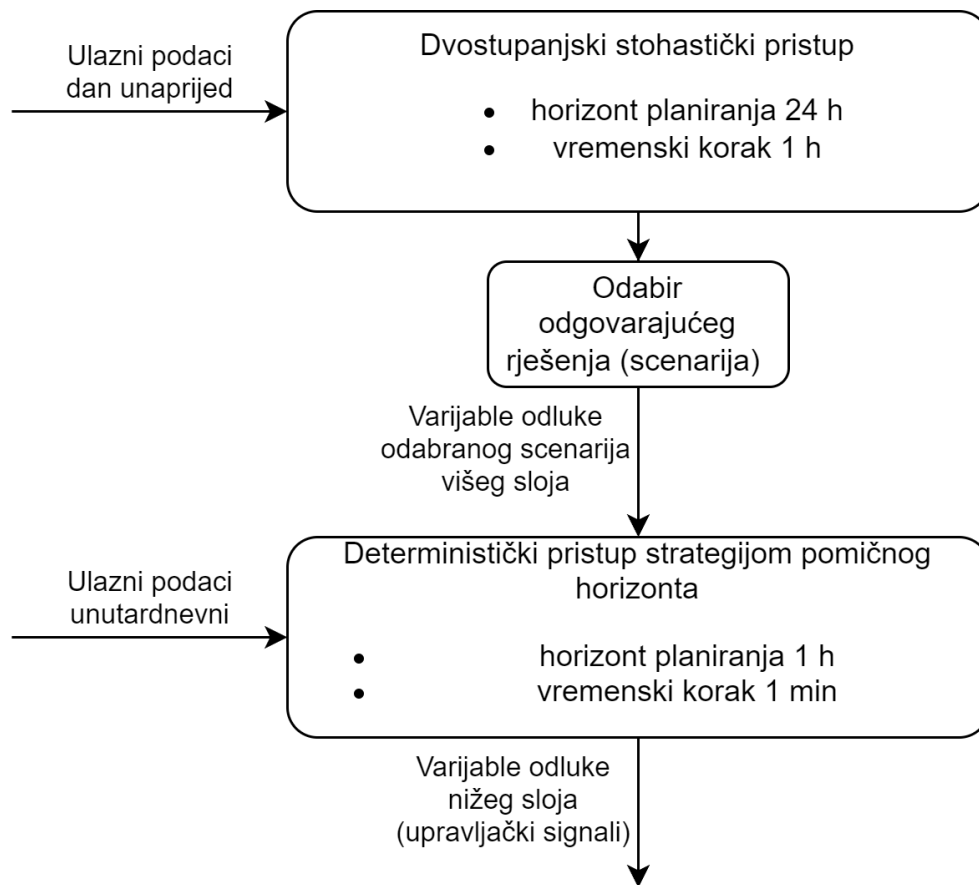
Vanjska temperatura ili temperatura tople vode mogu se predvidjeti s dovoljnom točnošću jer su sporo promjenjive veličine i nemaju znatan utjecaj na dobivene rezultate optimiza-



cijskog modela. Odstupanja u njihovim promjenama s obzirom na prognoze nastojat će se korigirati u nižem sloju modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Dvoslojnim pristupom prilikom razvoja sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice nastoji se riješiti nekoliko problema opisanih u nastavku. Jedan od problema koji se javlja je određivanje duljine vremenskog horizonta planiranja jer duljina vremenskog horizonta povoljno utječe na točnost rezultata optimizacije, a nepovoljno na vrijeme izvođenja simulacije. Nadalje, vremenski korak unutar horizonta planiranja utječe na točnost rješenja jer su unutar trajanja vremenskog koraka varijable odluke istog iznosa kao i ulazni podaci. Ovdje se javlja problem ako se radi o satnim vremenskim koracima jer je točnost rješenja upitna zbog duljine vremenskog koraka, dok s druge strane ako se radi o minutnim vremenskim koracima povećava se vrijeme izvršenja simulacije, ali se popravljiva točnost rješenja. Kao rješenje navedenih problema proizlazi primjena dvoslojnog pristupa, odnosno podjela sustava upravljanja energijom na viši i niži sloj, pri čemu se optimizacija u višem sloju može odraditi dan unaprijed dok se optimizacija u nižem sloju može odraditi unutar dnevnog, odnosno satnog unaprijed, slika 4.2. U višem sloju je dulji horizont planiranja što povoljno utječe na točnost rezultata, ali je dulji i vremenski korak što povoljno utječe na vremensko izvršenje optimizacijskog modela. Stohastika proizvodnje u višem sloju osigurava izvedivost optimizacijskog modela s obzirom na moguće scenarije proizvodnje. S druge strane, u nižem sloju horizont planiranja jednak je vremenskom koraku višeg sloja dok je vremenski korak znatno skraćen, odnosno osigurava upravljanje energijom u gotovo stvarnom vremenu. Također, niži sloj omogućuje korekciju rezultata višeg sloja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja i nove prognoze (unutar dnevnih) ulaznih podataka (vremenski korak ulaznih podataka jednak vremenskom koraku nižeg sloja), osiguravajući izvedivost optimizacijskog modela te točnost rezultata i vremenskog izvršenja optimizacijskog modela. Kao rezultat nižeg sloja dobiju se varijable odluke što su ujedno upravljački signali. Dvoslojnim pristupom omogućuje se razvoj sustava upravljanja energijom adekvatne računalne kompleksnosti uz visok stupanj točnosti rješenja optimizacijskog modela.

#### 4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



**Slika 4.2:** Predloženi pristup za razvoj unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

U cilju osiguranja izvedivosti optimizacijskog modela i pronalaska optimalnih rješenja predlaže se razvoj:

- Unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice uzimajući u obzir stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu.

Pojam unaprijeđeni se koristi jer se integriraju unaprijeđeni elementi energetske zajednice i električna vozila u odnosu na postojeće modele, dok se pojam adaptivni odnosi na korekcije rezultata višeg sloja u nižem sloju čime se osigurava povećavanje optimalnosti rješenja optimizacijskog modela te predloženi model predstavlja glavni znanstveni doprinos ove disertacije.

Predloženi unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice uzimajući u obzir stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu prikazuje slika 4.2. Predložena

realizacija unaprijedenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice je primjenom metoda matematičkog programiranja.

#### 4.1. Optimizacijski pristup primijenjen u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

Viši sloj modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom realiziran je pomoću metoda matematičkog programiranja, odnosno temelji se na mješovito cjelobrojnom nelinearnom programiranju (engl. *Mixed Integer Nonlinear Programming* - MINLP) [100].

Optimizacijski problema temeljen na mješovito cjelobrojnom nelinearnom programiranju sastoji se od funkcije cilja i pripadajućih ograničenja prema izrazima 4-1 i 4-2.

$$\text{maksimizirati ili minimizirati } f(x) + Dy \quad (4-1)$$

uz ograničenja:

$$\begin{aligned} g(x) + Hy &\leq 0 \\ L &\leq x \leq U \\ y &= \{0, 1, 2, \dots\} \end{aligned} \quad (4-2)$$

gdje su:

- |                      |   |   |
|----------------------|---|---|
| $x$                  | - | vektor varijabli koje su kontinuirani realni brojevi, |
| $y$                  | - | vektor varijabli koje su cjelobrojni brojevi,         |
| $f(x) + Dy$          | - | funkcija cilja,                                       |
| $g(x) + Hy$          | - | skup ograničenja,                                     |
| $L$ i $U$            | - | vektori donje i gornje granice varijabli,             |
| $y = 0, 1, 2, \dots$ | - | ograničenje integralnosti od $y$ .                    |

Kako viši sloj dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom uzima u obzir stohastiku proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, viši sloj je realiziran dvostupanjskim stohastičkim pristupom prikazanim na slici 4.3.

Prema [101], neka su  $x \in \mathbb{R}^n$  i  $y \in \mathbb{R}^m$  dvije varijable i neka je skup svih realizacija nepoznatih podataka dan s  $\Omega, \Omega = \{\omega_1 \dots \omega_s\} \subseteq \mathbb{R}^r$ , gdje je  $r$  broj slučajnih varijabli koje predstavljaju nesigurne parametre. Na osnovu navedenog, dvostupanjski stohastički pristup može se zapisati pomoću izraza 4-3 i 4-4 te 4-5 i 4-6.

$$\min_x z = c^T x + E[Q(x, \omega)] \quad (4-3)$$

uz ograničenja:

$$Ax = b, \quad x \geq 0 \quad (4-4)$$

gdje je:

$$Q(x, \omega) = \min_y q_\omega^T y(\omega) \quad (4-5)$$

uz ograničenja:

$$T_\omega x + W_\omega y(\omega) = h_\omega, \quad y(\omega) \geq 0, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (4-6)$$

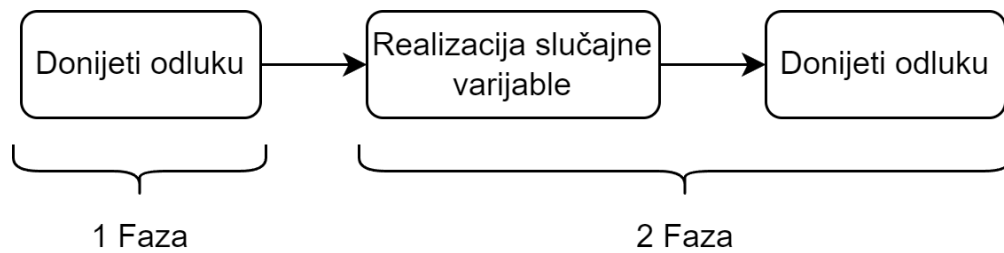
gdje su:

$z$	-	varijabla cilja (engl. <i>Objective variable</i> ),
$x$	-	varijabla odluke 1. faze,
$c^T$	-	koeficijenti troška funkcije cilja,
$E[Q(x, \omega)]$	-	očekivana vrijednost optimalnog rješenja problema 2. faze,
$A$	-	koeficijenti,
$b$	-	ograničenja 1. faze,
$y$	-	varijabla odluke 2. faze,
$T$	-	matrica prijelaza,
$W$	-	matrica regresa,
$h$	-	ograničenja 2. faze,
$\omega$	-	stohastički podaci.

Pri čemu izrazi 4-3 i 4-4 predstavljaju, odnosno definiraju 1. fazu (stupanj) problema dok izrazi 4-5 i 4-6 definiraju 2. fazu (stupanj) problema. Nadalje, važno je napomenuti da svi parametri i varijable odluke 2. faze ovise o realizaciji stohastičkih podataka  $\omega$  iz čega slijedi da je varijabla cilja  $z$  također slučajna varijabla jer je funkcija od  $\omega$ . Kako se slučajna varijable ne može optimizirati, stohastički *solver*-i automatizmom optimiziraju očekivanu vrijednost varijable cilja  $z$ . [101]

Primjenom dvostupanjskog stohastičkog pristupa, potrebno je donijeti odluku u 1. fazi prije poznavanja vrijednosti realizacije nesigurnih podataka. Uzimajući fiksno rješenje iz 1. faze i nove podatke, u 2. fazi moguće je poduzeti regresnu radnju (engl. *Recourse action*) i odrediti optimalno rješenje. Svaka moguća realizacija nesigurnih podataka predstavljena je  $\omega_s \in \Omega$  i naziva se scenarijem. Cilj je pronaći izvedivo rješenje koje minimizira ukupne troškove, odnosno zbroj troškova 1. faze i očekivanih troškova 2. faze. [101]

S obzirom na navedeno, dvostupanjski stohastički pristup omogućava fiksiranje iznosa određenih varijabli odluka 1. faze, bez obzira na mogući ishod 2. faze, na način ponovnog planiranja rada određenih trošila (s obzirom na novonastalu situaciju - scenarij). Navedeno omogućava, između ostalog, fiksiranje iznosa snage prilikom razmijene električne energije s mrežom i/ili lokalnim tržištem bez obzira na novonastalu situaciju, odnosno scenarij, što se može primijeniti na različitim tržištima električne energije.



**Slika 4.3:** Predložen dvoslojni stohastički pristup za realizaciju višeg sloja unaprijedenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

Viši sloj dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice realiziran je u GAMS-u, sustavu općeg algebarskog modeliranja [102]. Za rješavanja optimizacijskog modela temeljenog na mješovitom cjelobrojnom nelinearnom programiranju korišten je *solver* Lindo [103]. Neki od tipova optimizacijskih modela koje Lindo *solver* rješava temeljeni su na linearnom programiranju, mješovitom cjelobrojnom linearnom programiranju, nelinearnom programiranju i mješovitom cjelobrojnom nelinearnom programiranju. Lindo također rješava stohastičke modele koji se implementiraju u GAMS pomoću proširenog matematičkog programiranja (engl. Extended Mathematical Programming - EMP) [104]. Nadalje, za generiranje scenarija, u ovom slučaju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, odnosno fotonaponske elektrane, predložena je Monte Carlo simulacija.

Funkcija cilja višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice je minimiziranje društvenog troška te je optimizacijski model detaljno prikazan u 5. poglavlju.

## 4.2. Optimizacijski pristup primijenjen u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

Niži sloj dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice realiziran je kao deterministički model, uz to da se u nižem sloju u obzir uzimaju stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu.

Razvijen metodom matematičkog programiranja, odnosno mješovitog cjelobrojnog neli-

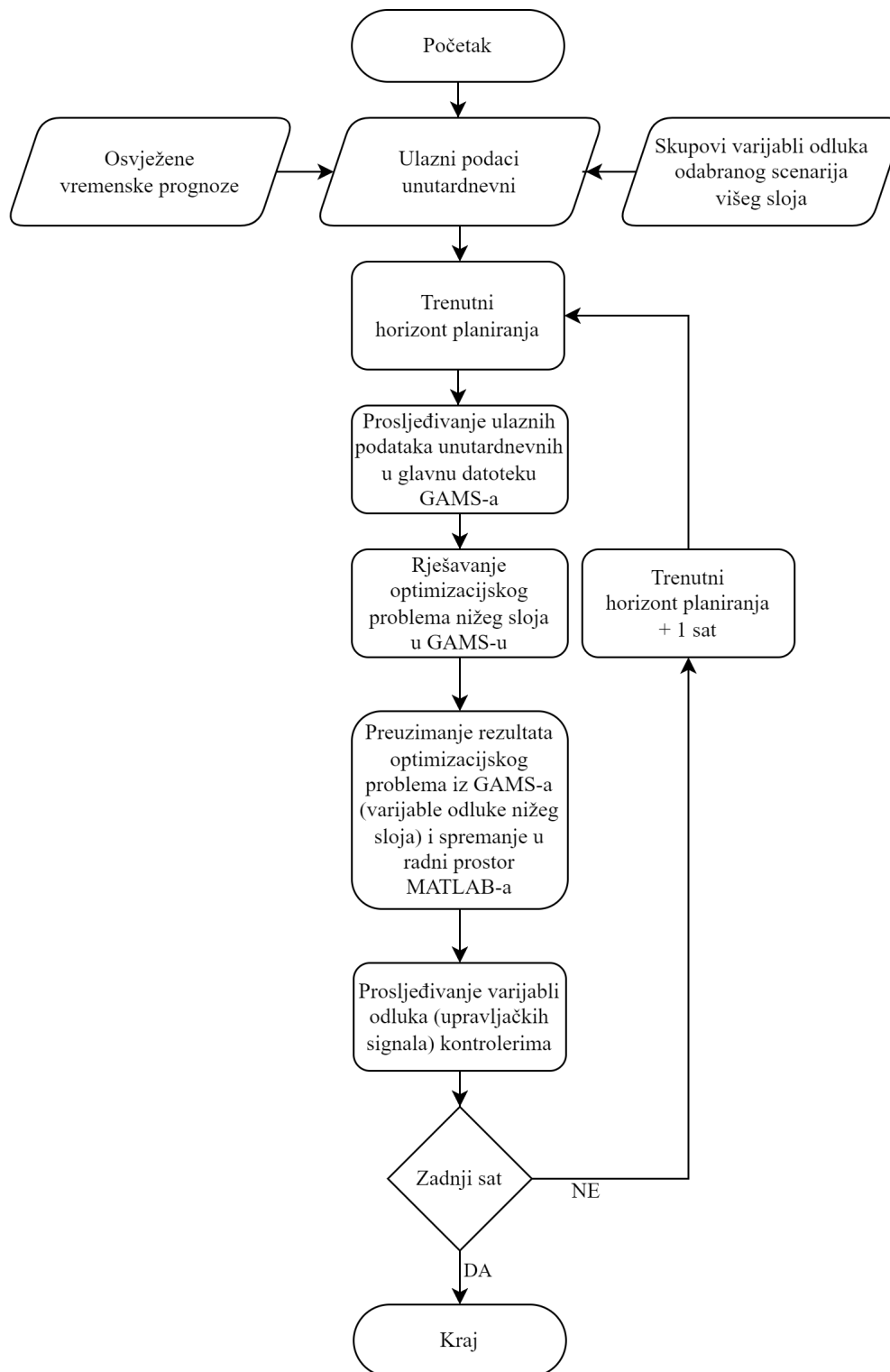
nearnog programiranja, niži sloj se može zapisati pomoću funkcije cilja 4-1 i pripadajućih ograničenja 4-2 kao i u slučaju višeg sloja.

Niži sloj dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice realiziran je u GAMS-u, sustavu općeg algebarskog modeliranja [102]. Za rješavanja optimizacijskog modela temeljenog na mješovito cjelobrojnom nelinearnom programiranju i proširenom matematičkom programiranju korišten je *solver* Lindo [103]. Prošireno matematičko programiranje u nižem sloju osigurava kraće vrijeme izvršavanja optimizacijskog problema nižeg sloja [104]. Implementacija je ista kao i u slučaju višeg sloja, ali se u obzir ne uzima stohastika proizvodnje električne iz obnovljivih izvora, nego samo stohastičke odluke iz višeg sloja.

S obzirom na već navedeno, optimizacijski problem višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice izvodi se dan unaprijed odnosno prije početka promatranog horizonta planiranja. Shodno tomu, satni rezultati dobiveni rješanjem optimizacijskog problema višeg sloja prosljeđuju se nižem sloju. S obzirom na to da se stohastičke odluke višeg sloja uzimaju u obzir, ovdje se mora odabrati scenarij s realnom mogućnošću nastanka te se varijable odluke odabranog scenarija višeg sloja prosljeđuju nižem sloju. Kako je vremenski korak višeg sloja 1 sat i duljina horizonta planiranja 24 sata, nižem sloju se prosljeđuje ukupno 24 skupa podataka varijabli odluka. Svaki skup podataka varijabli odluka definira jedan satni horizont planiranja u nižem sloju uz 1 minutni vremenski korak, gdje vremenski korak optimizacijskog problema predstavlja jednu radnu točku. Nadalje, ulazni unutar-dnevni podaci potrebni za rješenje optimizacijskog problema su osvježene 1 minutne prognoze za naredni horizont planiranja od 1 sat.

S obzirom na gore navedeno, neophodno je implementirati strategiju pomičnog horizonta u cilju rješavanja optimizacijskog problema nižeg sloja kroz cijeli vremenski horizont planiranja od 24 sata iz višeg sloja. Strategija pomičnog horizonta realizirana je u MATLAB-u [105] prema algoritmu prikazanom na slici 4.4.

4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



**Slika 4.4:** Predložen algoritam implementacije strategije pomičnog horizonta u cilju rješavanja optimizacijskog problema nižeg sloja kroz cijeli vremenski horizont planiranja iz višeg sloja

Funkcija cilja nižeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice je minimiziranje društvenog troška uzimajući u obzir stohastičke odluke višeg sloja te je optimizacijski model detaljno prikazan u 5. poglavlju.



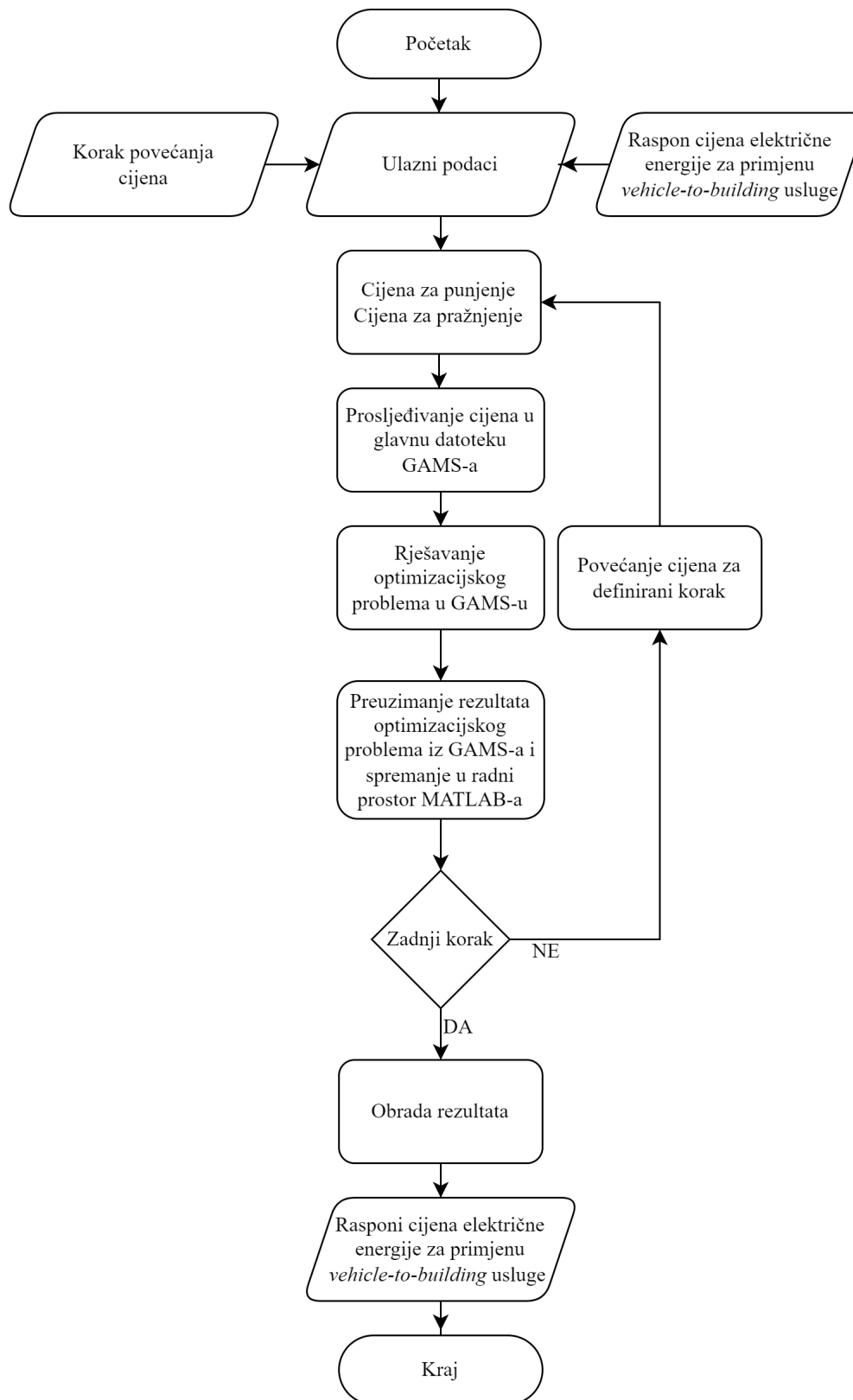
### 4.3. Optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge u komercijalnim zgradama

Primjena V2B usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i aktivnih kupaca zahtjeva određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i mreže, odnosno u ovom konkretnom slučaju između električnih vozila i komercijalnih zgrada. U ovoj disertaciji jedan od znanstvenih doprinosa je razvoj optimizacijskog algoritma za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada.

Realizacija optimizacijskog algoritma za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada napravljena je pomoću GAMS-a [102] i MATLAB-a [105]. U GAMS-u je razvijen optimizacijski model višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice, ne uzimajući u obzir stohastiku proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, u cilju određivanja varijabli odluka dan unaprijed. S druge strane, u MATLAB-u je razvijen optimizacijski algoritam za određivanje cijena razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada.

Optimizacijski algoritam prikazan je na slici 4.5. Prvi korak prilikom određivanja optimalnih cijena je unijeti dozvoljene raspone cijena električne energije za primjenu V2B usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada te korak povećanja cijena. Početno unesene cijene se prosljeđuju iz MATLAB-a u glavnu datoteku GAMS-a te se rješava optimizacijski problem u GAMS-u za kombinaciju prosljeđenih cijena. U idućem koraku preuzimaju se rezultati optimizacijskog problema iz GAMS-a i spremaju se u radni prostor MATLAB-a. U posljednjem koraku se provjerava mogućnost povećanja cijena, ako su cijene u postavljenom rasponu, postupak se ponavlja, ako nisu, obrađuju se rezultati i određuju optimalne cijene električne energije za primjenu V2B usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada.

Prilikom određivanja optimalnih cijena u obzir se može uzeti samo vrijednost funkcije cilja i odrediti jedinstvene cijene. S druge strane, može se uzeti u obzir dobrobit koju ostvaruje energetska zajednica i dobrobit koju ostvaruju vlasnici električnih vozila te se mogu izraditi rasponi cijena pomoću kojih je moguće ostvariti pregovore između komercijalnih zgrada i vlasnika električnih vozila.



**Slika 4.5:** Algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu vehicle-to-building usluge

Dio matematičkog modela integriranog u viši sloj dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice prikazan je i opisan u nastavku.

#### 4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

Ograničenje snage punjenja ( $Pev_{p,ev,t}^{ch,AC}$  [kW]) električnog vozila, definirano izrazom 4-7, ovisit će o cijeni punjenja baterije električnog vozila na punionici komercijalne zgrade. Ako je cijena punjenja baterije električnog vozila, koju vlasnik može platiti, manja od cijena punjenja baterije električnog vozila koju je komercijalna zgrada ponudila (izraz 4-8), sustav upravljanja energijom neće dozvoliti punjenje.

$$Pev_{p,ev,t}^{ch,AC} = 0 \quad (4-7)$$

$$C_p^{evch} > C_{ev}^{evch} \quad (4-8)$$

Ograničenje snage pražnjenja ( $Pev_{p,ev,t}^{dch,AC}$  [kW]) električnog vozila definirano je izrazom 4-9 koje će također ovisiti o cijeni pražnjenja baterije električnog vozila na punionici komercijalne zgrade. Hoće li sustav upravljanja energijom omogućiti pražnjenje baterije električnog vozila ovisi o cijeni pražnjenja baterije električnog vozila koju će komercijalna zgrada ponuditi vlasnicima električnog vozila. Prvi slučaj zabrane pražnjenja baterije električnog vozila je veća cijena punjenja baterije električnog vozila koju je vlasnik platio za punjenje od cijene pražnjenja baterije električnog vozila koju je komercijalna zgrada ponudila (izraz 4-10). Drugi slučaj zabrane je veća cijena pražnjenja baterije električnog vozila koju vlasnik može ostvariti na drugoj lokaciji od cijene pražnjenja baterije električnog vozila koju je komercijalna zgrada ponudila (izraz 4-11).

$$Pev_{p,ev,t}^{dch,AC} = 0 \quad (4-9)$$

$$C_p^{evdch} < C_{ev}^{evch} \quad (4-10)$$

$$C_p^{\text{evdch}} < C_{ev}^{\text{evdch}} \quad (4-11)$$

gdje su:

- $C_p^{\text{evch}}$  [€/kWh] - cijena električne energije za punjenje baterije električnog vozila na parkingu zgrade (varijabla),
- $C_p^{\text{evdch}}$  [€/kWh] - cijena električne energije za pražnjenja baterije električnog vozila na parkingu zgrade (varijabla),
- $C_{ev}^{\text{evch}}$  [€/kWh] - cijena električne energije za punjenje baterije električnog vozila izvan parkinga zgrade,
- $C_{ev}^{\text{evdch}}$  [€/kWh] - cijena električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila izvan parkinga zgrade.

Na osnovu aktivacije snage punjenja ( $Pe_{p,ev,t}^{\text{ch,AC}}$  [kW]) ili pražnjenja ( $Pe_{p,ev,t}^{\text{dch,AC}}$  [kW]) baterije električnog vozila, radi se naplata, odnosno računa se trošak/dobrobit. Ovakav pristup ograničava da sustav nepotrebno puni ili prazni bateriju što povoljnije utječe na životni vijek baterije, a s druge strane i na smanjenje kompleksnosti optimizacijskog modela.

Trošak punjenja baterije električnog vozila na punionici komercijalne zgrade ( $C_{1,p,ev}$  [€]), odnosno postignuta dobrobit vlasnika električnog vozila u pružanju V2B usluge, definiran je izrazom 4-12 uz zadovoljavanje ograničenja 4-13.

$$C_{1,p,ev} = (SOE_{ev_{p,ev,t=last}} - SOE_{ev_{p,ev,t=1}}) \cdot (C_p^{\text{evch}} - C_{ev}^{\text{evch}}) \quad (4-12)$$

$$C_p^{\text{evch}} \leq C_{ev}^{\text{evch}} \quad (4-13)$$

gdje su:

#### 4. Dvoslojni adaptivni sustav za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$SOE_{ev,p,ev,t=last}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije električnog vozila u prvom vremenskom koraku  $t$ ,

$SOE_{ev,p,ev,t=1}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije električnog vozila u posljednjem vremenskom koraku  $t$  na punionici.

U slučaju da ograničenje (4-13) nije zadovoljeno, trošak punjenja baterije električnog vozila definiran je prema izrazu 4-14 i ograničenju 4-15.

$$C1_{p,ev} = 0 \quad (4-14)$$

$$C_p^{evch} > C_{ev}^{evch} \quad (4-15)$$

Zarada od pražnjenja baterije električnog vozila na punionici komercijalne zgrade ( $C2_{p,ev}$  [€]), odnosno dobit vlasnika električnog vozila za pružanje V2B usluge, definirana je izrazom 4-16 uz zadovoljavanje ograničenja 4-17 i 4-18.

$$C2_{p,ev} = (SOE_{ev,p,ev,t=last} - SOE_{ev,p,ev,t=1}) \cdot (C_{ev}^{evdch} - C_p^{evdch}) \quad (4-16)$$

$$C_p^{evdch} \geq C_{ev}^{evch} \quad (4-17)$$

$$C_p^{evdch} \geq C_{ev}^{evdch} \quad (4-18)$$

Ako ograničenja 4-17 i 4-18 nisu zadovoljena, zarada je definirana prema izrazu 4-19 za koja vrijede ograničenja 4-20 i 4-21.

$$C2_{p,ev} = 0 \quad (4-19)$$

$$C_p^{evdch} < C_{ev}^{evch} \quad (4-20)$$

$$C_p^{evdch} < C_{ev}^{evdch} \quad (4-21)$$

Trošak punjenja i zarada od pražnjenja baterije električnog vozila na punionici komercijalne zgrade ( $C1_{p,ev}$  [€]) i ( $C2_{p,ev}$  [€]) dio su funkcije cilja minimizacije ukupnog društvenog troška.

## 5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

### 5.1. Funkcija cilja višeg sloja

Funkcija cilja višeg sloja predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice sastoji se od više članova, pri čemu se određeni članovi mogu zanemariti u ovisnosti o istraživanju određenih utjecaja.

Prvi član funkcije cilja višeg sloja ( $C_1$ ) odnosi se na minimizaciju troška električne energije aktivnog kupca odnosno energetske zajednice, uzimajući u obzir izmjenu električne energije s mrežom i na lokalnom tržištu te je prikazan izrazom 5-1.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \{Eg_{p,t}^{\text{imp}} \cdot Cg_{p,t}^{\text{imp}} - Eg_{p,t}^{\text{exp}} \cdot Cg_p^{\text{exp}} + El_{p,t}^{\text{imp}} \cdot Cl_t^{\text{imp}} - El_{p,t}^{\text{exp}} \cdot Cl_t^{\text{exp}}\} \quad (5-1)$$

gdje su:

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$Eg_{p,t}^{\text{imp}}$ [kWh]	-	količina električne energije preuzete iz mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Eg_{p,t}^{\text{exp}}$ [kWh]	-	količina električne energije predane u mrežu u vremenskom koraku $t$ ,
$Cg_{p,t}^{\text{imp}}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije preuzete iz mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Cg_p^{\text{exp}}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije predane u mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$El_{p,t}^{\text{imp}}$ [kWh]	-	količina električne energije preuzete s lokalnog tržišta u vremenskom koraku $t$ ,
$El_{p,t}^{\text{exp}}$ [kWh]	-	količina električne energije predane na lokalno tržište u vremenskom koraku $t$ ,
$Cl_t^{\text{imp}}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije preuzete s lokalnog tržišta u vremenskom koraku $t$ ,
$Cl_t^{\text{exp}}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije predane na lokalno tržište u vremenskom koraku $t$ .

Drugi član funkcije cilja višeg sloja ( $C_2$ ) odnosi se na minimizaciju trošak električne energije aktivnog kupca odnosno zgrade primjenom *vehicle-to-building* usluge te je prikazan izrazom 5-2.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{ev=1}^{EV} \sum_{t=1}^T \{E_{p,ev,t}^{\text{evdch}} \cdot C_p^{\text{evdch}} - E_{p,ev,t}^{\text{evch}} \cdot C_p^{\text{evch}}\} \quad (5-2)$$

gdje su:



5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$E_{p,ev,t}^{evdch}$ [kWh]	-	količina električne energije dobivena pražnjenjem baterije električnog vozila u vremenskom koraku $t$ ,
$E_{p,ev,t}^{evch}$ [kWh]	-	količina električne energije potrebna za punjenje baterije električnog vozila u vremenskom koraku $t$ ,
$C_p^{evdch}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije dobivene pražnjenjem baterije električnog vozila u vremenskom koraku $t$ ,
$C_p^{evch}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije potrebne za punjenje baterije električnog vozila u vremenskom koraku $t$ .

Treći član funkcije cilja višeg sloja ( $C_3$ ) odnosi se na minimiziranje troška angažirane vršne radne snage prilikom preuzimanja električne energije iz mreže te je prikazan izrazom 5-3.

$$\sum_{p=1}^P \{P g_p^{\text{imp,max}} \cdot C g_{kW}^{\text{imp}}\} + C_{\text{sup}} + C_{\text{emp}} \quad (5-3)$$

gdje su:

$P g_p^{\text{imp,max}}$ [kW]	-	angažirana vršna radna snaga iz mreže unutar obračunskog razdoblja,
$C g_{kW}^{\text{imp}}$ [€/kW]	-	cijena angažirane vršne radne snage iz mreže,
$C_{\text{sup}}$ [€/mj]	-	naknada za opskrbu električnom energijom,
$C_{\text{emp}}$ [€/mj]	-	naknada za mjerno mjesto.

Četvrti član funkcije cilja višeg sloja ( $C_4$ ) odnosi se na minimiziranje virtualnog troška degradacije baterije električnog vozila te je prikazan izrazom 5-4.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{ev=1}^{EV} \sum_{t=1}^T \{C_{p,ev,t}^{\text{evcyc}} + C_{p,ev,t}^{\text{evcal}}\} \quad (5-4)$$

gdje su:

5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

- $C_{p,ev,t}^{evcyc}$  [€] - virtualni trošak cikličkog starenja baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ ,
- $C_{p,ev,t}^{evcal}$  [€] - virtualni trošak kalendarskog starenja baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ .

Peti član funkcije cilja višeg sloja ( $C_5$ ) odnosi se na minimiziranje virtualnog troška degradacije baterije sustava za pohranu energije te je prikazan izrazom 5-5.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T \{C_{p,b,t}^{besscyc} + C_{p,b,t}^{besscal}\} \quad (5-5)$$

gdje su:

- $C_{p,b,t}^{bcyc}$  [€] - virtualni trošak cikličkog starenja baterije sustava za pohranu energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $C_{p,b,t}^{bcal}$  [€] - virtualni trošak kalendarskog starenja baterije sustava za pohranu energije u vremenskom koraku  $t$ .

Uzimajući u obzir gore navedeno odnosno istraživanje različitih utjecaja navedenih članova funkcije cilja na vrijednost funkcije cilja, izrazi 5-4 i 5-5 mogu se s obzirom na istraživanje i provedbu analiza osjetljivosti zanemariti.

Šesti član funkcije cilja višeg sloja ( $C_6$ ) odnosi se na minimiziranje troška održavanja razine napunjenosti baterije električnog vozila primjenom *vehicle-to-building* usluge te je prikazan izrazom 5-6.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{ev=1}^{EV} \{C1_{p,ev} + C2_{p,ev}\} \quad (5-6)$$

gdje su:

- $C1_{p,ev}$  [€] - trošak prilikom punjenja baterije električnog vozila,
- $C2_{p,ev}$  [€] - zarada prilikom pražnjenja baterije električnog vozila.

Funkcija cilja višeg sloja predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice, uzimajući u obzir sve navedene članove, može se zapisati prema izrazu 5-7.

$$\min\{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6\} \quad (5-7)$$

### 5.1.1. Funkcija cilja višeg sloja (opcionalno)

Funkcija cilja višeg sloja predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice posjeduje mogućnost proširenja tako da se u obzir uzmu određene strategije ulaganja.

Strategije ulaganja koje pokazuju interes potrošača su:

- Društveno odgovorno ulaganje (engl. *Socially Responsible Investing* - SRI);
- Okolišno, društveno i korporativno upravljanje (engl. *Environmental, Social, and Corporate Governance* - ESG).

Navedene strategije ulaganja u obzir uzimaju utjecaj na okoliš, što je želja većine potrošača, dok proizvođačima brendiranje tvrtke kao "zelene" donosi određene prednosti u poslovanju. Nadalje, uloga energetske zajednice odnosno osnivanje energetske zajednice i optimalno upravljanje energijom može se lako staviti u kontekst podržavanja SRI i ESG. [106]

Kako je već ranije navedeno, osnivanje energetske zajednice građana i optimalno upravljanje energijom unutar istih doprinosi globalnim i lokalnim klimatskim i energetske ciljevima. Grupirani aktivni i pasivni kupci električne energije unutar energetske zajednice osiguravaju povoljnije cijene električne energije u odnosu na one iz mreže ili prema mreži (cijene od opskrbljivača električne energije). Shodno navedenom, potiče se lokalna potrošnja proizvedene električne energije, najčešće iz obnovljivih izvora električne energije, što pridonosi manjem uvozu električne energije iz mreže. Uvozom električne energije iz mreže direktno se utječe na emisiju  $CO_2$  prema izrazu 5-8.

$$CO_2^e = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \{Eg_{p,t}^{imp} \cdot CO_2^{intensity}\} \quad (5-8)$$

5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

Proširena funkcija cilja višeg sloja predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom je prikazana izrazom 5-9.

$$\min\{FS \cdot Eco \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6) + Env \cdot (CO_2^e)\} \quad (5-9)$$

Predloženim proširenjem, jednociljna funkcija cilja višeg sloja modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom postaje višeciljna funkcija cilja koja se može zapisati prema izrazu 5-10.

$$\min\{FS \cdot Eco \cdot Obj_1 + Env \cdot Obj_2\} \quad (5-10)$$

gdje su:

$FS$	-	faktor skaliranja,
$Eco$ i $Env$	-	težinski faktori višeciljne optimizacije,
$Obj_1$ [€]	-	ekonomski cilj,
$Obj_2$ [kg]	-	okolišni cilj,
$CO_2^{\text{intensity}}$ [kg/kWh]	-	ugljični intenzitet u mješavini proizvodnje električne energije,
$CO_2^e$ [kg]	-	ukupna emisija $CO_2$ .

Pomoću težinskih faktora  $Eco$  i  $Env$  postiže se željeno ponašanje višeg sloja modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom. Ograničenje iznosa (vrijednosti) težinskih faktora može se zapisati pomoću izraza 5-11. [61]

$$Eco + Env = 1 \quad (5-11)$$

U cilju pronalaska optimalnih vrijednosti težinskih faktora, zadovoljavanje ekonomskog i okolišnog cilja, neophodno je optimizacijski problem riješiti primjenom Pareto optimizacije. Pareto optimizacijom nastoji se pronaći optimalno rješenje pri kojemu jedan cilj ne djeluje na drugi, odnosno u obzir se uzimaju oba cilja. [61]

Uz prisutnost dvije funkcije cilja i u slučaju konveksnih problema, Pareto optimizacijom moguće je pronalaženje svih rješenja koje pripadaju Pareto fronti [107, 108].

Faktor skaliranja  $FS$  osigurava da se iznosi (vrijednosti) prvog i drugog cilja skaliraju na podjednake iznose (vrijednosti). Ovo je neophodno napraviti jer je prvi cilj ekonomski (trošak [€]) dok je drugi okolišni (ukupna emisija  $CO_2$  [kg]). Ograničenje faktora skaliranja prikazan je izrazom 5-12. [61]

$$0 \leq FS \leq 1 \quad (5-12)$$

Predloženo proširenje funkcije cilja moglo bi se koristiti u višem sloju modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice u cilju ispitivanja mogućeg smanjenja utjecaja na okoliš osnivanjem energetske zajednice i optimalnim upravljanjem energijom unutar energetske zajednice.

## 5.2. Funkcija cilja nižeg sloja

Funkcija cilja nižeg sloja predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice sastoji se od istih članova kao i funkcija cilja višeg sloja te je prikazana izrazom 5-13.

$$\begin{aligned} & \min \sum_{p=1}^P \sum_{t_2=1}^{T_2} C_{1,p,t_2}^{\text{niži sloj}} + \sum_{ev=1}^{EV} \sum_{t_2=1}^{T_2} C_{2,p,ev,t_2}^{\text{niži sloj}} \\ & + \sum_{ev=1}^{EV} \sum_{t_2=1}^{T_2} C_{4,p,ev,t_2}^{\text{niži sloj}} + \sum_{b=1}^B \sum_{t_2=1}^{T_2} C_{5,p,b,t_2}^{\text{niži sloj}} + \sum_{ev=1}^{EV} C_{6,p,ev}^{\text{niži sloj}} \end{aligned} \quad (5-13)$$

gdje su:

## 5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$C_{1p,t_2}^{\text{niži sloj}}$ [€]	-	trošak izmjene električne energije s mrežom i na lokalnom tržištu u vremenskom koraku $t_2$ ,
$C_{2p,ev,t_2}^{\text{niži sloj}}$ [€]	-	trošak izmjene električne energije aktivnog kupca odnosno zgrade s električnim vozilima u vremenskom koraku $t_2$ ,
$C_{4p,ev,t_2}^{\text{niži sloj}}$ [€]	-	virtualni trošak degradacije baterije električnog vozila u vremenskom koraku $t_2$ ,
$C_{5p,b,t_2}^{\text{niži sloj}}$ [€]	-	virtualni trošak degradacije baterije sustava za pohranu energije u vremenskom koraku $t_2$ ,
$C_{6p,ev}^{\text{niži sloj}}$ [€]	-	trošak održavanja razine napunjenosti baterije električnog vozila primjenom <i>vehicle-to-building</i> usluge.

U nižem sloju predloženog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom ne uzima se u obzir treći član funkcije cilja višeg sloja (C3) jer se vrijednosti varijabla odluka odabranog scenarija višeg sloja prosljeđuju nižem sloju.

U nižem sloju nastoji se minimizirati ukupni društveni trošak uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja odabranog scenarija koje su dobivene dan unaprijed za vremenski horizont planiranja od 24 sata s vremenskim korakom od 1 sat. Kako je objašnjeno u 4. poglavlju, horizont planiranja u nižem sloju je 1 sat s vremenskim korakom od 1 minute iz čega proizlazi da sustav donosi odluke u gotovo stvarnom vremenu.

Varijable odluka višeg sloja koje se prosljeđuju nižem sloju su:

- stanja napunjenosti baterija električnog vozila za svakog aktivnog kupca u vremenskom koraku  $t$ ,
- stanja napunjenosti baterija sustava pohrane energije za svakog aktivnog kupca u vremenskom koraku  $t$ ,
- snage sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije potrebne za održavanje unutarnje temperature prostora za svakog aktivnog kupca u vremenskom koraku  $t$ ,
- snage sustava za pripremu tople vode potrebne za održavanje temperature tople vode za svakog aktivnog kupca u vremenskom koraku  $t$ .

Na osnovu poznatih stanja napunjenosti baterija električnog vozila i baterija sustava pohrane energije na početku i kraju vremenskog horizonta planiranja nižeg sloja, sustav

upravljanja energijom u nižem sloju je u mogućnosti donijeti optimalne odluke u vremenskom koraku od 1 minute. Snage sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije i sustava za pripremu tople vode dobivene iz višeg sloja se prosljeđuju nižem sloju sustava upravljanja energijom u cilju osiguravanja potrebe za održavanjem temperature prostora i tople vode. Prosljeđivanjem varijabli odluka višeg sloja nižem sloju sustava upravljanja energijom se osigurava postizanje globalnog optimuma nižeg sloja primjenom pristupa pomičnog horizonta.

Potrebni ulazni podaci za provedenje optimizacije u nižem sloju sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice su minutni s obzirom na vremenski korak nižeg sloja. Uzimajući u obzir ulazne podatke na minutnoj razini izbjegava se pogreška koja nastaje prilikom usrednjavanja ulaznih podataka, naročito na satnoj razini. Nadalje, pristup pomičnog horizonta osigurava provođenje optimizacije u nižem sloju sat unaprijed čime se osigurava veća točnost jer se u obzir uzimaju novonastale satne prognoze.

Uzimajući u obzir stanja napunjenosti baterija električnog vozila i baterija sustava pohrane energije, nižem sloju sustava upravljanja se osigurava fleksibilnost s obzirom na novonastale prognoze, ali i uvid u buduća stanja.

### 5.3. Modeli upravljivih trošila električne energije

Prilikom modeliranja sustava upravljanja energijom neophodno je definirati jednadžbu balansa snage, što ujedno predstavlja i jedno od bitnijih ograničenje modela, jer se mora osigurati da je potrošnja električne energije jednaka proizvodnji električne energije u svakom vremenskom koraku  $t$ . Jednadžba balansa snaga može se zapisati pomoću izraza 5-14.

$$\begin{aligned}
 Pde_{p,t}^{\text{AC}} - Pge_{p,t}^{\text{AC}} + Pbess_{p,t}^{\text{tot}} + Pev_{p,t}^{\text{tot}} + Phvac_{p,t}^{\text{tot}} + Pwh_{p,t}^{\text{tot}} + Pip_{p,t}^{\text{tot}} + Pdw_{p,t}^{\text{tot}} + Pwm_{p,t}^{\text{tot}} \\
 = Pg_{p,t}^{\text{imp}} - Pg_{p,t}^{\text{exp}} + Pl_{p,t}^{\text{imp}} - Pl_{p,t}^{\text{exp}}
 \end{aligned}
 \tag{5-14}$$

gdje su:

5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

$Pde_{p,t}^{AC}$ [kW]	-	ukupna snaga neupravljivih trošila električne energije u vremenskom koraku $t$ ,
$Pge_{p,t}^{AC}$ [kW]	-	snaga proizvodnje električne energije fotonaponskog sustava u vremenskom koraku $t$ ,
$Pbess_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga baterijskih sustava za pohranu energije u vremenskom koraku $t$ ,
$Pev_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga punionica baterija električnih vozila u vremenskom koraku $t$ ,
$Phvac_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije u vremenskom koraku $t$ ,
$Pwh_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga sustava za pripremu tople vode u vremenskom koraku $t$ ,
$Pg_{p,t}^{imp}$ [kW]	-	snaga preuzimanja električne energije iz mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Pg_{p,t}^{exp}$ [kW]	-	snaga predaje električne energije u mrežu u vremenskom koraku $t$ ,
$Pl_{p,t}^{imp}$ [kW]	-	snaga preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta u vremenskom koraku $t$ ,
$Pl_{p,t}^{exp}$ [kW]	-	snaga predaje električne energije na lokalno tržište u vremenskom koraku $t$ ,
$Pip_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga proizvodnog procesa u vremenskom koraku $t$ ,
$Pdw_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga perilica suđa u vremenskom koraku $t$ ,
$Pwm_{p,t}^{tot}$ [kW]	-	ukupna snaga perilica rublja u vremenskom koraku $t$ .

Ukupna snaga baterijskih sustava pohrane energije jednaka je pojedinačnim snagama potrebnim za punjenje baterija sustava za pohranu energije ( $Pbess_{p,b,t}^{ch,AC}$  [kW]) i/ili dobivenih pražnjenjem baterija sustava za pohranu energije ( $Pbess_{p,b,t}^{dch,AC}$  [kW]) na AC strani prema izrazu 5-15.

$$Pbess_{p,t}^{tot} = \sum_{b=1}^B \{Pbess_{p,b,t}^{ch,AC} - Pbess_{p,b,t}^{dch,AC}\} \quad (5-15)$$

Isto se primjenjuje i na punionice električnih vozila te je ukupna snaga punionica elek-



5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

tričnih vozila jednaka pojedinačnim snagama potrebnim za punjenje baterija električnih vozila ( $Pe_{p,ev,t}^{ch,AC}$  [kW]) i/ili dobivenih pražnjenjem baterija električnih vozila ( $Pe_{p,ev,t}^{dch,AC}$  [kW]) na AC strani prema izrazu 5-16.

$$Pe_{p,t}^{tot} = \sum_{ev=1}^{EV} \{Pe_{p,ev,t}^{ch,AC} - Pe_{p,ev,t}^{dch,AC}\} \quad (5-16)$$

Ukupna snaga sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije (engl. Heating, Ventilation, and Air Conditioning - HVAC) jednaka je pojedinačnim snagama potrebnim za grijanje prostora ( $Phvac_{p,hvac,t}^{heat}$  [kW]) i/ili potrebnim za hlađenje prostora ( $Phvac_{p,hvac,t}^{cool}$  [kW]) prema izrazu 5-17.

$$Phvac_{p,t}^{tot} = \sum_{hvac=1}^{HVAC} \{Phvac_{p,hvac,t}^{heat} + Phvac_{p,hvac,t}^{cool}\} \quad (5-17)$$

Osim izračuna ukupne snage sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije neophodno je u obzir uzeti instaliranu (nazivnu) snagu sustava jer se radi o dinamički upravljivim trošilima kojima snaga može poprimiti bilo koju vrijednost između 0 kW i instalirane (nazivne) snage. Ograničenja dozvoljenih snaga prilikom rada sustava, odnosno grijanja i hlađenja prostora, mogu se zapisati pomoću izraza 5-18 i 5-19.

$$Phvac_{p,hvac,t}^{heat} \leq Phvac_{max} \cdot Phvac_{p,hvac,t}^{heat} \quad (5-18)$$

$$Phvac_{p,hvac,t}^{cool} \leq Phvac_{max} \cdot Phvac_{p,hvac,t}^{cool} \quad (5-19)$$

Uz ograničenja dozvoljenih snaga prilikom rada sustava neophodno je definirati da sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije može raditi istovremeno u samo jednom načinu rada, odnosno grijati ili hladiti prostor. Ograničenje načina rada može se zapisati pomoću izraza 5-20.

$$Phvacb_{p,hvac,t}^{\text{heat}} + Phvacb_{p,hvac,t}^{\text{cool}} \leq 1 \quad (5-20)$$

gdje su:

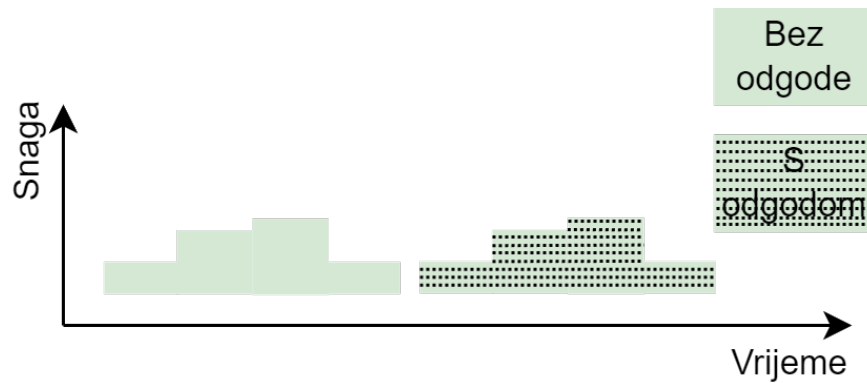
- $Phvac_{\text{max}}$  [kW] - instalirana (nazivna) snaga sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije,
- $Phvacb_{p,hvac,t}^{\text{heat}}$  - binarna varijabla odluke za grijanje prostora u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Phvacb_{p,hvac,t}^{\text{cool}}$  - binarna varijabla odluke za hlađenje prostora u vremenskom koraku  $t$ .

Ukupna snaga sustava za pripremu tople vode jednaka je produktu instalirane (nazivne) snage sustava za pripremu tople vode ( $Php$  [kW]) i binarne varijable odluke za grijanje tople vode ( $Phb_{p,wh,t}$ ) jer se radi o statički upravljivim trošilima kojima snaga može poprijeti samo dvije vrijednosti, vrijednost 0 kW (isključeno) i maksimalnu odnosno instaliranu (nazivnu) vrijednost snage (uključeno) te se može zapisati prema izrazu 5-21.

$$Ph_{p,t}^{\text{tot}} = \sum_{wh=1}^{WH} \{Php \cdot Phb_{p,wh,t}\} \quad (5-21)$$

### 5.3.1. Trošila s mogućnošću pomjeranja profila potrošnje električne energije

Uvjet za implementaciju vremenski odgodivih trošila električne energije u model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice je poznavanje profila potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila. Slika 5.1 prikazuje profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila. Na slici 5.1 zelenom je bojom prikazan profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila bez rješavanja optimizacijskog problema planiranja rada uređaja, dok je zelenom bojom s uzorkom prikazan profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila uz optimalno planiranje rada uređaja.



**Slika 5.1:** Profil potrošnje električne energije vremenski odgodivog trošila

Trošila s mogućnošću pomjeranja profila potrošnje električne energije mogu se pronaći u industriji (proizvodni procesi) i kućanstvu (najčešće perilice). U predloženom modelu dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice omogućit će se primjena trošila s mogućnošću pomjeranja profila potrošnje električne energije kao opcija u industriji i kućanstvu.

Ukupna snaga proizvodnog procesa ( $Pip_{p,t}^{\text{tot}}$  [kW]) u opciji industrije može se zapisati prema izrazu 5-22 uz uvjet 5-23.

$$Pip_{p,t}^{\text{tot}} = \sum_{k=1}^K (profiles_{p,t,k} \cdot P_{ipb}(k)) \quad (5-22)$$

$$\sum_{k=1}^K P_{ipb}(k) = 1 \quad (5-23)$$

gdje su:

- $profiles_{p,t,k}$  - profili potrošnje električne energije industrijskog procesa,
- $P_{ipb}(k)$  - binarna varijabla odluke za aktivaciju industrijskog profila u određenom vremenu.

Ukupna snaga perilica suđa ( $Pdw_{p,t}^{\text{tot}}$  [kW]) u opciji kućanstva može se zapisati prema izrazu 5-24 uz uvjet 5-25.

$$Pdw_{p,t}^{\text{tot}} = \sum_{m=1}^M (\text{profiles}_{p,t,m} \cdot P_{mb}(m)) \quad (5-24)$$

$$\sum_{m=1}^M P_{mb}(m) = 1 \quad (5-25)$$

- $\text{profiles}_{p,t,m}$  - profili potrošnje električne energije perilice suđa,  
 $P_{mb}(m)$  - binarna varijabla odluke za aktivaciju profila perilice suđa u određenom vremenu.

Ukupna snaga perilica rublja ( $Pwm_{p,t}^{\text{tot}}$  [kW]) u opciji kućanstva može se zapisati prema izrazu 5-26 uz uvjet 5-27.

$$Pwm_{p,t}^{\text{tot}} = \sum_{n=1}^N (\text{profiles}_{p,t,n} \cdot P_{nb}(n)) \quad (5-26)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{nb}(n) = 1 \quad (5-27)$$

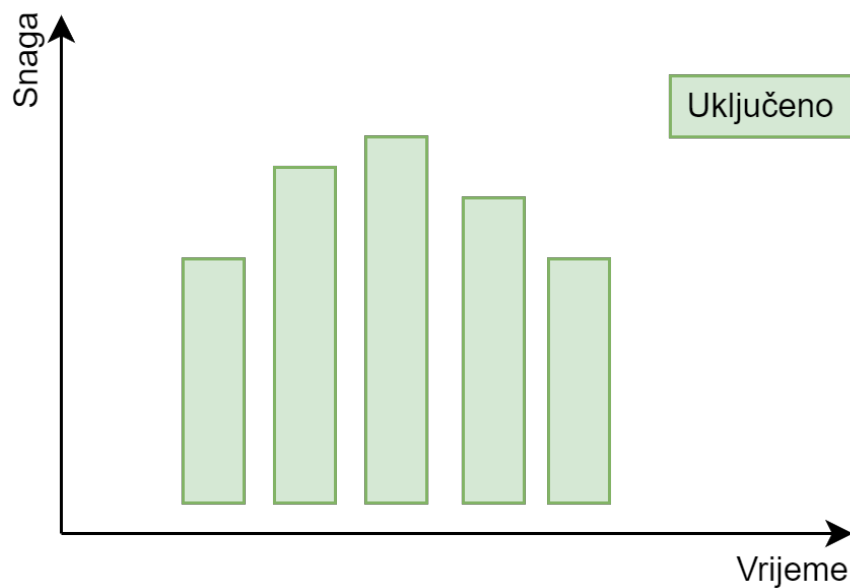
- $\text{profiles}_{p,t,n}$  - profili potrošnje električne energije perilice rublja,  
 $P_{nb}(n)$  - binarna varijabla odluke za aktivaciju profila perilice rublja u određenom vremenu.

Prema izrazima 5-22, 5-24 i 5-26 model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom, na osnovu ponuđenih profila potrošnje električne energije u vremenu, određuje koji je profil optimalno aktivirati s obzirom na vrijednosti funkcije cilja.

### 5.3.2. Trošila s mogućnošću dinamičkog upravljanja potrošnjom električne energije

Kako je već spomenuto, trošilima s mogućnošću dinamičkog upravljanja potrošnjom električne energije snaga može poprimiti bilo koju vrijednost od minimalne do maksimalne od-

nosno instalirane snage uređaja. Slika 5.2 prikazuje profil potrošnje električne energije trošila s mogućnošću dinamičkog upravljanja potrošnjom električne energije. U trošila s mogućnošću dinamičkog upravljanja električnom energijom, odnosno dinamički upravljiva trošila spadaju sustavi grijanja, ventilacije i klimatizacije naročito inverter klima uređaji. Dinamički upravljiva trošila u ovom modelu osiguravaju održavanje željene temperature prostora, uzimajući u obzir donju i gornju postavljenu granicu temperature, osiguravajući udobnost korisnika unutar promatranog prostora (objekta), prema [30, 109].



Slika 5.2: Dinamički upravljiva trošila

Unutarnja temperatura prostora ( $T_{in_{p,hvac,t}}$  [°C]) ponaša se prema linearnoj dinamici te se može odrediti prema izrazu 5-28 koji vrijedi za prvi vremenski korak i izrazu 5-29 koji vrijedi za svaki sljedeći vremenski korak.

$$T_{in_{p,hvac,t}} = T_{in_{p,init}} + \alpha_{hvac} \cdot (T_{out_{p,t}} - T_{in_{p,init}}) + \beta_h \cdot Ehvac_{p,hvac,t}^{heat} - \beta_c \cdot Ehvac_{p,hvac,t}^{cool} \quad (5-28)$$

$$T_{in_{p,hvac,t}} = T_{in_{p,hvac,t-1}} + \alpha_{hvac} \cdot (T_{out_{p,t}} - T_{in_{p,hvac,t-1}}) + \beta_h \cdot Ehvac_{p,hvac,t}^{heat} - \beta_c \cdot Ehvac_{p,hvac,t}^{cool} \quad (5-29)$$

gdje su:

$\alpha_{hvac}$	-	parametar toplinske karakteristike klima uređaja,
$\beta_h$	-	parametar klima uređaja u način rada grijanje,
$\beta_c$	-	parametar klima uređaja u način rada hlađenje,
$T_{out_{p,t}}$ [°C]	-	vanjska temperatura u vremenskom koraku $t$ ,
$T_{in_{p,init}}$ [°C]	-	početna unutarnja temperatura prostora,
$T_{in_{p,hvac,t-1}}$ [°C]	-	unutarnja temperatura prostora u prošlom vremenskom koraku $t$ ,
$E_{hvac_{p,hvac,t}}^{heat}$ [kWh]	-	električna energija potrebna za grijanje prostora,
$E_{hvac_{p,hvac,t}}^{cool}$ [kWh]	-	električna energija potrebna za hlađenje prostora.

Ograničenja 5-30, 5-31 i 5-32 odnose se na ograničavanje maksimalne snage u načinu rada grijanje i hlađenje, u slučaju ako se snage uređaja razlikuju s obzirom na način rada, te istovremen rad uređaja u oba načina rada.

$$Phvac_{p,hvac,t}^{heat} \leq Phvac_{max}^{heat} \cdot Phvacb_{p,hvac,t}^{heat} \quad (5-30)$$

$$Phvac_{p,hvac,t}^{cool} \leq Phvac_{max}^{cool} \cdot Phvacb_{p,hvac,t}^{cool} \quad (5-31)$$

$$Phvacb_{p,hvac,t}^{heat} + Phvacb_{p,hvac,t}^{cool} \leq 1 \quad (5-32)$$

gdje su:

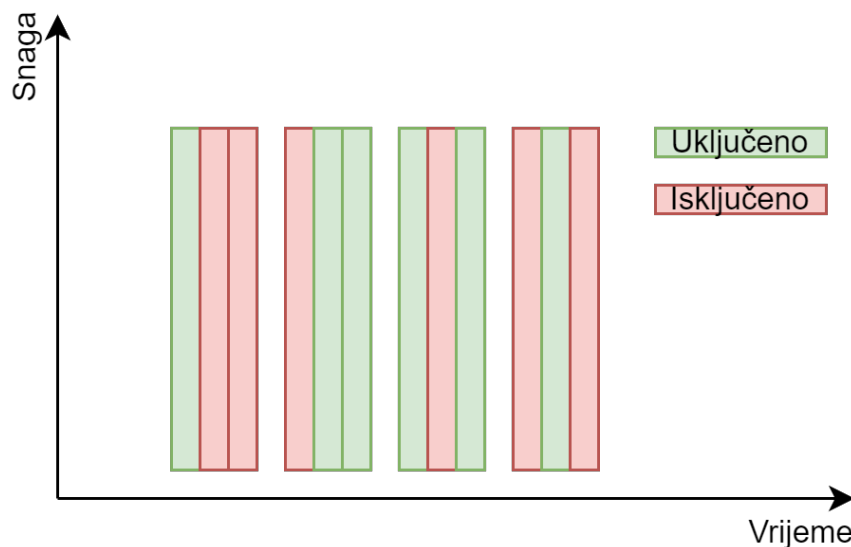
$Phvac_{max}^{heat}$ [kW]	-	maksimalna dozvoljena snaga u načinu rada grijanja,
$Phvac_{max}^{cool}$ [kW]	-	maksimalna dozvoljena snaga u načinu rada hlađenje,
$Phvacb_{p,hvac,t}^{heat}$	-	binarna varijabla odluke za odabir način rada grijanje u vremenskom koraku $t$ ,
$Phvacb_{p,hvac,t}^{cool}$	-	binarna varijabla odluke za odabir način rada hlađenje u vremenskom koraku $t$ .

Unutarnja temperatura prostora ograničena je donjom ( $Tin_{min}$  [°C]) i gornjom granicom ( $Tin_{max}$  [°C]), definiranom od strane korisnika, što osigurava udobnost korisnika prema izrazu 5-33.

$$Tin_{min} \leq Tin_{p,hvac,t} \leq Tin_{max} \quad (5-33)$$

### 5.3.3. Trošila s mogućnošću statičkog upravljanja potrošnjom električne energije

Kako je već navedeno, trošilima s mogućnošću statičkog upravljanja električnom energijom, odnosno statičkim upravljivim trošilima snaga može poprimiti samo dvije vrijednosti, a to su 0 kW (uređaj nije uključen) i odnosno instalirana (nazivna) snaga (uređaj je uključen). Slika 5.3 prikazuje profil potrošnje električne energije tri trošila s mogućnošću statičkog upravljanja potrošnjom električne energije. U ovom modelu statički upravljiva trošila su sustavi za pripremu tople vode, odnosno električni bojleri. Kao i kod dinamički upravljivih trošila, korisnik postavlja željene granice temperature tople vode dok model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom osigurava ispunjenje zahtjeva i udobnost korisnika.



Slika 5.3: Statički upravljiva trošila

Fizički zasnovan model električnog bojlera s jednim elementom (engl. *physically-based single-element*), koristi se u ovom modelu sustava upravljanja energijom, prema [30, 110]. Model proizlazi iz analize protoka energije, a temperatura tople vode ( $Thw_{p,wh,t}$  [°C]) unu-

5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

tar spremnika može se dobiti kao funkcija vremena prema izrazu 5-34 koji vrijedi za prvi vremenski korak. Za svaki sljedeći korak vrijedi izraz 5-35.

$$\begin{aligned} Thw_{p,wh,t} &= Thw_{p,init} \cdot e^{-\left(\frac{1}{R'_p \cdot C_p}\right)} \\ &+ (G_p \cdot R'_p \cdot Tin_p + B_p \cdot R'_p \cdot Thw_{p,in} + Q_{p,wh,t} \cdot R'_p) \cdot (1 - e^{-\left(\frac{1}{R'_p \cdot C_p}\right)}) \end{aligned} \quad (5-34)$$

$$\begin{aligned} Thw_{p,wh,t} &= Thw_{p,wh,t-1} \cdot e^{-\left(\frac{1}{R'_p \cdot C_p}\right)} \\ &+ (G_p \cdot R'_p \cdot Tin_p + B_p \cdot R'_p \cdot Thw_{p,in} + Q_{p,wh,t} \cdot R'_p) \cdot (1 - e^{-\left(\frac{1}{R'_p \cdot C_p}\right)}) \end{aligned} \quad (5-35)$$

gdje su:

- $R'_p$  - parametar koji ovisi o površini i toplinskom otporu izolacije spremnika tople vode te o protoku tople vode i specifičnom toplinskom kapacitetu vode,
- $C_p$  (kJ/kg·K) - specifični toplinski kapacitet vode,
- $G_p$  - parametar koji ovisi o površini i toplinskom otporu izolacije spremnika tople vode,
- $Tin_p$  [°C] - unutarnja temperatura prostora u kojem se nalazi spremnik tople vode,
- $B_p$  - parametar koji ovisi o protoku tople vode i specifičnom toplinskom kapacitetu vode
- $Thw_{p,in}$  [°C] - temperatura ulazne (hladne) vode u spremnik tople vode,
- $Thw_{p,wh,t-1}$  [°C] - temperatura tople vode u prošlom vremenskom koraku  $t$ ,
- $Q_{p,wh,t}$  (MJ/t) - varijabla utroška električne energije u vremenskom koraku  $t$ .

Zagrijavanje tople vode jednako je utrošku električne energije ( $Q_{p,wh,t}$  [MJ/t]) (engl. *electric energy input rate*) prema izrazu 5-36.

$$Q_{p,wh,t} = 3.4121 \cdot 10^3 \cdot Pwh \cdot Pwhb_{p,wh,t} \quad (5-36)$$

Temperatura tople vode ograničena je donjom ( $Thw_{min}$  [°C]) i gornjom granicom ( $Thw_{max}$



[°C]), definiranom od strane korisnika, što osigurava udobnost korisnika prema izrazu 5-37.

$$Thw_{min} \leq Thw_{p,wh,t} \leq Thw_{max} \quad (5-37)$$

## 5.4. Model mreže i lokalnog tržišta električne energije

Modeliranje tržišta električne energije, odnosno razmjena električne energije s mrežom i omogućavanje dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice, prati smjernice Europske unije o uređenju energetskog tržišta i okvirima za nove energetske inicijative.

Na osnovu smjernica, predloženi model sustava upravljanja energijom omogućuje:

- Razmjenu električne energije s mrežom - maloprodajno tržište električne energije;
- Razmjenu električne energije unutar energetske zajednice na lokalnom tržištu električne energije - dijeljenje energije;
- Osiguravanje fleksibilnosti u radu - nova inicijativa.

U nastavku su jasno definirana ograničenja u pogledu razmjene električne energije s mrežom i dijeljenje električne energije unutar energetske zajednice prema odredbama Europske unije i Zakonu o tržištu električne energije Republike Hrvatske.

Ograničenje maksimalne snage prilikom preuzimanja električne energije iz mreže u vremenskom koraku  $t$  definirano je izrazom 5-38.

$$Pg_{p,t}^{\text{imp}} \leq Pg_{p,max}^{\text{imp}} \cdot Pb_{p,t}^{\text{imp}} \quad (5-38)$$

Ograničenje maksimalne snage prilikom predaje električne energije u mrežu u vremenskom koraku  $t$  definirano je izrazom 5-39.

$$Pg_{p,t}^{\text{exp}} \leq Pg_{p,max}^{\text{exp}} \cdot Pb_{p,t}^{\text{exp}} \quad (5-39)$$

gdje su:

- $Pg_{p,max}^{imp}$  [kW] - priključna snaga u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže,
- $Pg_{p,max}^{exp}$  [kW] - priključna snaga u smjeru predaje električne energije u mreže,
- $Pb_{p,t}^{imp}$  - binarna varijabla odluke za smjer preuzimanja električne energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pb_{p,t}^{exp}$  - binarna varijabla odluke za smjer predaje električne energije u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenje maksimalne snage prilikom preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta u vremenskom koraku  $t$  definirano je izrazom 5-40.

$$Pl_{p,t}^{imp} \leq Pl_{p,max}^{imp} \cdot Pb_{p,t}^{imp} \quad (5-40)$$

Ograničenje maksimalne snage prilikom predaje električne energije na lokalno tržište u vremenskom koraku  $t$  definirano je izrazom 5-41.

$$Pl_{p,t}^{exp} \leq Pl_{p,max}^{exp} \cdot Pb_{p,t}^{exp} \quad (5-41)$$

gdje su:

- $Pl_{p,max}^{imp}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga u smjeru preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta,
- $Pl_{p,max}^{exp}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga u smjeru predaje električne energije na lokalno tržište.

Ograničenje istovremenog preuzimanja električne energije iz mreže ili s lokalnog tržišta i predaje električne energije u mrežu ili na lokalno tržište definirano je izrazom 5-42.

$$Pb_{p,t}^{exp} + Pb_{p,t}^{imp} \leq 1 \quad (5-42)$$

Nadalje, u predloženom modelu dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom uveden je binarni parametar  $L_{\text{local}}$  pomoću kojeg se omogućava razmjena električne energije na lokalnom tržištu te se može ispitati utjecaj lokalnog tržišta električne energije na vrijednost funkcije cilja, prema izrazima 5-43 i 5-44.

$$Pl_{p,t}^{\text{imp}} \leq Pl_{p,\text{max}}^{\text{imp}} \cdot Plb_{p,t}^{\text{imp}} \cdot L_{\text{local}} \quad (5-43)$$

$$Pl_{p,t}^{\text{exp}} \leq Pl_{p,\text{max}}^{\text{exp}} \cdot Plb_{p,t}^{\text{exp}} \cdot L_{\text{local}} \quad (5-44)$$

gdje su:

- $Plb_{p,t}^{\text{imp}}$  - binarna varijabla odluke za smjer preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Plb_{p,t}^{\text{exp}}$  - binarna varijabla odluke za smjer predaje električne energije na lokalno tržište u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenje istovremenog preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta i predaje električne energije na lokalno tržište definirano je izrazom 5-45.

$$Plb_{p,t}^{\text{exp}} + Plb_{p,t}^{\text{imp}} \leq 1 \quad (5-45)$$

Osiguravanje fleksibilnosti u radu (nova inicijativa) proizlazi iz činjenice da energetska zajednica može udovoljiti zahtjevima u vidu povećanja i/ili smanjenja snage prilikom preuzimanja odnosno predaje električne energije u/iz mreže primjenom ograničenja 5-46 i 5-47.

$$Pg_{p,t}^{\text{imp}} \begin{matrix} \leq \\ > \end{matrix} Pg_{p,t}^{\text{imp, request}} \quad (5-46)$$

$$Pg_{p,t}^{\text{exp}} \begin{matrix} \leq \\ > \end{matrix} Pg_{p,t}^{\text{exp, request}} \quad (5-47)$$

gdje su:

- $Pg_{p,t}^{\text{imp, request}}$  - zahtijevana snaga u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pg_{p,t}^{\text{exp, request}}$  - zahtijevana snaga u smjeru predaje električne energije iz mreže u vremenskom koraku  $t$ .

#### 5.4.1. Cijene električne energije

Cijene električne energije za preuzimanje električne energije iz mreže od strane opskrbljivača su definirane prema trenutno važećim tarifnim modelima i tarifnim stawkama Hrvatske elektroprivrede d.d. (HEP d.d.), odnosno člana grupe HEP Elektra d.o.o. kao vodećeg opskrbljivača električne energije u Republici Hrvatskoj [111]. Primjer za određivanje cijene električne energije je dan za kategoriju kućanstvo i poduzetništvo, ali valja napomenuti da se istraživanje u sklopu ove disertacije usmjeruje prema poduzetništvu. Pretpostavlja se da prilikom preuzimanja električne energije iz mreže primjenjuje najčešće Bijeli dvotarifni model za kategoriju kućanstvo [112] i Crveni dvotarifni model za kategoriju poduzetništvo [113]. Cijena prilikom preuzimanja električne energije iz mreže, uzimajući u obzir cijenu radne energije, naknade za korištenje distribucijske i prijenosne mreže, naknadu za obnovljive izvore energije i visokoučinkovitu kogeneraciju te PDV-a, definirana je izrazom 5-48.

$$Cg_{p,t}^{\text{imp}} = (Ce_{p,t} + Fd_{p,t} + Ft_{p,t} + Fres) + PDV \quad (5-48)$$

gdje su:

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$Cg_{p,t}^{\text{imp}}$ [€/kWh]	-	cijena električne energije za preuzimanje električne energije iz mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Ce_{p,t}$ [€/kWh]	-	cijena radne energije u vremenskom koraku $t$ ,
$Fd_{p,t}$ [€/kWh]	-	naknada za korištenje distribucijske mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Ft_{p,t}$ [€/kWh]	-	naknada za korištenje prijenosne mreže u vremenskom koraku $t$ ,
$Fres$ [€/kWh]	-	naknada za obnovljive izvore energije i visokoučinkovitu kogeneraciju,
$PDV$ [%]	-	porez na dodanu vrijednost.

Cijena električne energije za predaju električne energije u mrežu definirana je prema trenutnom tržišnom modelu Kupac s vlastitom proizvodnjom za kategoriju kućanstvo [114] i poduzetništvo [115]. Osim tržišnog modela Kupac s vlastitom proizvodnjom postoji i tržišni model Kupac korisnik postrojenja za samoopskrbu. Budući da se razmatra energetska zajednica, prema navedenom tržišnom modelu samo ustanove imaju pravo na dodjelu statusa korisnika postrojenja za samoopskrbu te se stoga neće obrađivati u sklopu ove disertacije, odnosno obradit će se tržišni model Kupac s vlastitom proizvodnjom [116]. Pretpostavlja se da Hrvatska elektroprivreda d.d. (HEP d.d.), odnosno član grupe HEP Elektra d.o.o. otkupljuje viškove električne energije od kupaca.

Prema tržišnom modelu Kupac s vlastitom proizvodnjom za kategoriju kućanstvo, cijena prilikom predaje električne energije u mrežu jednaka je 90 % vrijednosti prosječne jedinične cijene električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja, izraz 5-49. Ako za obračunsko razdoblje vrijedi da je ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca manja od ukupne električne energije isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, dodatno se cijena reducira prema izrazu 5-50.

$$Cg_p^{\text{exp}} = 0.9 \cdot PKC_i \quad (5-49)$$

$$Cg_p^{\text{exp}} = 0.9 \cdot PKC_i \cdot \frac{E_{pi}}{E_{ii}} \quad (5-50)$$

Prema tržišnom modelu Kupac s vlastitom proizvodnjom za kategoriju poduzetništvo, cijena prilikom predaje električne energije u mrežu jednaka je umnošku iznosa tarifne stavke za radnu energiju po jedinstvenoj dnevnoj tarifi za univerzalnu opskrbu električnom energijom (kućanstvo), tarifni model Plavi i koeficijenta 0.5, prema [115].

gdje su:

- $PKC_i$  [€/kWh] - prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja,
- $E_{pi}$  [kWh] - ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca,
- $E_{ii}$  [kWh] - ukupna električna energija isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca.

Crveni tarifni model se odnosi na korisnike mreže iz kategorije poduzetništvo s priključnom snagom većom od 20 kW, prema [113]. Cijena angažirane vršne snage prema Crveni tarifnom model za kategoriju poduzetništvo definirana je prema izrazu 5-51.

$$Cg_{\text{kW}}^{\text{imp}} = C_p + PDV \quad (5-51)$$

gdje su:

- $Cg_{\text{kW}}^{\text{imp}}$  [€/kW] - cijena obračunske vršne radne snage s PDV-om,
- $C_p$  [€/kW] - cijena obračunske vršne radne snage.

Cijena dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice, odnosno na lokalnom tržištu definira se tako da je povoljnije viškove električne energije prodati na lokalnom tržištu nego predati u mrežu. S druge strane, potrebnu električnu energiju je povoljnije kupiti na lokalnom tržištu nego preuzeti iz mreže. Također, u obzir se uzima naknada za korištenje

distribucijske mreže, jer se radi o relativnom malom području te nije potrebno koristiti prijenosnu mrežu. Naknada koja se uzima u obzir za korištenje distribucijske mreže proizlazi iz prvobitnog Zakona o tržištu električne energije u kome je uvjet za formiranje energetske zajednice bio da su članovi zajednice morali biti priključeni na istu transformatorsku stanicu [96]. PDV se ne uzima u obzir u cilju poticanja lokalnog dijeljenja energije. Na osnovu navedenoga, cijena dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice definirana je izrazima 5-52 i 5-53. Iz navedenih izraza se može primijetiti da prilikom uvoza električne energije se obračunava naknada za korištenje distribucijske mreže iz čega proizlazi da kupac plaća cijenu za energiju i naknadu za korištenje distribucijske mreže, a prodavač dobiva naknadu za prodanu električnu energiju.

$$Cl_{p,t}^{\text{imp}} = Ce_{p,t} + Fd_{p,t} \quad (5-52)$$

$$Cl_{p,t}^{\text{exp}} = Ce_{p,t} \quad (5-53)$$

gdje su:

- |                                 |   |  |
|---------------------------------|---|--|
| $Cl_{p,t}^{\text{imp}}$ [€/kWh] | - | cijena električne energije za preuzimanje električne energije s lokalnog tržišta u vremenskom koraku $t$ , |
| $Cl_{p,t}^{\text{exp}}$ [€/kWh] | - | cijena električne energije za predaju električne energije na lokalno tržište u vremenskom koraku $t$ .     |

Fiksni troškovi opskrbe i mjernog mjesta uzimaju se u obzir prilikom rješenja optimizacijskog problema i određivanja vrijednosti funkcije cilja odnosno ukupnog društvenog troška. Fiksni troškovi opskrbe i mjernog mjesta definirani su od strane Hrvatske elektroprivrede d.d. (HEP d.d.), odnosno člana grupe HEP Elektra d.o.o. prema izrazima 5-54 i 5-55.

$$C_{\text{sup}} = C_{\text{ops}} + PDV \quad (5-54)$$

$$C_{\text{emp}} = C_{mm} + PDV \quad (5-55)$$

gdje su:

$C_{\text{sup}}$ [€]	-	fiksni troškovi opskrbe s PDV-om,
$C_{\text{ops}}$ [€]	-	fiksni troškovi opskrbe,
$C_{\text{emp}}$ [€]	-	troškovi mjernog mjesta s PDV-om,
$C_{mm}$ [€]	-	troškovi mjernog mjesta.

## 5.5. Model fotonaponskog sustava

Model fotonaponskog sustava integriran u model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom obuhvaća procjenu proizvodnje električne energije na osnovu direktnog i difuznog sunčevog zračenja na ravnu površinu, utjecaj temperature na performanse modula te učinkovitost pretvarača odnosno invertera ovisnu o snazi (slika 5.8).

Prema [86, 117–119], izlazna snaga fotonaponskog sustava ovisi o više faktora koji će se prilikom razvoja modela fotonaponskog sustava uzeti u obzir i detaljno prikazati u nastavku.

Određivanje izlazne istosmjerne snage (DC) ( $Pge_{p,t}^{\text{DC}}$  [kW]) fotonaponskog sustava na osnovu sunčevog zračenja, uzimajući u obzir sve važne faktore, može se zapisati pomoću izraza 5-56.

$$Pge_{p,t}^{\text{DC}} = (Nm_p \cdot G_{p,t}^{\text{tot}} \cdot Am_p \cdot \eta m_p \cdot Sk_p) \cdot (1 + \gamma_{pv} \cdot ((T_{out,p,t} + (\frac{NOCT_p - 20}{0.8}) \cdot G_{p,t}^{\text{tot}}) - 25)) \quad (5-56)$$

gdje su:



5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$Nm_p$	- broj fotonaponskih modula modula,
$Am_p [m^2]$	- površina fotonaponskog modula modula,
$\eta m_p$	- korisnost pretvorbe fotonaponskog modula modula,
$Sk_p$	- faktor degradacija fotonaponskog modula modula,
$G_{p,t}^{\text{tot}} [\text{kW}/m^2]$	- ukupno sunčevo zračenje na površinu pod kutom u vremenskom koraku $t$ ,
$T_{out_{p,t}} [^{\circ}\text{C}]$	- vanjska temperatura u vremenskom koraku $t$ ,
$\gamma_{pv} [\%/^{\circ}\text{C}]$	- temperaturni koeficijent snage fotonaponskog modula,
$NOCT_p [^{\circ}\text{C}]$	- nominalna radna temperatura fotonaponskog modula modula.

Izlazna izmjenične snaga (AC) ( $Pge_{p,t}^{\text{AC}} [\text{kW}]$ ) fotonaponskog sustava određuje se na osnovu učinkovitost pretvarača, odnosno invertera koja ovisi o snazi ( $\eta_{inv}(Pge_{p,t}^{\text{DC}})$ ) prema izrazu 5-57.

$$Pge_{p,t}^{\text{AC}} = Pge_{p,t}^{\text{DC}} \cdot \eta_{inv}(Pge_{p,t}^{\text{DC}}) \quad (5-57)$$

U nastavku će se detaljno prikazati izračun ukupnog sunčevog zračenja na površinu pod kutom na osnovu direktnog i difuznog sunčevog zračenja na ravnu površinu (slika 5.5), prema [120, 121].

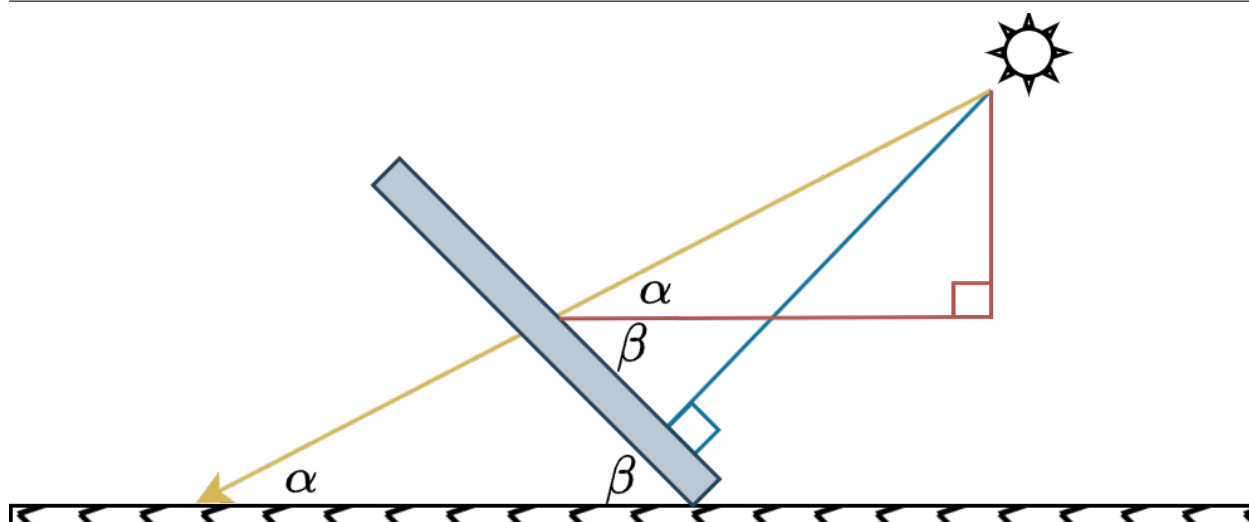
Kut elevacije ( $\alpha_p$ ) ovisi o geografskoj širini ( $\phi_p$ ) i kutu deklinacije ( $\delta$ ) prema izrazu 5-58.

$$\alpha_p = 90^{\circ} - \phi_p + \delta \quad (5-58)$$

Kut deklinacije ( $\delta$ ) ovisi o danu u godini ( $dn$ ) te se može odrediti pomoću izraza 5-59.

$$\delta = 23.45^{\circ} \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + dn)\right) \quad (5-59)$$

Površinu modula pod određenim kutom, uz prikazan kut elevacije ( $\alpha_p$ ) i kut nagiba površine modula ( $\beta_p$ ), prikazuje slika 5.4.



Slika 5.4: Sunčevo zračenje na površinu pod kutom

Nadalje, omjer između direktnog sunčevog zračenja na površinu pod kutom i direktnog sunčevog zračenja na ravnu površinu ( $Rb_p$ ) može se odrediti pomoću izraza 5-60, 5-61 i 5-62.

$$Rb_p = \frac{\cos\theta_p}{\cos\theta_{z,p}} \quad (5-60)$$

$$\begin{aligned} \cos\theta_p &= \cos\delta \cdot \cos\phi_p \cdot \cos\beta_p + \cos\delta \cdot \sin\phi_p \cdot \sin\beta_p \cdot \cos\gamma_p \\ &+ \sin\beta_p \cdot \sin\phi_p \cdot \cos\beta_p - \sin\delta \cdot \cos\phi_p \cdot \sin\beta_p \cdot \cos\gamma_p \end{aligned} \quad (5-61)$$

$$\cos\theta_{z,p} = \sin\phi_p \cdot \sin\delta + \cos\phi_p \cdot \cos\delta \quad (5-62)$$

gdje su:

- $\theta_p$  - upadni kut u sunčevo podne,
- $\theta_{z,p}$  - zenitni kut u sunčevo podne,
- $\gamma_p$  - azimut površine modula,
- $\beta_p$  - kut nagiba površine modula.

Omjer između difuznog sunčevog zračenja na površinu pod kutom i difuznog sunčevog

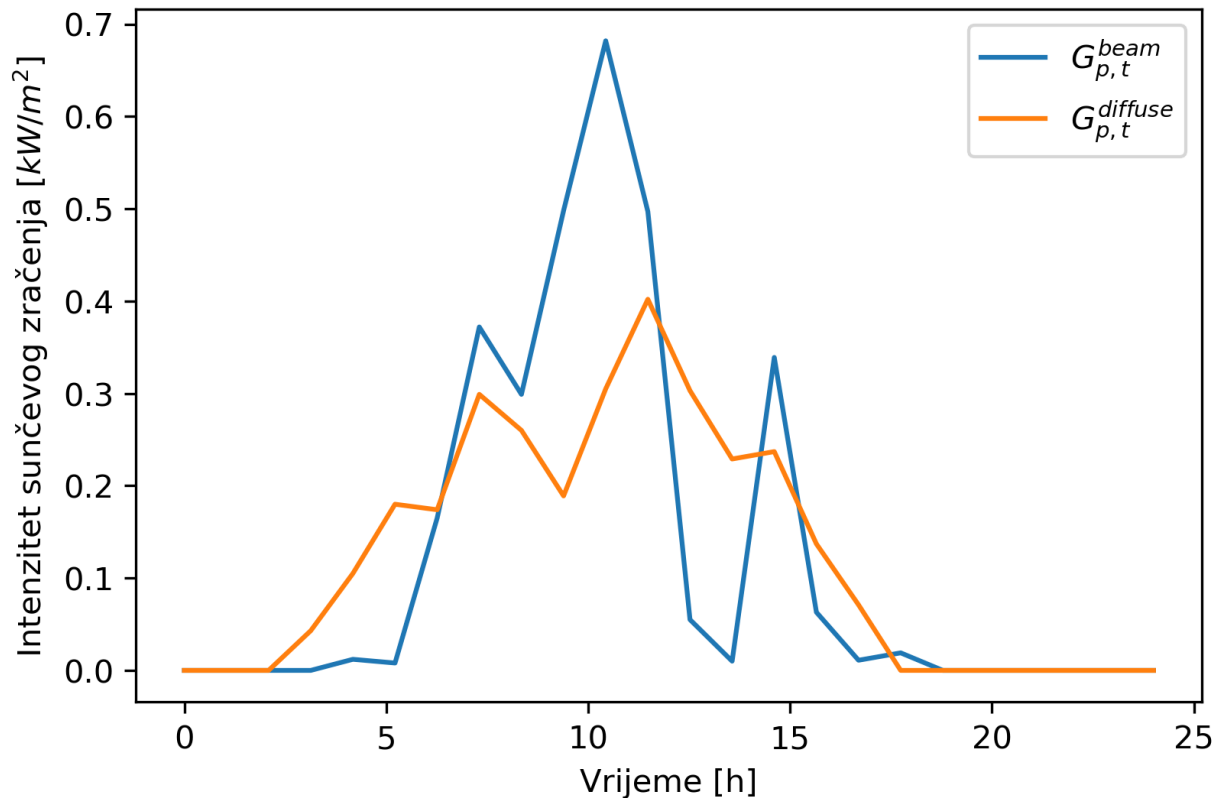
zračenja na ravnu površinu ( $Rd_p$ ) može se odrediti pomoću izraza 5-63.

$$Rd_p = \frac{1 + \cos\beta_p}{2} \quad (5-63)$$

Nadalje, globalno sunčevo zračenje ( $G_{p,t}^{\text{global}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]) jednako je direktnom ( $G_{p,t}^{\text{beam}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]) i difuznom sunčevom zračenju na ravnu površinu ( $G_{p,t}^{\text{diffuse}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]) prema izrazu 5-64.

$$G_{p,t}^{\text{global}} = G_{p,t}^{\text{beam}} + G_{p,t}^{\text{diffuse}} \quad (5-64)$$

Uz poznavanje vrijednosti globalnog sunčevog zračenja na ravnu površinu i pripadajućih izračunatih koeficijenata moguće je izračunati reflektirano ( $G_{p,t}^{\text{reflected}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]), direktno ( $G_{p,t,Rb_p}^{\text{beam}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]) i difuzno ( $G_{p,t,Rd_p}^{\text{diffuse}}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]) sunčevo zračenje na površinu pod kutom prema izrazima 5-65, 5-66 i 5-67.



Slika 5.5: Primjeri profila izravnog i difuznog sunčevog zračenja na ravnu površinu za lokaciju Osijek na dan 26.7.2020.

$$G_{p,t}^{\text{reflected}} = G_{p,t}^{\text{global}} \cdot \rho_p \cdot \left( \frac{1 - \cos\beta_p}{2} \right) \quad (5-65)$$

$$G_{p,t,Rb_p}^{\text{beam}} = G_{p,t}^{\text{beam}} \cdot Rb_p \quad (5-66)$$

$$G_{p,t,Rd_p}^{\text{diffuse}} = G_{p,t}^{\text{diffuse}} \cdot Rd_p \quad (5-67)$$

gdje je  $\rho_p$  koeficijent refleksije okoline.

Konačno, ukupno sunčevo zračenje na površinu pod kutom ( $G_{p,t}^{\text{tot}}$  [kW/m<sup>2</sup>]) jednako je zbroju pojedinačnih zračenja prema izrazu 5-68.

$$G_{p,t}^{\text{tot}} = G_{p,t,Rb_p}^{\text{beam}} + G_{p,t,Rd_p}^{\text{diffuse}} + G_{p,t}^{\text{reflected}} \quad (5-68)$$

## 5.6. Model baterijskog sustava za pohranu električne energije

Model baterijskog sustava pohrane energije integriran u model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije te je unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju. Unapređenje baterijskog sustava pohrane energije je ujedno i jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije.

Procjena stanja napunjenosti baterije sustava pohrane energije može se odrediti prema izrazu 5-69 koji vrijedi za prvi vremenski korak i izrazu 5-70 koji vrijedi za svaki sljedeći vremenski korak.

$$SOEbess_{p,b,t} = SOEbess_{p,b,t=0} + Ebess_{p,b,t}^{\text{ch}} - Ebess_{p,b,t}^{\text{dch}}, \text{ za } t = 1 \quad (5-69)$$

$$SOEbess_{p,b,t} = SOEbess_{p,b,t-1} + Ebess_{p,b,t}^{ch} - Ebess_{p,b,t}^{dch}, \text{ za } t \neq 1 \quad (5-70)$$

gdje su:

- $SOEbess_{p,b,t=0}$  [kWh] - početno stanje napunjenosti baterije sustava pohrane energije,
- $SOEbess_{p,b,t}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $SOEbess_{p,b,t-1}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije sustava pohrane energije u prošlom vremenskom koraku  $t$ ,
- $Ebess_{p,b,t}^{ch}$  [kWh] - električna energija potrebna za punjenje baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Ebess_{p,b,t}^{dch}$  [kWh] - električna energija dobivena pražnjenjem baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ .

Prilikom određivanja snage punjenja odnosno pražnjenja baterije sustava pohrane energije na istosmjernoj (DC) strani i snage punjena odnosno pražnjenja baterije na izmjeničnoj (AC) strani, učinkovitosti pretvarača ovisne o snazi ( $\eta_{bess}^{ch,inv}(P_{bess_{p,b,t}^{ch,AC}})$ ) i ( $\eta_{bess}^{dch,inv}(P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}})$ ) kao i učinkovitosti (punjenja odnosno pražnjenja) baterije ovisne o snazi ( $\eta_{bess}^{ch,batt}(P_{bess_{p,b,t}^{ch,AC}})$ ) i ( $\eta_{bess}^{dch,batt}(P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}})$ ) uzimaju se u obzir prema izrazima 5-71 i 5-72.

$$P_{bess_{p,b,t}^{ch,batt}} = P_{bess_{p,b,t}^{ch,AC}} \cdot \eta_{bess}^{ch,inv}(P_{bess_{p,b,t}^{ch,AC}}) \cdot \eta_{bess}^{ch,batt}(P_{bess_{p,b,t}^{ch,AC}}) \quad (5-71)$$

$$P_{bess_{p,b,t}^{dch,AC}} = P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}} \cdot \eta_{bess}^{dch,inv}(P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}}) \cdot \eta_{bess}^{dch,batt}(P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}}) \quad (5-72)$$

gdje su:

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

- $Pbess_{p,b,t}^{ch,batt}$  [kW] - snaga potrebna za punjenje baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pbess_{p,b,t}^{dch,batt}$  [kW] - snaga dobivena pražnjenjem baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenja snage punjenja odnosno snage pražnjenja baterije sustava pohrane energije na izmjeničnoj (AC) strani odnosno snage pretvarača definirana su izrazima 5-73 i 5-74.

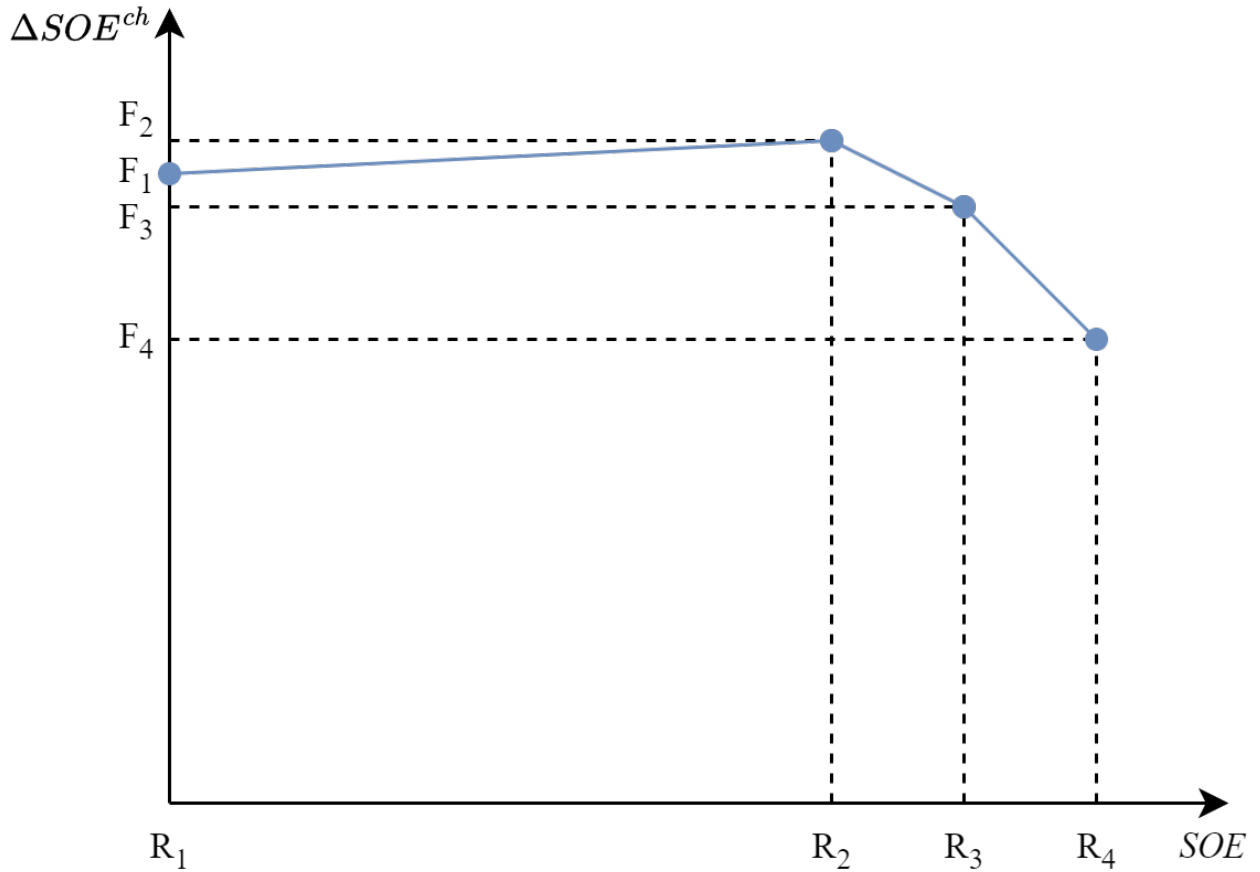
$$0 \leq Pbess_{p,b,t}^{ch,AC} \leq Pbess_{max}^{ch,AC} \quad (5-73)$$

$$0 \leq Pbess_{p,b,t}^{dch,AC} \leq Pbess_{max}^{dch,AC} \quad (5-74)$$

gdje su:

- $Pbess_{max}^{ch,AC}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga punjenja baterije sustava pohrane energije na izmjeničnoj (AC) strani odnosno strani pretvarača,
- $Pbess_{max}^{dch,AC}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga pražnjenja baterije sustava pohrane energije na izmjeničnoj (AC) strani odnosno strani pretvarača.

Energetski model punjenja baterije koji se pokazao kao izrazito točan u usporedbi s mjerenim podacima (rezultatima mjerenja) preuzet je iz [83]. Prema energetsom modelu, snaga punjenja baterije ovisi o stanju napunjenosti baterije, slika 5.6. Energetski model punjenja baterije sustava pohrane energije detaljno je opisan izrazima 5-75 - 5-78.



Slika 5.6: Karakteristika  $\Delta SOE^{ch}/SOE$  energetskog modela punjenja baterije

$$SOEbess_{p,b,t} = \sum_{i^{ch}=1}^{I^{ch}-1} SOEbess_{p,b,t,i^{ch}}^{ch} \quad (5-75)$$

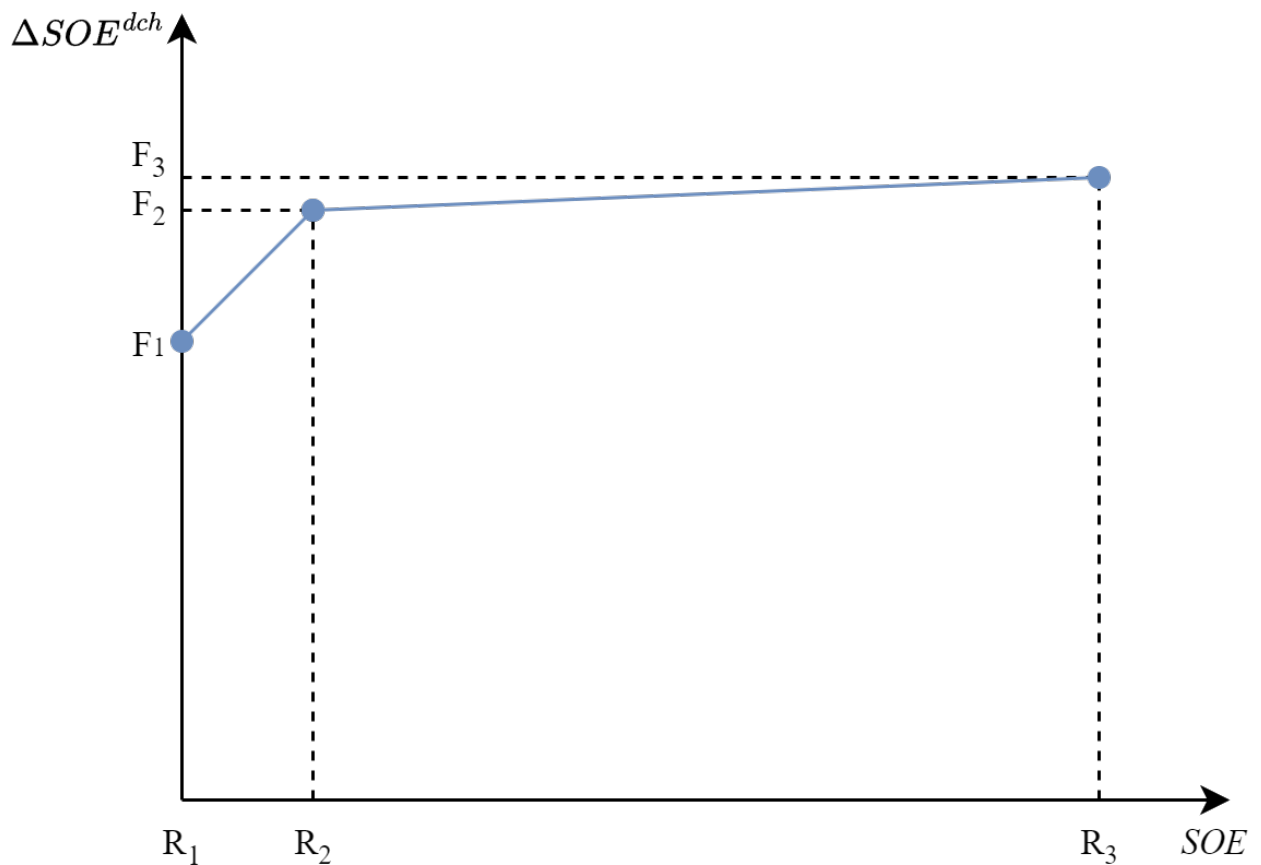
$$SOEbess_{p,b,t,i^{ch}}^{ch} \leq R_{p,b,i^{ch}+1}^{ch} - R_{p,b,i^{ch}}^{ch} \quad (5-76)$$

$$\Delta SOEbess_{p,b,t}^{ch} = Fbess_1^{ch} + \sum_{i^{ch}=1}^{I^{ch}-1} \frac{F_{p,b,i^{ch}+1} - F_{p,b,i^{ch}}}{R_{p,b,i^{ch}+1}^{ch} - R_{p,b,i^{ch}}^{ch}} \cdot SOEbess_{p,b,t,i^{ch}-1}^{ch} \quad (5-77)$$

$$0 \leq Pbess_{p,b,t}^{ch,batt} \leq \frac{\Delta SOEbess_{p,b,t}^{ch}}{\Delta t} \cdot Pbess_{p,b,t}^{ch,batt} \quad (5-78)$$

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

Jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije je unaprjeđenje baterijskog sustava pohrane, između ostalog, s energetske modelom pražnjenja baterije. Osim utjecaja na iznos snage punjenja baterije, stanje napunjenosti baterije ima utjecaj i na iznos snage pražnjenja baterije. Iz navedenoga slijedi da baterija ne može davati konstantnu snagu u cijelom rasponu stanja napunjenosti baterije nego snaga pražnjenja ovisi o stanju napunjenosti i tipu baterije (tehnologija izrade) što je dokazano mjerenjem. Ovisnost snage pražnjenja o stanju napunjenosti baterije prikazuje slika 5.7. Energetski model pražnjenja baterije detaljno je opisan izrazima 5-79 - 5-82.



Slika 5.7: Karakteristika  $\Delta SOE^{dch}/SOE$  energetskog modela pražnjenja baterije

$$SOE_{p,b,t}^{dch} = \sum_{i^{dch}=1}^{I^{dch}-1} SOE_{p,b,t,i^{dch}}^{dch} \quad (5-79)$$

$$SOE_{p,b,t,i^{dch}}^{dch} \leq R_{p,b,i^{dch}+1}^{dch} - R_{p,b,i^{dch}}^{dch} \quad (5-80)$$



$$\Delta SOE_{bess_{p,b,t}^{dch}} = F_{bess_1^{dch}} + \sum_{i^{dch}=1}^{I^{dch}-1} \frac{F_{p,b,i^{dch}+1} - F_{p,b,i^{dch}}}{R_{p,b,i^{dch}+1}^{dch} - R_{p,b,i^{dch}}^{dch}} \cdot SOE_{bess_{p,b,t,i^{dch}-1}^{dch}} \quad (5-81)$$

$$0 \leq P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}} \leq \frac{\Delta SOE_{bess_{p,b,t}^{dch}}}{\Delta t} \cdot P_{bess_{p,b,t}^{dch,batt}} \quad (5-82)$$

gdje su:

- $SOE_{bess_{p,b,t,i^{ch}}^{ch}}$  [kWh] - energetska granica svakog stanja energetskog segmenta baterije sustava pohrane prilikom punjenja u vremenskom koraku  $t$ ,
- $SOE_{bess_{p,b,t,i^{dch}}^{dch}}$  [kWh] - energetska granica svakog stanja energetskog segmenta baterije sustava pohrane prilikom pražnjenja u vremenskom koraku  $t$ ,
- $R_{p,b,i^{ch}}^{ch}, F_{p,b,i^{ch}}^{ch}, F_{bess_1^{ch}}$  - koeficijenti potrebni za definiranje svakog stanja energetskih segmenata baterije sustava pohrane prilikom punjenja,
- $R_{p,b,i^{dch}}^{dch}, F_{p,b,i^{dch}}^{dch}, F_{bess_1^{dch}}$  - koeficijenti potrebni za definiranje svakog stanja energetskih segmenata baterije sustava pohrane prilikom pražnjenja,
- $\Delta SOE_{bess_{p,b,t}^{ch}}$  [kWh] - dozvoljena promjena energije baterije sustava pohrane prilikom punjenja u vremenskom koraku  $t$ ,
- $\Delta SOE_{bess_{p,b,t}^{dch}}$  [kWh] - dozvoljena promjena energije baterije sustava pohrane prilikom pražnjenja u vremenskom koraku  $t$ ,
- $P_{bess_{max}^{ch,batt}}$  [kW] - maksimalna dopuštena snaga punjenja baterije sustava pohrane,
- $P_{bess_{max}^{dch,batt}}$  [kW] - maksimalna dopuštena snaga pražnjenja baterije sustava pohrane.

Važno je napomenuti da karakteristike  $\Delta SOE/SOE$ , prikazane na slikama 5.6 i 5.7, energetskog modela punjenja i pražnjenja baterije ovise o tipu baterije (tehnologija izrade) i snagama punjenja i pražnjenja prvenstveno, ali i drugi faktori kao što su temperatura i starost baterije imaju utjecaja.

Ograničenje istodobnog punjenja i pražnjenja baterije sustava pohrane energije definirano je izrazom 5-83.

$$Pbess_{p,b,t}^{\text{ch,batt}} + Pbess_{p,b,t}^{\text{dch,batt}} \leq 1 \quad (5-83)$$

gdje su:

- $Pbess_{p,b,t}^{\text{ch,batt}}$  - binarna varijable odluke za punjenje baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pbess_{p,b,t}^{\text{dch,batt}}$  - binarna varijable odluke za pražnjenje baterije sustava pohrane energije u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenje minimalne ( $SOEbess_{min}$  [kWh]) i maksimalne ( $SOEbess_{max}$  [kWh]) vrijednosti stanja napunjenosti baterije sustava pohrane energije definirano je izrazom 5-84.

$$SOEbess_{min} \leq SOEbess_{p,b,t} \leq SOEbess_{max} \quad (5-84)$$

## 5.7. Model baterije električnog vozila

Kao i u slučaju modela baterije sustava pohrane energije, model baterije električnog vozila obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije te je unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju što su ujedno znanstveni doprinosi ove disertacije.

Procjena stanja napunjenosti baterije električnog vozila može se odrediti prema izrazu 5-85 koji vrijedi za prvi vremenski korak i izrazu 5-86 koji vrijedi za svaki sljedeći vremenski korak.

$$SOEev_{p,ev,t} = SOEev_{p,ev,t=0} + Eev_{p,ev,t}^{\text{ch}} - Eev_{p,ev,t}^{\text{dch}}, \text{ za } t = 1 \quad (5-85)$$

$$SOEev_{p,ev,t} = SOEev_{p,ev,t-1} + Eev_{p,ev,t}^{ch} - Eev_{p,ev,t}^{dch}, \text{ za } t \neq 1 \quad (5-86)$$

gdje su:

- $SOEev_{p,ev,t=0}$  [kWh] - početno stanje napunjenosti baterije električnog vozila,
- $SOEev_{p,ev,t}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ ,
- $SOEev_{p,ev,t-1}$  [kWh] - stanje napunjenosti baterije električnog vozila u prošlom vremenskom koraku  $t$ ,
- $Eev_{p,ev,t}^{ch}$  [kWh] - električna energija potrebna za punjenja baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Eev_{p,ev,t}^{dch}$  [kWh] - električna energija dobivena pražnjenjem baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ .

Prilikom određivanja snage punjenja odnosno pražnjenja baterije na istosmjernoj (DC) strani i snage punjena odnosno pražnjenja baterije na izmjeničnoj (AC) strani, učinkovitosti pretvarača ovisne o snazi ( $\eta ev^{ch,inv}(Pev_{p,ev,t}^{ch,AC})$ ) i ( $\eta ev^{dch,inv}(Pev_{p,ev,t}^{dch,batt})$ ), kao i učinkovitosti (punjenja odnosno pražnjenja) baterije ovisne o snazi ( $\eta ev^{ch,batt}(Pev_{p,ev,t}^{ch,AC})$ ) i ( $\eta ev^{dch,batt}(Pev_{p,ev,t}^{dch,batt})$ ) uzimaju se u obzir prema izrazima 5-87 i 5-88.

$$Pev_{p,ev,t}^{ch,batt} = Pev_{p,ev,t}^{ch,AC} \cdot \eta ev^{ch,inv}(Pev_{p,ev,t}^{ch,AC}) \cdot \eta ev^{ch,batt}(Pev_{p,ev,t}^{ch,AC}) \quad (5-87)$$

$$Pev_{p,ev,t}^{dch,AC} = Pev_{p,ev,t}^{dch,batt} \cdot \eta ev^{dch,inv}(Pev_{p,ev,t}^{dch,batt}) \cdot \eta ev^{dch,batt}(Pev_{p,ev,t}^{dch,batt}) \quad (5-88)$$

gdje su:

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

- $Pe_{p,ev,t}^{ch,batt}$  [kW] - snaga potrebna za punjenje baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pe_{p,ev,t}^{dch,batt}$  [kW] - snaga dobivena pražnjenjem baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenja snage punjenja odnosno snage pražnjenja baterije električnog vozila na izmjeničnoj (AC) strani odnosno snage pretvarača definirano je izrazima 5-73 i 5-74.

$$0 \leq Pe_{p,ev,t}^{ch,AC} \leq Pe_{max}^{ch,AC} \cdot x_{p,ev,t}^a \quad (5-89)$$

$$0 \leq Pe_{p,ev,t}^{dch,AC} \leq Pe_{max}^{dch,AC} \cdot x_{p,ev,t}^a \quad (5-90)$$

gdje su:

- $Pe_{max}^{ch,AC}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga punjenja baterije električnog vozila na izmjeničnoj (AC) strani odnosno strani pretvarača,
- $Pe_{max}^{dch,AC}$  [kW] - maksimalna dozvoljena snaga pražnjenja baterije električnog vozila na izmjeničnoj (AC) strani odnosno strani pretvarača,
- $x_{p,ev,t}^a$  - binarni parametar prisutnosti električnog vozila na punionici u vremenskom koraku  $t$ .

Kao i kod modela baterije sustava pohrane energije, energetski model punjenja baterije se primjenjuje i kod baterije električnog vozila jer se pokazao kvalitetan u usporedbi s mjerenim podacima (rezultatima mjerenja) te je detaljno opisan izrazima 5-91 - 5-94.

$$SOE_{p,ev,t} = \sum_{i^{ch}=1}^{I^{ch}-1} SOE_{p,ev,t,i^{ch}}^{ch} \quad (5-91)$$

$$SOE_{p,ev,t,i^{ch}}^{ch} \leq R_{p,ev,i^{ch}+1}^{ch} - R_{p,ev,i^{ch}}^{ch} \quad (5-92)$$

$$\Delta SOEev_{p,ev,t}^{ch} = Fev_1^{ch} + \sum_{i^{ch}=1}^{I^{ch}-1} \frac{F_{p,ev,i^{ch}+1}^{ch} - F_{p,ev,i^{ch}}^{ch}}{R_{p,ev,i^{ch}+1}^{ch} - R_{p,ev,i^{ch}}^{ch}} \cdot SOEev_{p,ev,t,i^{ch}-1}^{ch} \quad (5-93)$$

$$0 \leq Pev_{p,ev,t}^{ch,batt} \leq \frac{\Delta SOEev_{p,ev,t}^{ch}}{\Delta t} \cdot Peb_{p,ev,t}^{ch,batt} \quad (5-94)$$

Kako je već spomenuto, znanstveni doprinos ove disertacije je unaprjeđenje modela baterijskog sustava pohrane, između ostalog, s energetske modelom pražnjenja baterije koji se primjenjuje i na baterije električnog vozila. Energetski model pražnjenja baterije električnog vozila detaljno je opisan izrazima 5-91 - 5-94.

$$SOEev_{p,ev,t} = \sum_{i^{dch}=1}^{I^{dch}-1} SOEev_{p,ev,t,i^{dch}}^{dch} \quad (5-95)$$

$$SOEev_{p,ev,t,i^{dch}}^{dch} \leq R_{p,ev,i^{dch}+1}^{dch} - R_{p,ev,i^{dch}}^{dch} \quad (5-96)$$

$$\Delta SOEev_{p,ev,t}^{dch} = Fev_1^{dch} + \sum_{i^{dch}=1}^{I^{dch}-1} \frac{F_{p,ev,i^{dch}+1}^{dch} - F_{p,ev,i^{dch}}^{dch}}{R_{p,ev,i^{dch}+1}^{dch} - R_{p,ev,i^{dch}}^{dch}} \cdot SOEev_{p,ev,t,i^{dch}-1}^{dch} \quad (5-97)$$

$$0 \leq Pev_{p,ev,t}^{dch,batt} \leq \frac{\Delta SOEev_{p,ev,t}^{dch}}{\Delta t} \cdot Peb_{p,ev,t}^{dch,batt} \quad (5-98)$$

gdje su:

5. Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

---

$SOEev_{p,ev,t,i}^{ch}$ [kWh]	-	energetska granica svakog stanja energetskeg segmenta baterije električnog vozila prilikom punjenja u vremenskom koraku $t$ ,
$SOEev_{p,ev,t,i}^{dch}$ [kWh]	-	energetska granica svakog stanja energetskeg segmenta baterije električnog vozila prilikom pražnjenja u vremenskom koraku $t$ ,
$R_{p,ev,i}^{ch}$ , $Fev_1^{ch}$	-	koeficijenti potrebni za definiranje svakog stanja energetskeg segmenta baterije električnog vozila prilikom punjenja,
$R_{p,ev,i}^{dch}$ , $Fev_1^{dch}$	-	koeficijenti potrebni za definiranje svakog stanja energetskeg segmenta baterije električnog vozila prilikom pražnjenja,
$\Delta SOEev_{p,ev,t}^{ch}$ [kWh]	-	dozvoljena promjena energije baterije električnog vozila prilikom punjenja u vremenskom koraku $t$ ,
$\Delta SOEev_{p,ev,t}^{dch}$ [kWh]	-	dozvoljena promjena energije baterije električnog vozila prilikom pražnjenja u vremenskom koraku $t$ ,
$Pev_{max}^{ch,batt}$ [kW]	-	maksimalna dopuštena snaga punjenja baterije električnog vozila,
$Pev_{max}^{dch,batt}$ [kW]	-	maksimalna dopuštena snaga pražnjenja baterije električnog vozila.

Također, ovdje je isto važno napomenuti da karakteristike  $\Delta SOE/SOE$  energetskeg modela punjenja i pražnjenja baterije električnog vozila, ovise o tipu baterije (tehnologija izrade) i snagama punjenja i pražnjenja prvenstveno, ali i drugi faktori imaju utjecaja.

Ograničenje istodobnog punjenja i pražnjenja baterije električnog vozila definirano je izrazom 5-99.

$$Pev_{p,ev,t}^{ch,batt} + Pev_{p,ev,t}^{dch,batt} \leq 1 \quad (5-99)$$

gdje su:

- $Pe_{p,ev,t}^{ch,batt}$  - binarna varijable odluke za punjenje baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ ,
- $Pe_{p,ev,t}^{dch,batt}$  - binarna varijable odluke za pražnjenje baterije električnog vozila u vremenskom koraku  $t$ .

Ograničenje minimalne ( $SOE_{ev_{min}}$  [kWh]) i maksimalne ( $SOE_{ev_{max}}$  [kWh]) vrijednosti stanja napunjenosti baterije električnog vozila definirano je izrazom 5-100.

$$SOE_{ev_{min}} \leq SOE_{ev_{p,ev,t}} \leq SOE_{ev_{max}} \quad (5-100)$$

Ograničenje željenog stanja napunjenosti baterije električnog vozila ( $SOE_{desired}$  [kWh]) definirano je izrazom 5-101.

$$SOE_{ev_{p,ev,t=last}} \geq SOE_{desired} \quad (5-101)$$

gdje je  $SOE_{ev_{p,ev,t=last}}$  stanje napunjenosti baterije električnog vozila u posljednjem vremenskom koraku  $t$  na punionici.

## 5.8. Degradacija baterije

Predloženi modeli baterije sustava pohrane energije i baterije električnog vozila, između ostaloga, obuhvaćaju modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije, prema [84, 88]. Modeliranjem cikličkog i kalendarskog starenja baterije uzima se u obzir, prilikom zakazivanja rada baterije sustava pohrane energije i baterije električnog vozila od strane sustava upravljanja energijom, investicija odnosno trošak koji nastaje zamjenom baterije. Kalendarski trošak pretežito je vezan za stanje napunjenosti baterije dok je ciklički trošak starenja baterije pretežito vezan za dubinu ciklusa pražnjenja.

Procjena kalendarskog starenja baterije kao virtualnog troška koji nastaje s obzirom na stanje napunjenosti baterije primjenjuje se na bateriju sustava pohrane energije i električnog vozila prema izrazima 5-102 i 5-103.

$$Cbess_{p,b,t}^{cal} = \frac{Cbess_{p,bess}^{rc}}{T_{bess}^{life}} \cdot kbess \cdot (Fbess_0 + 0.5 \cdot Fbess \cdot (SOEbess_{p,b,t} - SOEbess_{p,b,t-1})) \quad (5-102)$$

$$Cev_{p,ev,t}^{cal} = \frac{Cev_{p,ev}^{rc}}{T_{ev}^{life}} \cdot kev \cdot (Fev_0 + 0.5 \cdot Fev \cdot (SOEev_{p,ev,t} - SOEev_{p,ev,t-1})) \quad (5-103)$$

gdje su:

$Cbess_{p,bess}^{rc}$ [€]	-	ukupni trošak zamjene baterije sustava pohrane energije,
$Cev_{p,ev}^{rc}$ [€]	-	ukupni trošak zamjene baterije električnog vozila,
$T_{bess}^{life}$	-	životni vijek baterije sustava pohrane energije (iskazan s obzirom na broj vremenskih koraka optimizacijskog problema),
$T_{ev}^{life}$	-	životni vijek baterije električnog vozila (iskazan s obzirom na broj vremenskih koraka optimizacijskog problema),
$kbess$	-	koeficijent redukcije virtualnog troška degradacije baterije sustava za pohranu energije,
$kev$	-	koeficijent redukcije virtualnog troška degradacije baterije električnog vozila,
$Fbess_0, Fbess$	-	koeficijent degradacije baterije sustava pohrane energije (jednadžba pravca),
$Fev_0, Fev$	-	koeficijent degradacije baterije električnog vozila (jednadžba pravca).

Kako je već spomenuto, cikličko starenje baterije odnosno virtualni trošak ovisi o dubini ciklusa pražnjenja prema izrazu 5-104.

$$\Phi(\delta) = 5.24 \cdot 10^{-4} \cdot \delta^{2.03} \quad (5-104)$$

Procjena cikličkog starenja baterije kao virtualnog troška koji nastaje s obzirom na dubinu



5. *Matematički model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

ciklusa pražnjenja primjenjuje se na bateriju sustava pohrane energije i bateriju električnog vozila prema izrazima 5-105 i 5-106.

$$Cev_{p,ev,t}^{cyc} = kev$$

$$\cdot \sum_{j=1}^J \left( Cev_{p,ev}^{rc} \cdot J \cdot \left[ \Phi_{ev} \left( \frac{j}{J} \right)_{p,ev} - \Phi_{ev} \left( \frac{j-1}{J} \right)_{p,ev} \right] \cdot Pev_{p,ev,t,j}^{dch,batt} \right) \quad (5-105)$$

$$Cbess_{p,b,t}^{cyc} = kbess$$

$$\cdot \sum_{j=1}^J \left( Cbess_{p,bess}^{rc} \cdot J \cdot \left[ \Phi_{bess} \left( \frac{j}{J} \right)_{p,b} - \Phi_{bess} \left( \frac{j-1}{J} \right)_{p,b} \right] \cdot Pbess_{p,b,t,j}^{dch,batt} \right) \quad (5-106)$$

Trošak zamjene baterije sustava pohrane energije i baterije električnog vozila računa se na osnovu investicijskog troška zamjene baterije izraženog po kWh energetske kapaciteta prema izrazima 5-106 i 5-107.

$$Cev_{p,ev}^{rc} = Cev_{price}^{kWh} \cdot Eev_{p,ev}^{cap} \quad (5-107)$$

$$Cbess_{p,b}^{rc} = Cbess_{price}^{kWh} \cdot Ebess_{p,b}^{cap} \quad (5-108)$$

gdje su:

- $Cbess_{price}^{kWh}$  [€/kWh] - trošak zamjene baterije sustava pohrane energije izražen po kWh energetske kapaciteta,
- $Cev_{price}^{kWh}$  [€/kWh] - trošak zamjene baterije električnog vozila izražen po kWh energetske kapaciteta.

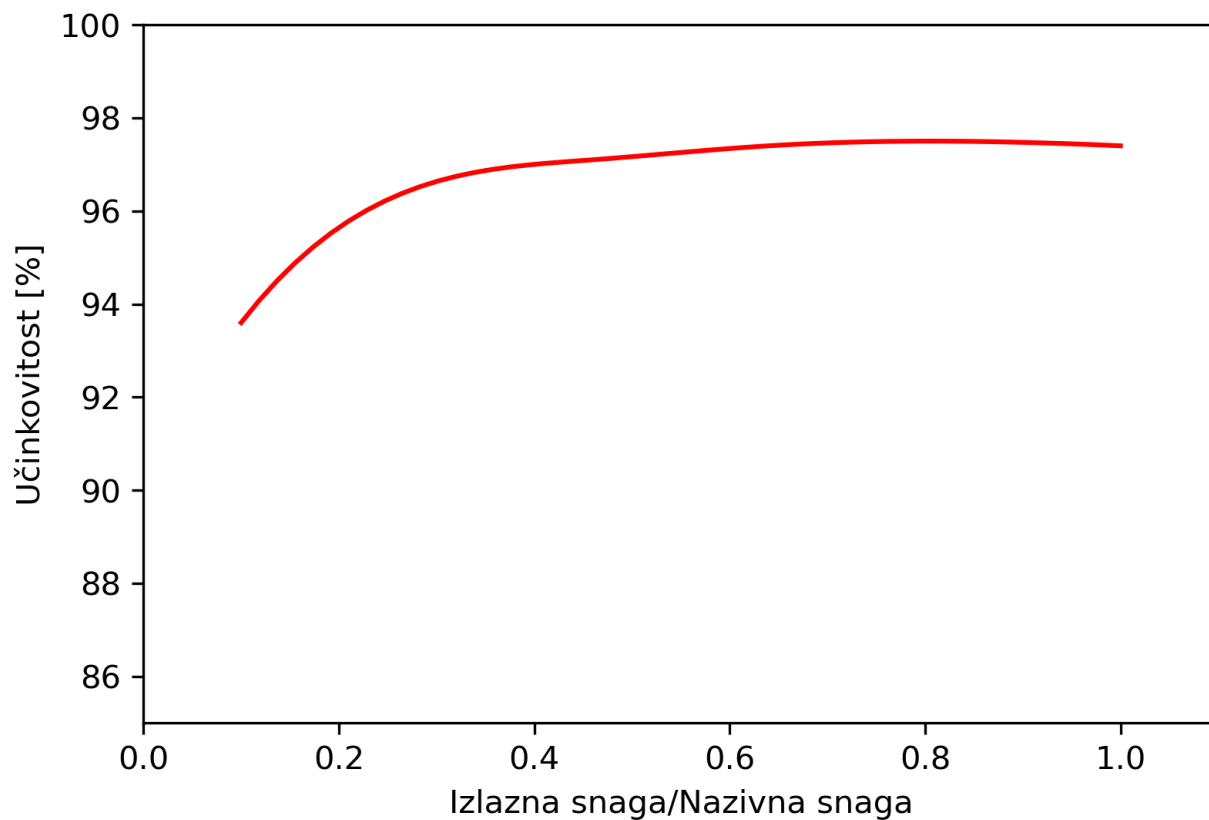
## 5.9. Model energetske pretvarača

Model baterijskog sustava koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendar-skog starenja baterije, primijenjen na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila, unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju je jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije.

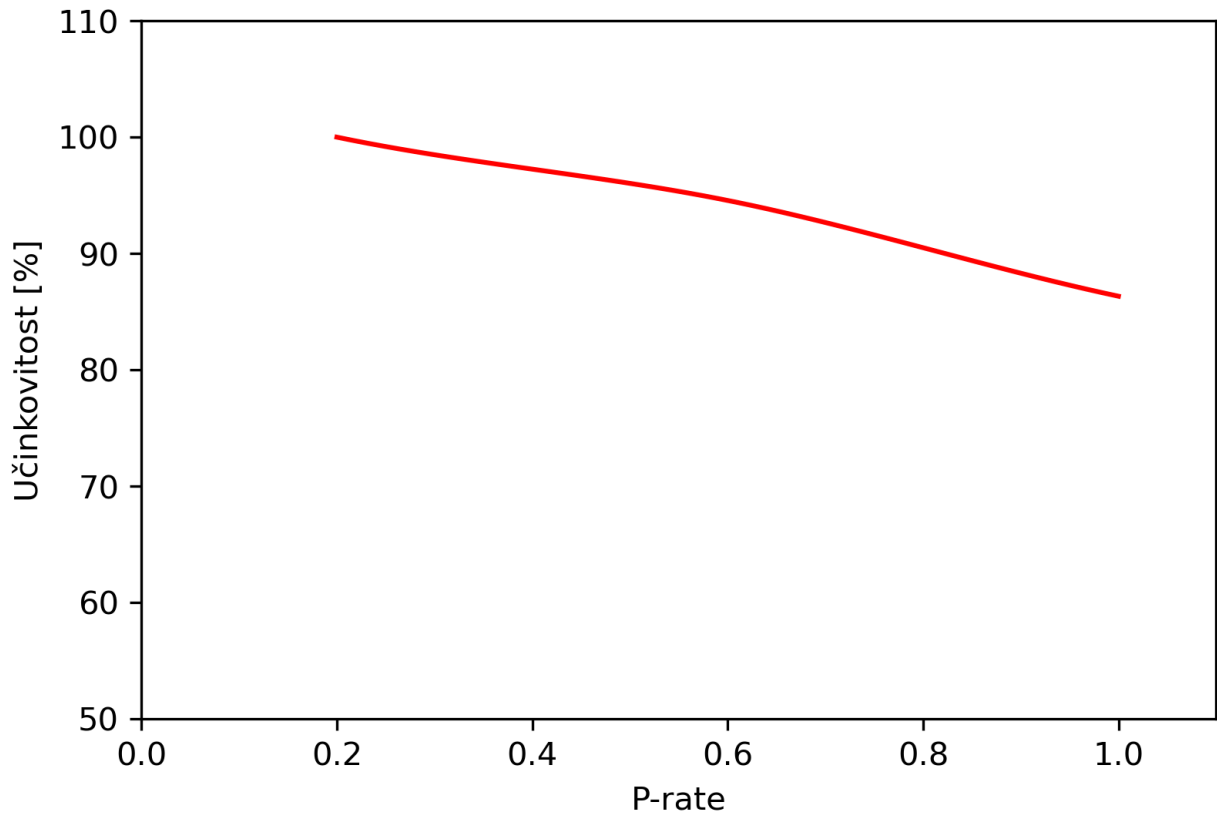
Iako je model dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice realiziran u višem sloju stohastičkim pristupom te u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja s ciljem minimizacije društvenog troška, nelinearne funkcije su linearizirane u cilju smanjenja računalne kompleksnosti i kraćeg vremena izvršavanja optimizacijskog problema. Uz to utjecaj na vrijeme izvršavanja ima i broj lineariziranih segmenata nelinearne funkcije. Što je broj segmenata veći, to s jedne strane smanjuje pogrešku napravljenu prilikom linearizacije, a s druge strane utječe na vrijeme izvršavanja simulacije te se s toga broj linearnih segmenata mora se pažljivo odabrati.

Nelinearne karakteristike učinkovitosti pretvarača o snazi te učinkovitosti punjenja i pražnjenja baterije o snazi, prikazane na slikama 5.8 i 5.9, linearizirane su pomoću tzv. tehnike više linearnih segmenata (engl. *Piecewise linear approximation*) te su prikazane na slikama 5.10 i 5.11. Tehnički podaci pretvarača preuzeti su od proizvođača opreme iz [122], dok je nelinearna karakteristika učinkovitosti punjenja i pražnjenja baterije dobivena mjerenjem. Spomenute karakteristike detaljno će se obraditi kod primjene modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Primjećuje se da se učinkovitost pretvorbe znatno smanjuje ako se izlazna snaga smanjuje ispod 30 % nazivne snage pretvarača, što znači da je poželjno da pretvarač radi u području veće izlazne snage odnosno da mu je izlazna snaga viša od 30 % nazivne snage. S druge strane, primjećuje se da se učinkovitost baterije smanjuje s povećanjem snage punjenja i pražnjenja. Iz navedenog može se zaključiti da će ukupna učinkovitost baterijskog sustava biti većeg iznosa pri nešto nižim snagama.

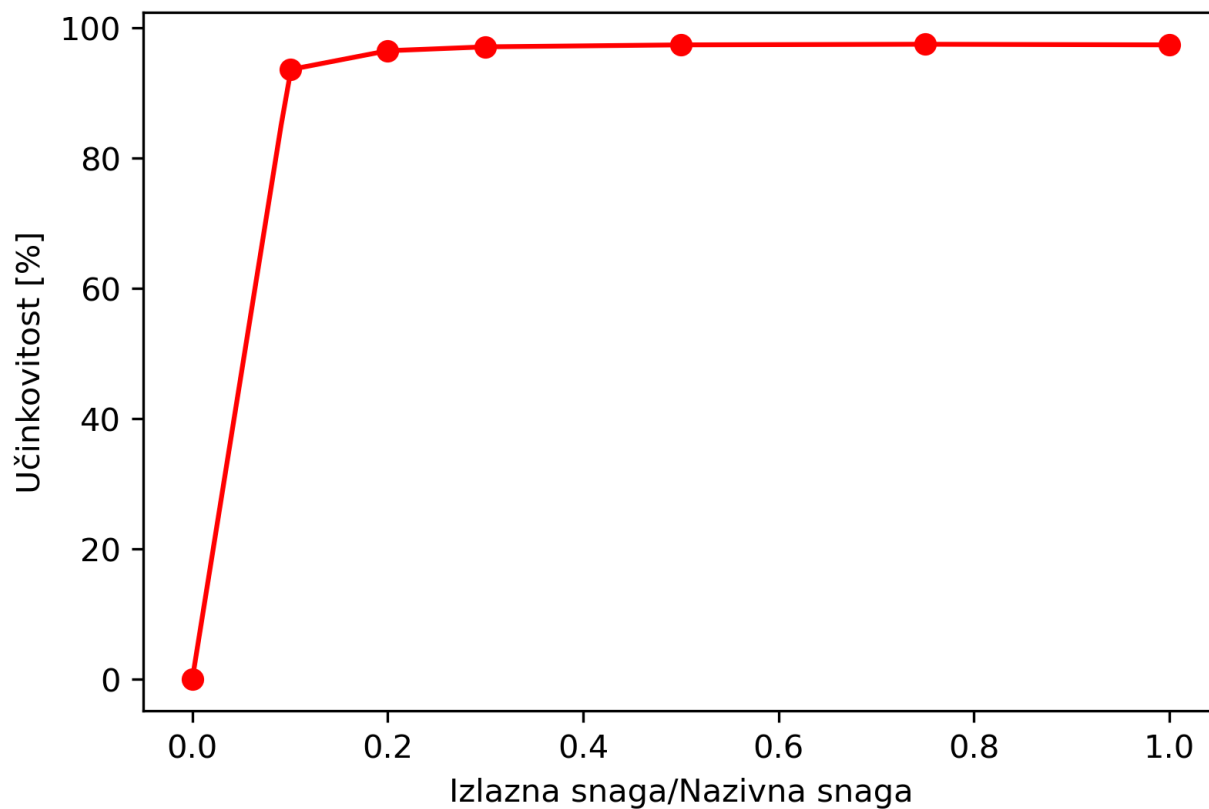


Slika 5.8: *Primjer nelinearne karakteristike učinkovitosti pretvarača ovisna o snazi*

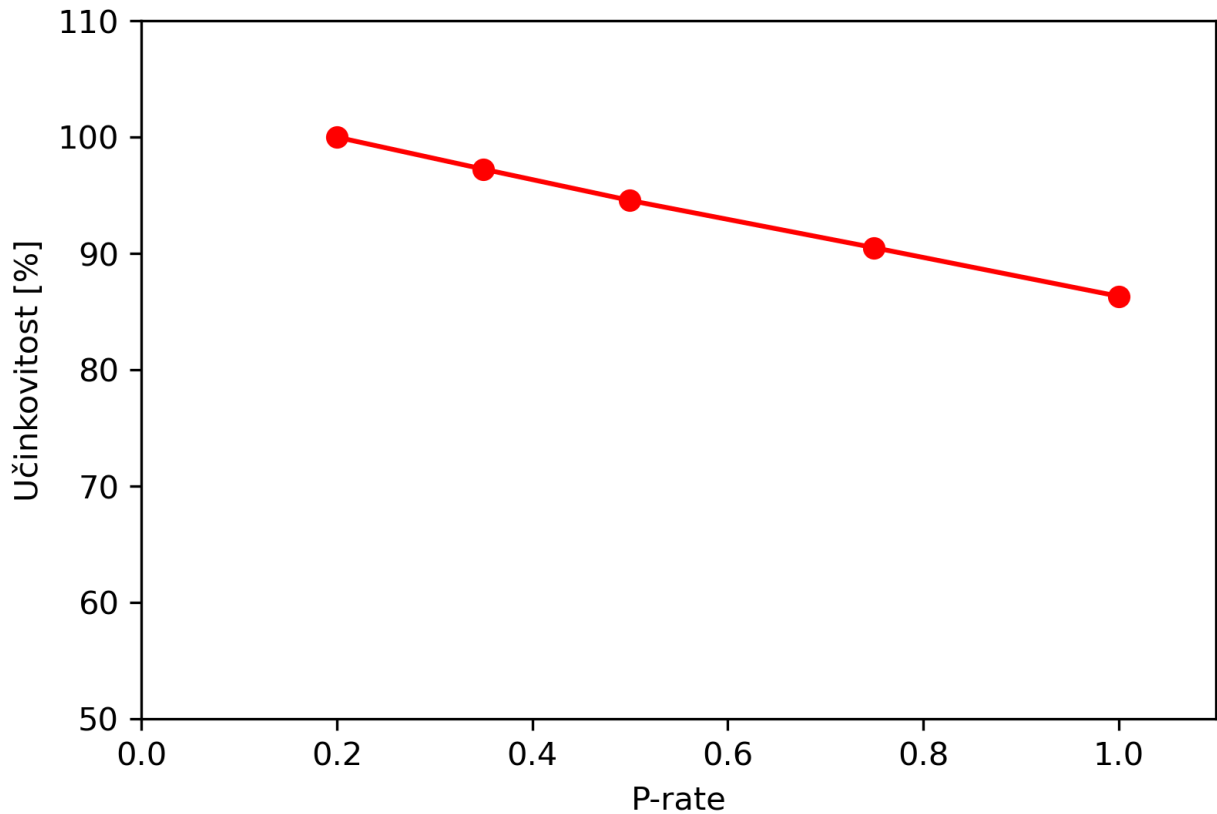


Slika 5.9: Primjer nelinearne karakteristike učinkovitosti baterije ovisna o snazi

U cilju osiguravanja ispravne linearizacije nelinearne karakteristike korišten je paket *piecewise linear fitting* (pwlfit) u kombinaciji s Python programskim jezikom. Linearizacija nelinearne karakteristike provodi se metodom najmanjih kvadrata sa željenim brojem lineariziranih segmenata [123, 124]. Linearizirane karakteristike prikazane su slikama 5.10 i 5.11.

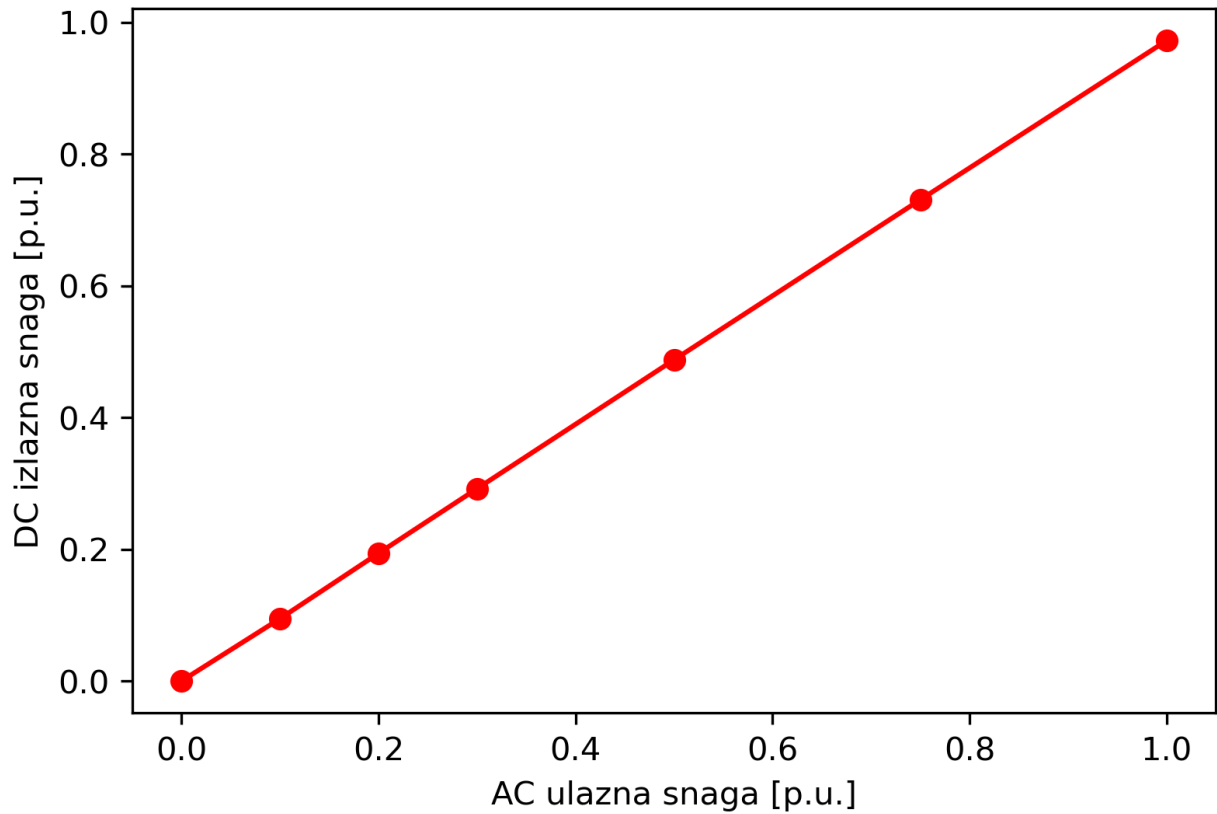


Slika 5.10: Primjer linearne karakteristike učinkovitosti pretvarača ovisna o snazi



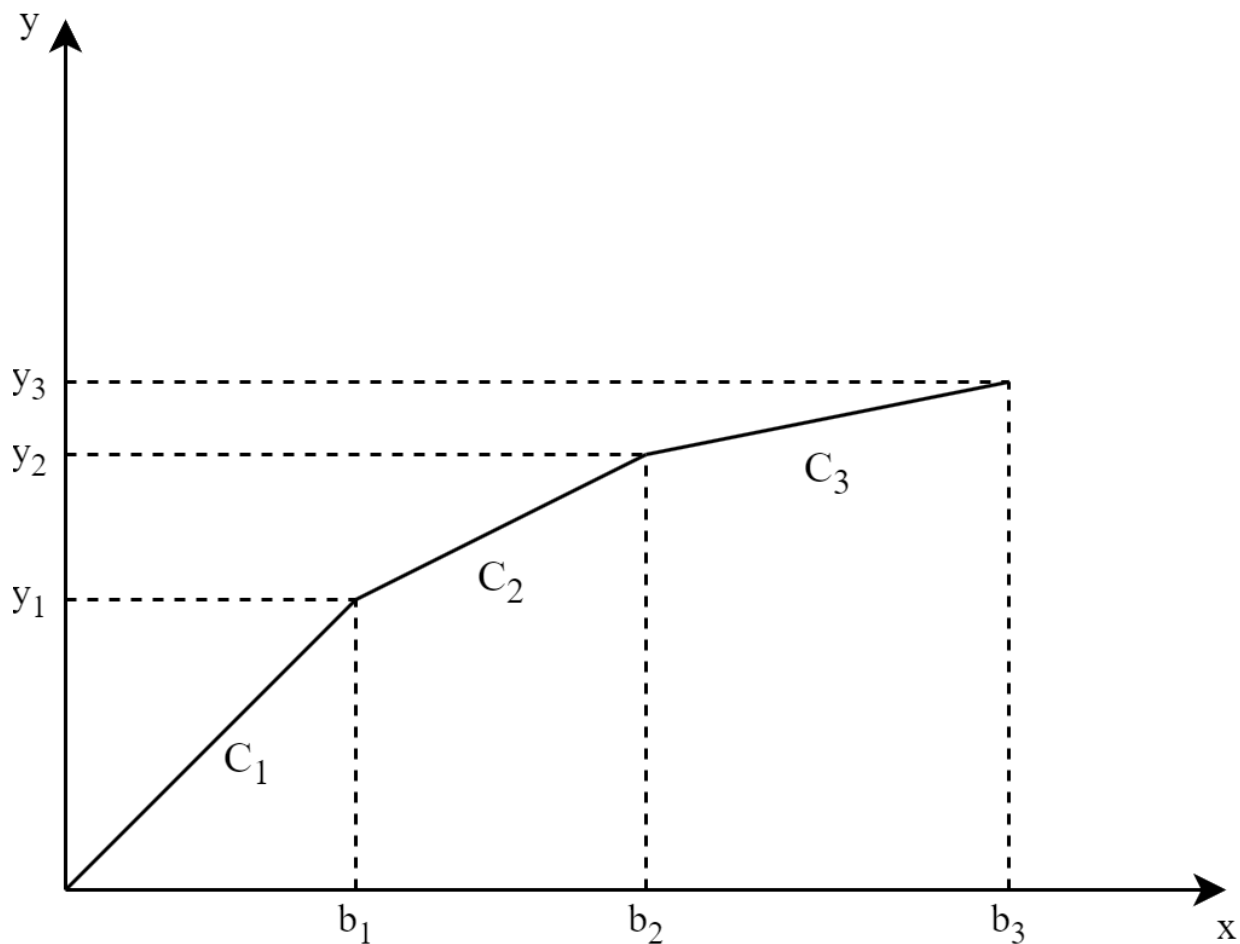
Slika 5.11: Primjer linearne karakteristike učinkovitosti baterije ovisna o snazi

Pomoću dobivenih linearnih karakteristika, odnosno koordinatnih točaka linearne aproksimacije, učinkovitosti pretvarača i baterije ovisne o snazi, potrebno je napraviti mapiranje ulaza i izlaza kao što je prikazano na slici 5.12. Mapiranje je definirano kao funkcija više linearnih segmenata (engl. *Piecewise linear function*) te je realizirano množenjem učinkovitosti i ulazne snage. Promjena nagiba je neprimjetna jer se radi o blagom nagibu, ali je primjetno u rezultatima simulacije, što će biti spomenuto prilikom obrade rezultata. [84]



**Slika 5.12:** *Primjer mapiranja vrijednosti s izmjenične (AC) strane na istosmjernu (DC) stranu*

Povezivanje više linearnih segmenata (slika 5.12), u cilju implementacije učinkovitosti pretvarača i baterije u optimizacijski model kao jednog dijela, zahtjeva poseban pristup. Potrebno je uvesti varijablu odluke  $w_i$  u točkama  $0, b_1, b_2$  i  $b_3$ , slika 5.13. Vrijednosti osi  $y$  koje odgovaraju ukupnoj izlaznoj snazi ( $y$ ) pretvarača uz određenu razinu ulazne snage  $0, b_1, b_2, b_3$  mogu se zapisati prema izrazima 5-109, 5-110, 5-111 i 5-112.



**Slika 5.13:** *Linearni segmenti i koordinatne točke linearne aproksimacije*

$$y_0 = 0 \quad (5-109)$$

$$y_1 = C_1 \cdot b_1 \quad (5-110)$$

$$y_2 = y_1 + C_2 \cdot (b_2 - b_1) \quad (5-111)$$



$$y_2 = y_2 + C_3 \cdot (b_3 - b_2) \quad (5-112)$$

Na osnovu izraza 5-109, 5-110, 5-111 i 5-112 mogu se definirati izrazi 5-113, 5-114 i 5-115.

$$\sum_{i=1}^I w_i = 1 \quad (5-113)$$

$$\sum_{i=1}^I y_i \cdot w_i = P_{out} \quad (5-114)$$

$$\sum_{i=1}^I b_i \cdot w_i = x \quad (5-115)$$

gdje su:

- |           |   |   |
|-----------|---|---|
| $w_i$     | - | varijable odluke koje pripadaju <i>Special Order Sets of type 2</i> (SOS2) varijablama, |
| $b_i$     | - | određena razina ulazne snage,   |
| $y_i$     | - | određena razina izlazne snage,  |
| $i$       | - | koordinatne točke linearne aproksimacije,   |
| $P_{out}$ | - | izlazna snaga pretvarača.   |

Primjenom SOS2 skupa varijabli omogućeno je da najviše dvije varijable odluke  $w_i$  mogu biti različite od nule, a ako postoje dvije varijable odluke različite od nule, one moraju biti susjedne (krajnje točke segmenta). Na osnovu krajnjih točaka, SOS2 algoritam linearno interpolira između tih točaka (varijabli) u cilju pronalaska izlaza s obzirom na ulaz. [84]

SOS2 varijable su implementirane prilikom razvoja modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice kako bi se osiguralo kvalitetno rješavanje funkcijskih ovisnosti.

Spomenute ovisnosti se uzimaju u obzir tijekom punjenja i pražnjenja baterije sustava pohrane energije i baterije električnog vozila, a isto se primjenjuje i za slučaj fotonaponskog invertera. Jedina je razlika u tome što proizvodnja iz fotonaponskog sustava ovisi o sunčevom zračenju te primijenjena optimizacija nema direktan utjecaj na održavanje visoke razine učinkovitosti invertera, dok kod baterijskih sustava primijenjena optimizacija ima utjecaj na održavanje visoke razine učinkovitosti pretvorbe. Naravno, ovdje je važno napomenuti da nelinearne karakteristike učinkovitosti pretvarača i baterije kao i fotonaponskog invertera ovise o tipu, proizvođaču snazi pretvarača kao važnijim faktorima što isto vrijedi i za bateriju.

## 6. Rezultati anketnog upitnika istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila

U ovom poglavlju prikazat će se rezultati dobiveni provedbom anketnog upitnika pod nazivom "Pilot anketni upitnik istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila" [125]. Navedeni rezultati objavljeni su u radu koji je prihvaćen za objavu na međunarodnoj znanstvenoj konferenciji (*International Conference on Smart Systems and Technologies*) [126].

### 6.1. Opći podaci

Prilikom provedbe anketnog upitnika, korisnici električnih vozila prvo su bili upitani za svoju dob te su rezultati prikazani na slici P.1 u prilogu. Iz rezultata se može primijetiti da su korisnici električnih vozila u većoj mjeri stariji od 41 godine i mlađi od 65 godina. Također, 94.2 % muškaraca i 5.8 % žena su popunili anketni upitni odnosno su korisnici električnih vozila.

Broj članova kućanstva korisnika električnih vozila prikazan je na slici P.2 u prilogu. Iz rezultata se može primijeti da je najčešće kućanstvo s 3 člana, zatim sa 4 člana i 2 člana te u manjoj mjeri kućanstva s 1, 5 ili više od 5 članova. Također, većinski stupanj obrazovanja korisnika električnih vozila je sa završenim VII stupnjem fakulteta (53.8 %), zatim sa završenom četverogodišnjom srednjom školom (17.3 %). Niži stupanj obrazovanja od završene srednje škole je 0 %, dok je viši stupanj obrazovanja od završenog VII stupnja fakulteta 28.9 %.

U cilju što boljeg razumijevanja navika i razine željenog komfora korisnika električnih vozila, korisnici su bili upitani za tip stambene jedinice i tip mjesta stanovanja. Iz rezultata sa slike P.3 u prilogu može se zaključiti da je anketni upitnik popunio jednak broj korisnika električnih vozila u kategoriji obiteljske kući i kategoriji stambene zgrade. Nadalje, korisnici električnih vozila su prilikom popunjavanja anketnog upitnika odabrali za tip mjesta

stanovanja prvo grad, zatim selo i na kraju prigradsko naselje prema P.4.

Iz rezultata u nastavku, dobivenih provedbom anketnog upitnika, može se doći do zaključka o tipu, vlasništvu i načinu korištenja električnog vozila te kapacitetu baterije, najčešćem mjestu i načinu punjenja baterije. Nadalje, može se zaključiti o prosječnom dnevnom korištenju električnog vozila, prioritetima i navikama prilikom punjenja te spremnosti na prihvaćanje naprednih usluga s obzirom na tip stambene jedinice i tip mjesta stanovanja. U nastavku će se prikazati rezultati provedenog anketnog upitnika za svaki tip stambene jedinice zasebno.

## 6.2. Tip stambene jedinice - obiteljska kuća

Tip električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće je potpuno električno vozilo prema rezultatima korisnika sa slike P.5 u prilogu. Nadalje, vlasništvo električnog vozila je u većoj mjeri privatno, odnosno 84 % te je način korištenja električnog vozila kao glavno i jedino vozilo, odnosno 86 % prema rezultatima prikazanim na slikama P.6 i P.7 u prilogu.

Analizom rezultata prikazanih na slikama P.5, P.6 i P.7 u prilogu može se zaključiti da su građani spremni investirati u električna vozila, kao glavna i jedina, odnosno spremni su zamijeniti konvencionalna vozila s električnim vozilima.

Iz rezultata prikazanih na slikama P.8, P.9 i P.10 u prilogu može se primijetiti da su kapaciteti baterija električnih vozila u većoj mjeri između 60 [kWh] i 90 [kWh] te snage punjenja u iznosu do 22 [kW] što otvara brojne mogućnosti za iskorištavanje dodatnih potencijala koje nude električna vozila. Također, 76.9 % korisnika izjavilo je da električna vozila pune kod kuće. Uz prijevoz kao osnovnu uslugu, električna vozila mogu ponuditi i dodatne usluge na razini elektroenergetskog sustava i korisnika (kućanstva, industrija) primjenom naprednih tehnologija upravljanja kapacitetom, odnosno naprednim održavanjem stanja napunjenosti baterije električnog vozila.

Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće je u većoj mjeri između 15 [kWh/100 km] i 20 [kWh/100 km] uz prosječno dnevno korištenje od 20 [km] do 50 [km] za radni i od 50 [km] do preko 90 [km] za neradni dan (najčešće vrijednosti) prema rezultatima prikazanim na slikama P.11 i P.12 u prilogu. Također, korisnici su izjavili da najčešće pune baterije električnih vozila između 22:00 sata i 6:00 sati te 20:00 sati i 8:00 sati radnim danom i vikendom, zatim slijedi interval punjenja od 14:00 sati do 22:00 sata, slika P.13 u prilogu.

## 6. Rezultati anketnog upitnika istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila

---

Uz pretpostavljen kapacitet baterije od 70 [kWh] i dnevno korištenje električnog vozila od 50 [km], potrebna električna energija za uslugu prijevoza je približno 10-ak [kWh] iz čega proizlazi dostupnost neiskorištenog kapaciteta baterije od približno 60-ak [kWh] za pružanje dodatnih usluga. Također, uz pretpostavljeno dnevno korištenje električnog vozila od 50 [km] proizlazi činjenica da je 90 % vremena električno vozilo u stanju mirovanja, odnosno parkirano.

Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće prikazani su na slici P.14 u prilogu. Može se zaključiti da korisnicima većinom nije važno najkraće vrijeme punjenja i potpuno stanje napunjenosti baterije, ali im je važno osigurati uštede uz mogućnost stalnog priključka vozila na punionicu (u stanju mirovanja). Nadalje, prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila prikazani su na slici P.15 u prilogu. Iz rezultat sa slike P.15 može se zaključiti da odgovori korisnika prate nastala stanja, odnosno aktivnosti prema prioritetima te u većoj mjeri korisnici nisu spremni na kompromis.

Slika P.16 u prilogu prikazuje ovisnost financijske mjesečne naknade o vremenskom produljenju punjenja baterije električnog vozila na kućnoj punionici. Iz rezultata se može zaključiti da se s određenim korisnicima električnih vozila može pronaći kompromisno rješenje, odnosno da bi neki korisnici pristali na produljenje vremena punjenja na kućnoj punionici za određenu financijsku naknadu. Također, može se primijetiti da visina mjesečne financijske naknade ovisi o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila na kućnoj punionici.

Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini prikazuje slika P.17 u prilogu. Može se primijetiti da veći broj korisnika električnih vozila pristaje na do 2 vremenska produljenja punjenja tjedno u trajanju od 30 minuta do 2 sata. Preko 2 vremenska produljenja punjenja tjedno raste nezainteresiranost kod korisnika. Nadalje, korisnici električnih vozila su izjavili da im je najnepovoljniji slučaj da baterija električnog vozila nije napunjena prije odlaska na posao, zatim prije i poslije dolaska s posla te neradnim danom ili praznikom.

Na pitanje "Molimo Vas da približno procijenite Vaše prosječne mjesečne troškove za električnu energiju u Vašem kućanstvu od trenutka kada ste počeli koristiti električno vozilo:" korisnici električnih vozila izjavili su da je to u intervalu od 15 [€] do 30 [€] (30.8 %), zatim preko 135 [€] (15.4 %) te u intervalima od 60 [€] do i od 75 [€] do 90 [€] (11.5 % i 11.5 %). Preostali postotak su manje zatupljeni intervali. Nadalje, na pitanje "U kojoj mjeri troškovi

punjenja električnog vozila povećavaju iznos Vašeg računa za električnu energiju u Vašem kućanstvu od trenutka korištenja električnog vozila?” korisnici električnih vozila odgovorili su da su računi približno jednakog iznosa (11.5 %), do 10 % (26.9 %), do 25 % (34.6 %), do 50 % (15.4 %) te preko 50 % (11.5 %).

Interes za primjenu naprednih usluga u kategoriji obiteljske kuće od strane korisnika električnih vozila prikazano je na slici P.18 u prilogu. Iz rezultata se može zaključiti da je većina korisnika ili njih 76 % pokazalo interes za primjenu naprednih usluga.

Na osnovu prikazanih rezultata (slike P.14-P.18 u prilogu) se također vidi mogućnost primjene naprednih tehnologija upravljanja kapacitetom (održavanje stanja napunjenosti) baterije električnog vozila jer korisnici električnih vozila pristaju na kompromise u cilju povećanja ušteda.

### 6.2.1. Upravljanje električnom energijom u kućanstvu

Prilikom provedbe anketnog upitnika, korisnici električnih vozila u kategoriji obiteljske kuće bili su upitani za spremnost na prihvaćanje upravljanja električnom energijom u kućanstvu uzimajući u obzir udobnost korisnika kućanstva. Na slikama P.19, P.20, P.21, P.22 i P.23 u prilogu prikazani su rezultati. Iz rezultata se može zaključiti da većina korisnika električnih vozila nije spremna na kompromis u vidu smanjenja udobnosti korisnika kućanstva. Nadalje, povezivanjem dobivenih rezultata s prioritetima prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće (slika P.14 u prilogu) može se zaključiti još jednom da korisnicima nije bitna brzina punjenja niti potpuna napunjenost baterije električnog vozila nego samo osigurati smanjenje troškova uz udobnost korisnika kućanstva. Iz navedenoga, dolazi se do zaključka da se efikasnost u radu kućanstva mora osigurati integracijom stacionarnih baterijskih sustava za pohranu energije i/ili električnih vozila.

Rezultati jednim dijelom proizlaze iz činjenice da 50 % korisnika električnih vozila nije moralo smanjiti snagu punjenja baterije električnog vozila na kućnoj punionici. S druge strane, preostali broj korisnika električnih vozila su izjavili da su njih 30.8 % vrlo rijetko, 7.7 % rijetko te 11.5 % često morali smanjiti snagu punjenja baterije električnog vozila na kućnoj punionici. Nadalje, 72 % korisnika električnih vozila izjavilo je da im se nikada nije dogodilo da nisu mogli napuniti bateriju električnog vozila na kućnoj punionici, 24 % je izjavilo da im se to vrlo rijetko dogodilo i 4 % da im se to rijetko dogodilo.

### 6.2.2. Osiguravanje ušteda i povećanje udobnosti u kućanstvu

Osim upravljanja električnom energijom, korisnici električnih vozila u kategoriji obiteljske kuće bili su upitani za spremnost na nove investicije u cilju osiguravanja ušteda i povećanja udobnosti korisnika kućanstva. Rezultati su prikazani na slikama P.24, P.25, P.26 i P.27 u prilogu.

Iz rezultata na slici P.24 u prilogu može se zaključiti da oko 40 % korisnika električnih vozila već ima integriranu fotonaponsku elektranu snage od 4 [kW] do 10 [kW] (boje na grafu koje nisu definirane u legendi) dok su ostali spremni na investiranje u izgradnju. Samo 4 % korisnika električnih vozila se izjasnilo da nije za investiranje u fotonaponsku elektranu.

Spremnost korisnika električnih vozila za investiranje u baterijski sustav pohrane energije, odnosno stacionarnu bateriju je 56 % dok njih 44 % nije za investiranje prema rezultatima prikazanim na slici P.25 u prilogu. Nadalje, većina korisnika električnih vozila je za investiranje do 9 000 [€] u baterijski sustav pohrane energije.

Rezultati na slici P.26 u prilogu prikazuju spremnost korisnika električnih vozila na investiranje u sustav za upravljanje električnom energijom u kućanstvu. Ukupno 72 % korisnika pristaje na investicije, većina je za iznos investicije do 1 000 [€], ali određeni korisnici pristaju i na veće investicije.

Spremnost korisnika električnih vozila na prihvaćanje novih modela naplate električne energije je 88 % što pokazuju rezultati na slici P.27 u prilogu. Većina korisnika električnih vozila je za osiguranje ušteda i udobnosti korisnika kućanstva, zatim samo za uštedu i na kraju samo za udobnost korisnika kućanstva.

Na pitanje "Koje biste radnje poduzeli u slučaju da se poveća učestalost nemogućnosti punjenja vozila na kućnoj punionici?", korisnici električnih vozila prvo bi investirali u vlastitu elektranu, zatim bi otišli na javnu punionicu, povećali bi iznos zakupljene snage te bi osigurali sustav upravljanja energijom. Navedeno opravdava prikazane rezultate dobivene anketiranje korisnika električnih vozila u vidu donošenja investicijskih odluka.

### 6.3. Tip stambene jedinice - stambena zgrada

U kategoriji stambene zgrade tip električnog vozila je potpuno električno vozilo, vlasništvo električnog vozila je u većoj mjeri privatno (92 %) kao i način korištenja električnog vozila kao glavno i jedino vozilo (76.9 %) prema rezultatima prikazanim na slikama P.28, P.29 i

**P.30** u prilogu. Kao i u kategoriji obiteljske kuće, analizom rezultata može se zaključiti da su građani spremni investirati u električna vozila, odnosno spremni su zamijeniti konvencionalna vozila s električnim vozilima.

Iz rezultata prikazanim na slici **P.31** u prilogu može se primijetiti da je kapacitet baterije električnog vozila s najvećim postotkom između 70 [kWh] i 80 [kWh], ali ukupno gledano prevladavaju manji kapaciteti baterija i to između 20 [kWh] i 60 [kWh]. Uspoređujući dobivene rezultate s rezultatima iz kategorije obiteljske kuće, može se primijetiti da prevladavaju kapaciteti nešto nižeg iznosa što se može obrazložiti s dnevnim korištenjem električnog vozila.

Najčešće snage korištene za punjenje baterija električnih vozila od strane korisnika su 22 [kW] na javnim punionicama prema rezultatima prikazanim na slikama **P.32** i **P.33** u prilogu. Boje na grafu koje nisu definirane u legendi se odnose na specijalne slučajeve punjenja baterije električnog vozila (punjenje u garaži, na parkingu, kod kuće, snage punjenja ispod 22 [kW]). Rezultati su očekivani jer korisnici električnih vozila koji žive u stanu najčešće kao jedinu opciju za punjenje baterija električnih vozila imaju javne punionice.

Korisnici električnih vozila u kategoriji stambene zgrade bili su upitani o potencijalnim problemima koji mogu nastati prilikom potrebe za punjenjem baterije električnog vozila na javnim punionicama. Rezultati prikazani na slici **P.34** u prilogu pokazuju da vrlo rijetko nastaju potencijalni problemi i samo 7.7 % korisnika je izjavilo da im se problemi dešavaju vrlo često.

Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji stambene zgrade je u većoj mjeri između 15 [kWh/100 km] i 20 [kWh/100 km], zatim slijedi potrošnja od 10 [kWh/100 km] do 15 [kWh/100 km] prema rezultatima na slici **P.35** u prilogu. Kao i u kategoriji obiteljske kuće, ovakvi rezultati mogu proizaći iz uobičajenog načina korištenja električnog vozila, odnosno da se električno vozilo koristi za vožnju unutar grada pri nižim brzinama što dovodi i do niže potrošnje električne energije.

Najčešće dnevno korištenje električnog vozila u kategoriji stambene zgrade koje prevladava za radni dan je između 10 [km] i 30 [km]. Za neradni dan može se primijetiti intenzivnije korištenje električnog vozila tako da pojedini korisnici prelaze i preko 90 [km] po danu. Rezultati su prikazani na slici **P.36** u prilogu.

Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade malo se razlikuju u odnosu na kategoriju obiteljske kuće. Korisnicima električnih vozila u ovom slučaju je bitno vrijeme, odnosno može se zaključiti da im je bitno osigurati stanje na-



punjenosti baterije za pokrivanje dnevnih potreba uz najniže troškove prema rezultatima prikazanim na slici P.37 u prilogu. Također, prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade se nešto razlikuju u usporedbi s onima u kategoriji obiteljske kuće. Ovdje se može primijetiti da korisnici za aktivnosti nižeg prioriteta pristaju na produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila prema rezultatima prikazanim na slici P.38 u prilogu. Kako i u kategoriji obiteljske kuće, ovdje su korisnici električnih vozila izjavili da im je najnepovoljniji slučaj da baterija električnog vozila nije napunjena prije odlaska na posao, zatim prije dolaska s posla te neradnim danom ili praznikom.

Slika P.39 u prilogu prikazuje ovisnost financijske mjesečne naknade o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila na javnoj punionici. Iz rezultata se može zaključiti da su korisnici električnih vozila spremni prihvatiti produljenje vremena punjenja do 30 minuta na javnoj punionici, ali satna produljenja nisu spremni prihvatiti. Rezultati su za očekivati jer korisnici električnih vozila nisu kod kuće (u usporedbi s rezultatima u kategoriji obiteljske kuće) te zbog toga nisu zainteresirani ostaviti električno vozilo satima dulje spojeno na punionicu.

Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini u kategoriji stambene zgrade vidi se u određenoj mjeri za 2 produljenja tjedno prema rezultatima prikazanim na slici P.40 u prilogu. Također, korisnici su izjavili da najčešće pune baterije električnih vozila između 22:00 sata i 6:00 sati te je primjetno da i tijekom dana pune baterije električnih vozila najčešće u intervalu od 14:00 sati i 22:00 sata radnim danom i vikendom, slika P.41 u prilogu.

Na pitanje "Molimo Vas da približno procijenite Vaše prosječne mjesečne troškove za električnu energiju u Vašem kućanstvu od trenutka kada ste počeli koristiti električno vozilo:" korisnici električnih vozila prvo su odabrali interval od 15 [€] do 30 [€] (53.8 %), zatim od 45 [€] do 60 [€] (19.2 %). U preostalom postotku su manje zatupljeni intervali.

U cilju razumijevanja problema koji mogu nastavi prilikom punjenja, odnosno održavanja razine napunjenosti baterije električnog vozila, korisnicima električnih vozila postavljeno je pitanje "Koliko često Vam se dogodilo da niste u mogućnosti napuniti električno vozilo na punionici?". 46.2 % korisnika električnih vozila izjavilo je vrlo rijetko, 7.7 % rijetko, 23.1 % često, 7.7 % vrlo često te 15.4 % nikada. Također, između ostalog su izjavili da im smeta nestandardizirana prijava na punionice, parkiranje konvencionalnih vozila na punionicama, ugašena/neispravna punionica, nedovoljno brzo punjenje (snaga punjenja niža od dozvoljene

## *6. Rezultati anketnog upitnika istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila*

---

snage punjenja električnog vozila) te zauzetost priključaka na punionicama. Ovdje se može primijetiti da dolazi do izražaja ovisnost korisnika električnih vozila iz kategorije stambene zgrade o javnim punionicama u usporedbi s korisnicima električnih vozila iz kategorije obiteljske kuće.

Interes za primjenu naprednih usluga u kategoriji stambene zgrade prikazan je na slici **P.42** u prilogu. Prema rezultatima, 68 % korisnika električnih vozila izjavilo je da ih zanimaju nove tehnologije te 12 % da ih zanima prihod od pružanja pomoćnih usluga.

## 7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

### 7.1. Opis ulaznih podataka

U ovom potpoglavlju prikazani su ulazni podaci potrebni za provođenje optimizacijskog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Tablica 7.1 prikazuje instalirane vršne snage fotonaponskih sustava instaliranih na zgradama, očekivani broj električnih vozila na parkingu zgrada, broj baterijskih sustava pohrane energije koje posjeduju zgrade te upravljiva trošila unutar zgrada. Nadalje, pretpostavlja se da je radno vrijeme djelatnika od 8:00 sati do 16:00 sati iz čega proizlazi da su električna vozila priključena na punionice u navedenom vremenu.

**Tablica 7.1:** *Ulazni podaci aktivnih kupaca*

Aktivni kupac	$Pg_{installed}^{AC}$ [kW]	EV	BESS	Trošila
Zgrada 1	90	10	5	HVAC,WH
Zgrada 2	45	7	3	HVAC,WH
Zgrada 3	45	5	0	HVAC,WH

Iz ulaznih podataka može se primijetiti da svaka zgrada predstavlja jednog aktivnog kupca koji je član energetske zajednice te ima integrirane različite elemente. Zbog različitih zahtjeva za električnom energijom od strane aktivnih kupaca električne energije unutar energetske zajednice za očekivati je da će postojati potreba za dijeljenjem električne energije unutar energetske zajednice. Kako je već u prethodnim poglavljima spomenuto, zbog prostornog ograničenja integracije obnovljivih izvora, aktivni kupci viškove električne energije

putem lokalnog tržišta mogu ponuditi članovima energetske zajednice kojima je potrebna, odnosno onima koji imaju nižu instaliranu snagu ili ne posjeduju proizvodne sustave.

### 7.1.1. Tehničke karakteristike mreže

Cijene električne energije koje će se koristiti prilikom provođenja simulacija dobivene su na način opisan u potpoglavlju 5.4.1 te su prikazane u tablici 7.2.

**Tablica 7.2:** *Cijene električne energije*

Aktivni kupac	$Cg^{\text{imp}}$ [€/kWh]	$Cg^{\text{exp}}$ [€/kWh]	$Cl^{\text{exp}}$ [€/kWh]	$Cl^{\text{imp}}$ [€/kWh]
NT/VT				
Zgrada 1	0.124/0.203	0.035	0.11	0.125
Zgrada 2	0.124/0.203	0.035	0.11	0.125
Zgrada 3	0.124/0.203	0.035	0.11	0.125

Cijena dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice, odnosno cijena električne energije na lokalnom tržištu definirana je kao prosjek cijena električne energije više i niže tarife bez naknada za korištenje distribucijske i prijenosne mreže, naknade za obnovljive izvore energije i visokoučinkovitu kogeneraciju te PDV-a i iznosi 0.11 [€/kWh]. Cijenu od 0.11 [€/kWh] dobivaju članovi energetske zajednice prilikom predaje električne energije na lokalno tržište. S druge strane, članovi koji kupuju električnu energiju s lokalnog tržišta plaćaju cijenu od 0.125 [€/kWh] što je cijena električne energije uvećana za naknadu za korištenje distribucijske mreže koja iznosi 0.015 [€/kWh] dobivena kao prosjek više i niže dnevne tarife za korištenje distribucijske mreže.

Cijene električne energije za primjenu za primjenu V2B usluge ( $C^{\text{evdch}}$  [€/kWh] i  $C^{\text{evch}}$  [€/kWh]), odnosno cijene razmijene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada odredit će se pomoću optimizacijskog algoritma koji je ujedno i jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije te je detaljno opisan u potpoglavlju 4.3.

Maksimalna snaga koja se može razmjenjivati s mrežom i na lokalnom tržištu električne energije, prilikom preuzimanja i predaje električne energije, prikazuje tablica 7.3.

**Tablica 7.3:** Maksimalna snaga razmijene električne energije s mrežom i lokalnim tržištem

Aktivni kupac	$Pg_{p,max}^{imp}$ [kW]	$Pg_{p,max}^{exp}$ [kW]	$Pl_{p,max}^{imp}$ [kW]	$Pl_{p,max}^{exp}$ [kW]
Zgrada 1	110.4	90	110.4	90
Zgrada 2	110.4	45	110.4	45
Zgrada 3	110.4	45	110.4	45

Pretpostavlja se da je zgrada s trofaznim priključkom priključne snage 110.4 kW u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže te prema tome spada u grupu 3 (od 50 kW do uključivo 500 kW) prema [127]. S obzirom na snagu od 110.4 kW proizlazi da je nazivna struja trolejnog limitatora za trofazni simetrični priključak 160 A, iz čega proizlazi da je maksimalna snaga po fazama 36.8 kW.

Priključne snage u smjeru predaje električne energije u mrežu definirane su na osnovu instaliranog proizvodnog postrojenja aktivnog kupca. Za zgrade, priključne snage u smjeru predaje iznose 90 kW i 45 kW te spadaju u grupu 1 (do uključivo 50 kW) i grupu 2 (od 50 kW do uključivo 100 kW) prema [127].

S obzirom na definirane priključne snage u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže odabran je tarifni model koji je detaljno opisan u potpoglavlju 5.4.1. Za zgrade je odabran Crveni tarifni model u kome se dodatno obračunava vršna radna snaga. Navedene priključne snage aktivnih kupaca su određene prema mrežnim pravilima distribucijskog sustava u Republici Hrvatskoj [127]. Priključne snage u smjeru predaje električne energije u mrežu na obračunskim mjernim mjestima aktivnih kupaca ne smiju biti veće od priključnih snaga u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže na tim obračunskim mjernim mjestima prema [96].

### 7.1.2. Tehničke karakteristike fotonaponskog sustava

Prilikom određivanja istosmjerne snage (DC) ( $Pge_{p,t}^{DC}$  [kW]) fotonaponskog sustava u obzir se uzima korisnost pretvorbe ( $\eta_m$  [%]), površina ( $Am$  [ $m_2$ ]), faktor degradacije ( $Sk$ ), nazivna radna temperatura ( $NOCT$  [ $^{\circ}C$ ]) i temperaturni koeficijent snage ( $\gamma_{pv}$  [%/ $^{\circ}C$ ]) fotonaponskog modula. Uz navedeno, potrebno je poznavati i kut nagiba ( $\beta$  [ $^{\circ}$ ]) i azimut ( $\gamma$  [ $^{\circ}$ ]) površine modula, geografsku širinu ( $\phi$  [ $^{\circ}$ ]), dan u godini ( $dn$ ) i koeficijent refleksije okoline ( $\rho$ ) u cilju određivanja sunčevog zračenja na površinu pod kutom. Izračun izlazne snage fotonaponskog sustava detaljno je opisan u potpoglavlju 5.5. U tablici 7.4 prikazane

7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

su karakteristike fotonaponskih modula korištenih kao ulaznih parametara optimizacijskog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice dok su ulazni podaci položaja fotonaponskih modula prikazani u tablici 7.5. Ulazni podaci fotonaponskih modula preuzeti su od proizvođača opreme BISOL Group, d.o.o. [128].

**Tablica 7.4:** *Ulazni podaci fotonaponskih modula [128]*

	$\eta_m$ [%]	$A_m$ [ $m_2$ ]	$Sk$	$NOCT$ [ $^{\circ}C$ ]	$\gamma_{pv}$ [%/ $^{\circ}C$ ]
Fotonaponski modul	15.3	1.64	1	44	-0.37

**Tablica 7.5:** *Ulazni podaci položaja fotonaponskih modula*

Aktivni kupac	$\beta$ [ $^{\circ}$ ]	$\phi$ [ $^{\circ}$ ]	$dn$	$\gamma$ [ $^{\circ}$ ]	$\rho$
Zgrada 1	32	45.557	180	5	0.15
Zgrada 2	34	45.558	180	10	0.15
Zgrada 3	34	45.556	180	15	0.15

Na osnovu izlazne istosmjernje snage (DC) ( $Pge_{p,t}^{DC}$  [kW]) fotonaponskog sustava potrebno je odrediti izlaznu izmjeničnu snagu (AC) fotonaponskog sustav uzimajući u obzir učinkovitosti pretvarača ovisne o opterećenju ( $\eta_{inv}(Pge_{p,t}^{DC})$ ). Implementacija funkcijskih ovisnosti detaljno je opisana u potpoglavlju 5.9. Za slučaj zgrade odabrana je učinkovitost ovisna o opterećenju za inverter SHP 100-20 za nazivni ulazni napon te je prikazana u tablici 7.6. Pretpostavljeno je da zgrada posjeduje jedan inverter iz razloga da se smanji računalna kompleksnost modela iako je ovdje važno naglasiti da se u praksi koristi više invertera manjih snaga kod ovakvih fotonaponskih sustava. Tehnički podaci preuzeti su od proizvođača opreme SMA Solar Technology AG [122].

**Tablica 7.6:** Učinkovitost ovisna o opterećenju za inverter SHP 100-20 [122]

Izlazna snaga [%]	Učinkovitost [%]
5	97.4
10	98.6
20	98.6
25	98.7
30	98.7
50	98.5
75	98.2
100	97.9

### 7.1.3. Tehničke karakteristike baterijskog sustava za pohranu električne energije

Kapacitet baterije baterijskog sustava pohrane energije odabran je na osnovu dostupnih baterija na tržištu dok je kapacitet baterije električnog vozila odabran na osnovu provedene ankete predstavljene u poglavlju 6.

Dozvoljeni raspon stanja napunjenosti baterije sustava pohrane energije odabran je da bude između 20 % i 80 % stanja napunjenosti što povoljno utječe na životni vijek baterije jer se izbjegava dubinsko pražnjenje i prekomjerno punjenje baterije. Tehnički podaci preuzeti su od proizvođača opreme SMA Solar Technology AG [129].

**Tablica 7.7:** Ulazni podaci za baterijski sustav pohrane energije

$SOEbess$	$Pbess_{max}^{ch,AC}$	$Pbess_{max}^{dch,AC}$	$SOEbess_{max}$	$SOEbes_{min}$
[kWh]	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]
9.8	3.7	3.7	7.84	1.96

Učinkovitost pretvarača energetske elektronike SBS3.7-10 ovisna o opterećenju za baterijski sustava pohrane energije i nazivni ulazni napon prikazana je u tablici 7.8, pri čemu su tehnički podaci preuzeti od proizvođača opreme SMA Solar Technology AG [122]. Omjer snage pretvarača energetske elektronike i dozvoljene snage punjenja baterije sustava pohrane energije iznosi 1:3.

**Tablica 7.8:** Učinkovitost ovisna o opterećenju za pretvarač energetske elektronike SBS3.7-10 [122]

Izlazna snaga [%]	Učinkovitost [%]
10	93.6
20	96.5
30	97.1
50	97.4
75	97.5
100	97.4

Kapacitet i snaga punjenja baterije električnog vozila odabrani su s obzirom na trenutno dostupna električna vozila na tržištu i ankete vlasnika električnih vozila predstavljene u poglavlju 6. Dozvoljeni raspon stanja napunjenosti baterije električnog vozila je odabran da bude između 20 % i 80 % stanja napunjenosti. Podaci o bateriji električnog vozila prikazani su u tablici 7.9.

**Tablica 7.9:** Ulazni podaci baterije električnog vozila

$SOE_{ev}$	$P_{ev}^{ch,AC_{max}}$	$P_{ev}^{dch,AC_{max}}$	$SOE_{ev_{max}}$	$SOE_{ev_{min}}$
[kWh]	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]
64	11	11	51.2	12.8

Prilikom razvoja modela baterijskog sustava za pohranu električne energije i baterije električnog vozila u obzir se uzimaju dvije pretpostavke. Prva pretpostavka je da su predložena baterija sustava pohrane energije i pretvarač SBS3.7-10, odnosno punjač, kompatibilni i s obzirom na nazivnu snagu pretvarača ograničeno je punjenje i pražnjenje baterije sustava pohrane energije na 3.7 kW. Druga pretpostavka, koja se uzima u obzir, da je učinkovitost ovisna o opterećenju pretvarača energetske elektronike, odnosno punjača baterije električnog vozila jednaka pretvaraču SBS3.7-10. Nadalje, učinkovitost ovisna o opterećenju pretvarača energetske elektronike prikazana u tablici 7.8 primjenjuju se u oba načina rada, odnosno pri punjenju i pražnjenju baterije.

Nadalje, jedan od znanstvenih doprinosa ove disertacije je unapređenje modela baterijskog sustava za pohranu s učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju. U cilju određivanja energetske učinkovitosti, s kojom se uzima u obzir učinkovitost vezana uz naboj



i učinkovitost vezana uz napon, provedena su mjerenja na litij-željezo-fosfatnoj (LiFePO<sub>4</sub>) bateriji kapaciteta 160 Ah i baterijskoj ćeliji 18650 *Sony* (US18650VTC5) kapaciteta 2500 mAh. Mjerenja su provedena u Laboratoriju za obnovljive izvore energije (OIE) FERIT-a Osijek pomoću dva Victron Energy MultiPlus Compact 24/1600/40- 16 230V Invertera/Punjača i uređaja ICharger 4010DUO, a rezultati su prikazani u tablicama 7.10 i 7.11. Uz baterijsku ćeliju 18650 *Sony*, eksperimentalna mjerenja provedena su i na baterijskim ćelijama 18650HG2 *LG* kapaciteta 3000 mAh i NCR18650B *Panasonic* kapaciteta 3400 mAh te na olovnoj gel (Pb GEL) baterije kapaciteta 110 Ah u cilju što boljeg razumijevanja ponašanja baterije prilikom punjenja i pražnjenja.

**Tablica 7.10:** *Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za bateriju LiFePo<sub>4</sub>*

<i>P-rate</i>	$\eta^{cyc}$ [%]
0.07	95.83
0.16	94.02
0.22	95.93
0.28	95.45

**Tablica 7.11:** *Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za baterijsku ćeliju 18650 SONY (US18650VTC5)*

<i>P-rate</i>	$\eta^{cyc}$ [%]
0.2	100
0.5	94.56
1	86.33

Prema [89], *P-rate* se može definirati kao omjer snage punjenja ili pražnjenja u vatima (W) i nazivnog energetske kapacitet baterije u vat-satima (Wh).

U tablici 7.11, *P-rate* se dobije na osnovu približne srednje vrijednosti ciklusa punjenja i pražnjenja jer uređaj ICharger 4010DUO nema mogućnost zadavanja i održavanja snage punjenja i pražnjenja nego samo mogućnost zadavanja struje punjenja odnosno pražnjenja. S druge strane, Victron Energy MultiPlus Compact 24/1600/40-16 230V Inverter/Punjač omogućava zadavanje i održavanje željene snage punjenja odnosno pražnjenja baterije pa je moguće preciznije odrediti *P-rate*., tablica 7.10. Također, omjer nazivnih snaga pretvarača (Victron Energy MultiPlus Compact 24/1600/40-16) i baterije (LiFePO<sub>4</sub>) je 1:3 (što se vidi

7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

i iz tablice 7.10) te će se ti podaci koristiti prilikom provođenja simulacija jer su dobiveni na mjerenju većeg sustava u usporedbi s baterijskom ćelijom, tablica 7.12.

Energetske učinkovitosti dobivene su na osnovu punjenja i pražnjenja prema izrazu 7-1.

$$\eta^{cyc} = \eta^{ch} \cdot \eta^{dch} = \frac{E^{dch}}{E^{ch}} \quad (7-1)$$

gdje su:

- $\eta^{cyc}$  - povratna učinkovitost punjenja baterije (engl. *Round-trip efficiency*),
- $\eta^{ch}$  - učinkovitost punjenja baterije,
- $\eta^{dch}$  - učinkovitost pražnjenja baterije,
- $E^{dch}$  [kWh] - ukupna dobivena energija prilikom pražnjenja baterije koja ovisi o naponu i struji pražnjenja,
- $E^{ch}$  [kWh] - ukupna potrošena energija prilikom punjenja baterije koja ovisi o naponu i struji punjenja.

Prema [89], jednosmjerna učinkovitost punjenja i pražnjenja, uzimajući u obzir različite snage punjenja i pražnjenja može se odrediti pomoću izraza 7-2 uz pretpostavku da su učinkovitosti punjenja i pražnjenja iste.

$$\eta^{ch} = \eta^{dch} = \sqrt{\eta^{cyc}} \quad (7-2)$$

**Tablica 7.12:** *Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za bateriju LiFePo4*

<i>P-rate</i>	$\eta^{cyc}$ [%]	$\eta^{ch}$	$\eta^{dch}$
0.07	95.83	97.89	97.89
0.16	94.02	96.96	96.96
0.22	95.93	97.94	97.94
0.28	95.45	97.70	97.70

Ukupna učinkovitost punjenja baterijskog sustava pohrane energije ovisna o opterećenju

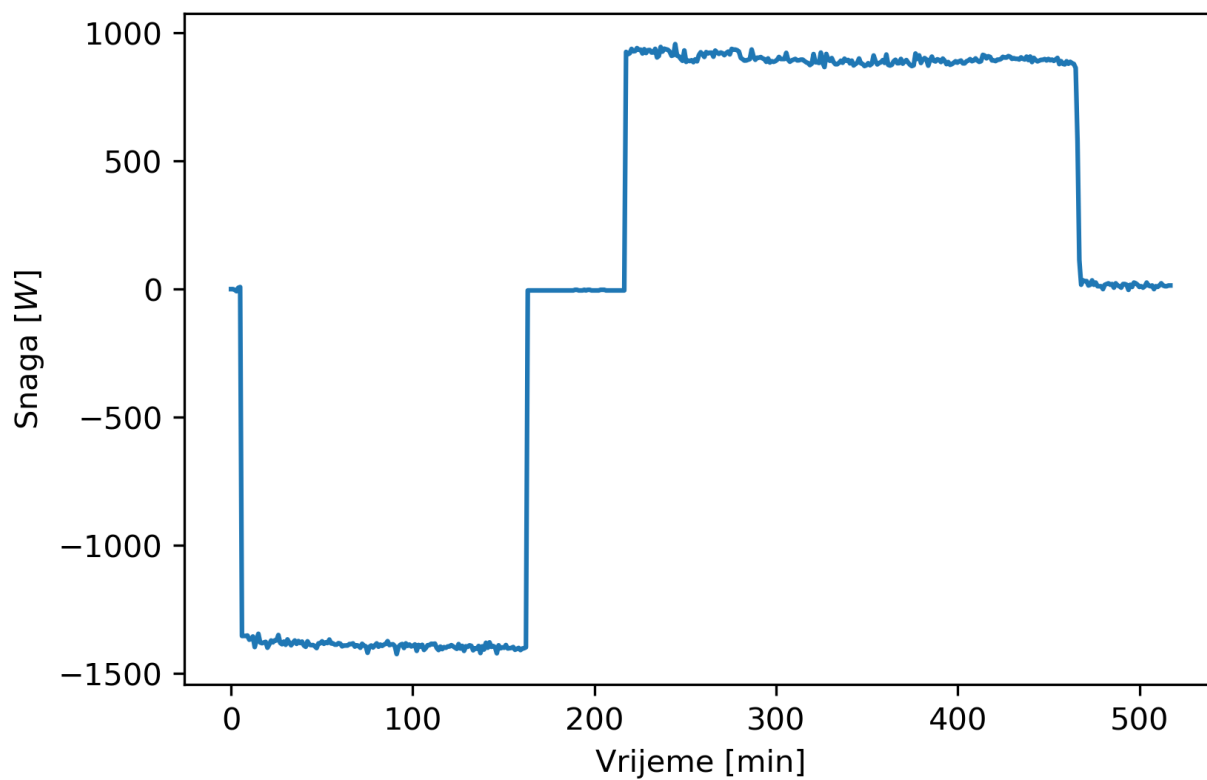
primijenjena na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila prikazana je u tablici 7.13.

**Tablica 7.13:** Ukupna učinkovitost punjenja baterijskog sustva pohrane ovisna o opterećenju

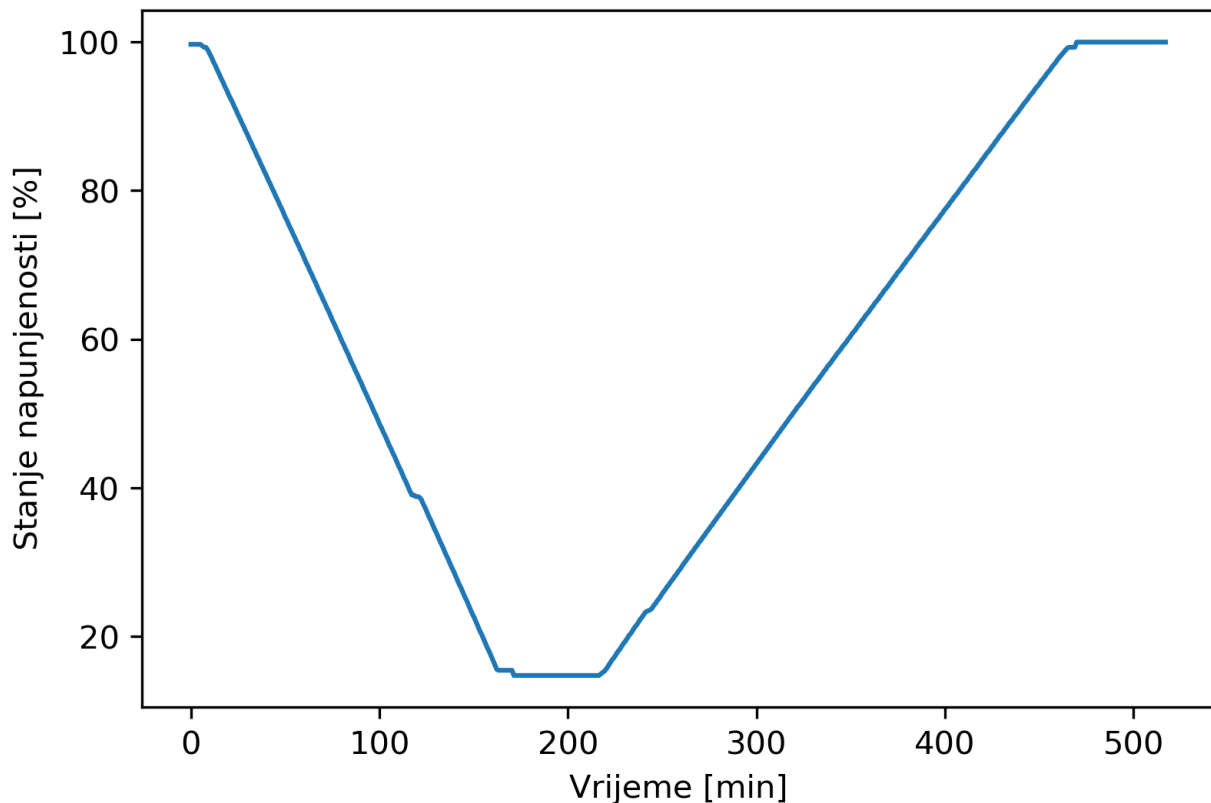
Izlazna snaga [%]	Učinkovitost [%]
10	91.63
20	93.57
30	94.15
50	95.40
75	95.50
100	95.16

Karakteristika  $\Delta SOEbess^{dch}/SOEbess$  energetskog modela pražnjenja baterije sustava pohrane energije dobivena na osnovu mjerenja na litij-željezo-fosfatnoj (LiFePO4) bateriji kapaciteta 160 Ah u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek prikazana je na slici 7.1. Slika 7.2 prikazuje promjenu stanja napunjenosti litij-željezo-fosfatne baterije. Na osnovu slika 7.1 i 7.2 može se zaključiti da je pražnjenje baterije trajalo do 175 minute kada stanje napunjenosti baterije poprima minimalnu vrijednost od 14.7 %.

Od 221 minute počinje punjenje baterije te se na osnovu mjerenja na litij-željezo-fosfatnoj (LiFePO4) bateriji kapaciteta 160 Ah u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek dobiva karakteristika  $\Delta SOEbess^{ch}/SOEbess$  energetskog modela punjenja baterije. Stanje napunjenosti dostiže granicu od 100 % napunjenosti u 476 minuti, čime završava proces punjenja baterije.



**Slika 7.1:** Karakteristika  $\Delta SOE/SOE$  energetskog modela punjenja i pražnjenja litij-željezo-fosfatne ( $LiFePO_4$ ) baterije kapaciteta 160 Ah

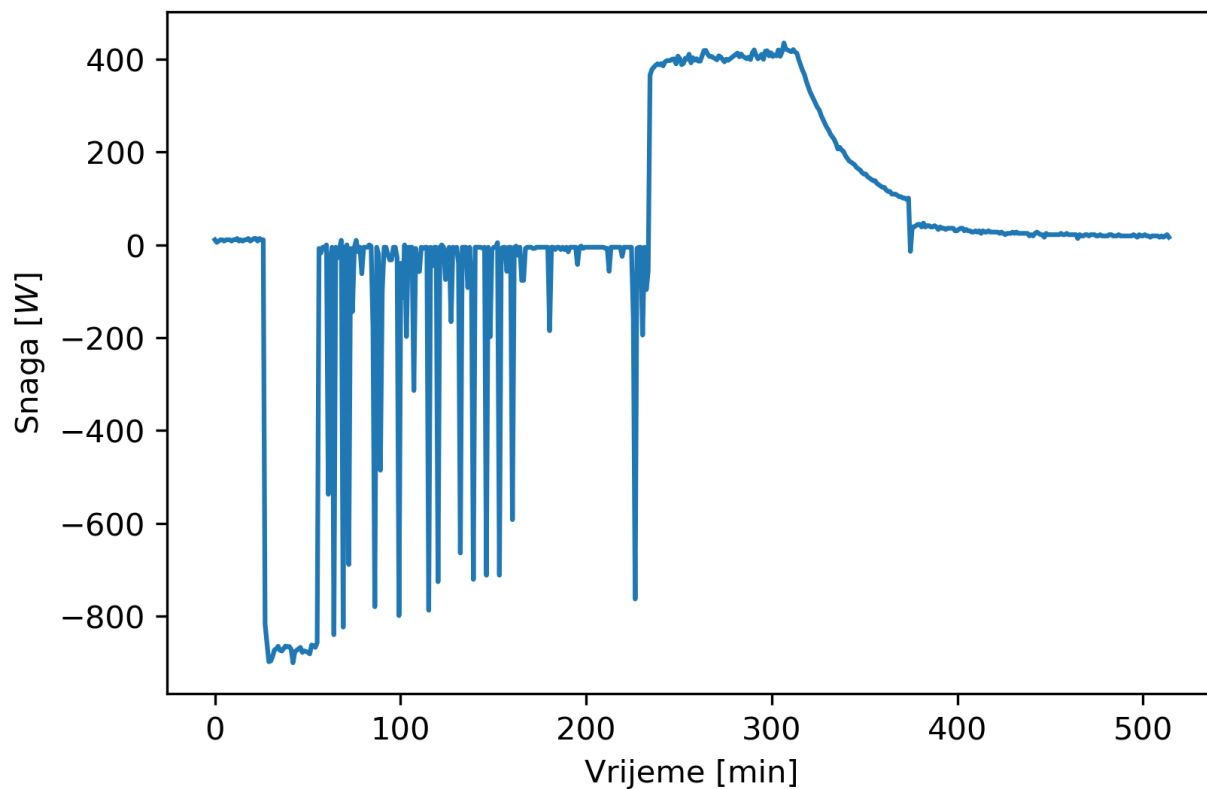


**Slika 7.2:** Promjena stanja napunjenosti litij-željezo-fosfatne ( $\text{LiFePO}_4$ ) baterije kapaciteta 160 Ah

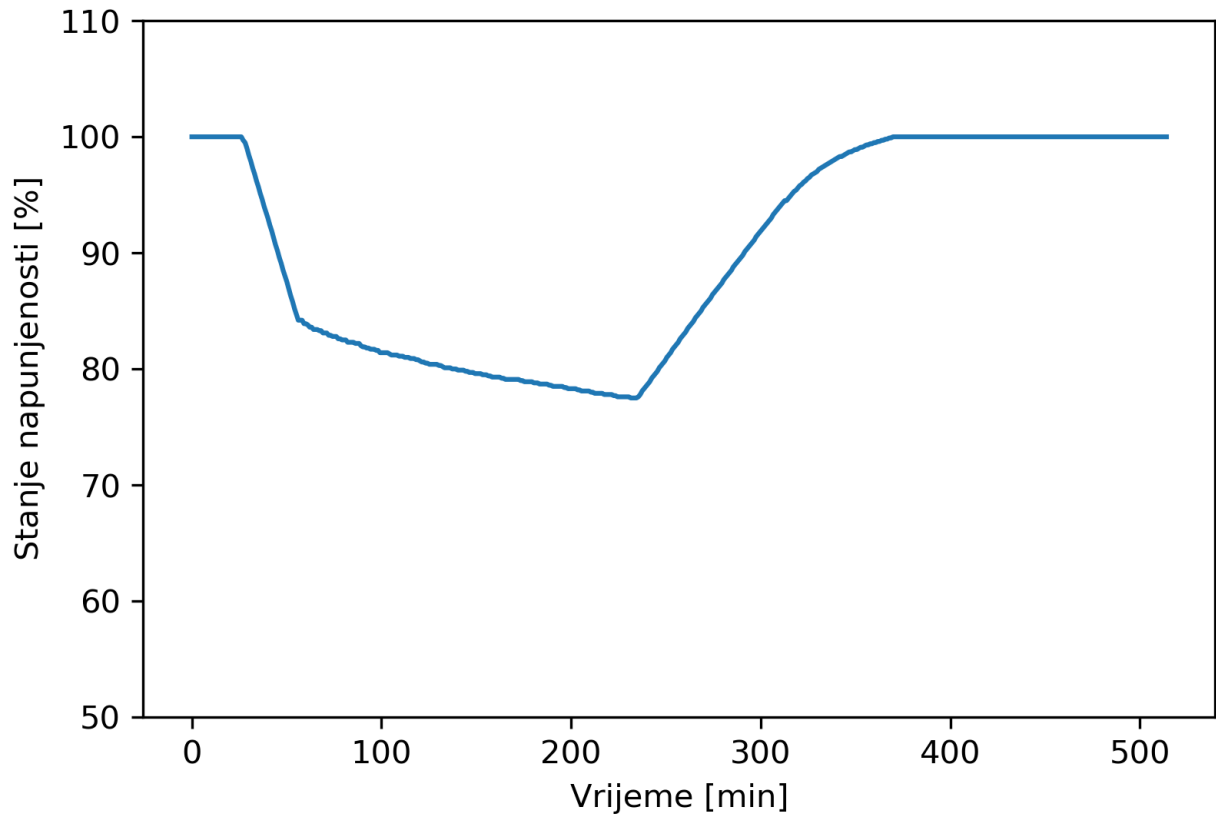
Karakteristike  $\Delta SOE_{bess}^{ch}/SOE_{bess}$  i  $\Delta SOE_{bess}^{dch}/SOE_{bess}$  energetskog modela litij-željezo-fosfatne ( $\text{LiFePO}_4$ ) baterije dobivene na osnovu mjerenja u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek koristit će se u optimizacijskom modelu dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

Kako su mjerenja provedena na novim litij-željezo-fosfatnim ( $\text{LiFePO}_4$ ) baterijama, odstupanja u iznosu snaga prilikom punjenja i pražnjenja baterije su zanemariva te bi se mogao koristiti i pojednostavljeni model baterijskog sustava pohrane energije s konstantnim iznosom snage koja ne ovisi o stanju napunjenosti baterije. Pojednostavljeni model se ne koristi iz razloga jer je kod nekih tehnologija baterija baterijskih sustava pohrane energije kao i kod starenja baterija izraženija ovisnost promjene iznosa snage o stanju napunjenosti baterije.

Slike 7.3 i 7.4 prikazuju rezultate mjerenja na olovnoj gel (Pb GEL) bateriji kapaciteta 110 Ah provedenih u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek. Iz rezultata mjerenja sa slike 7.4 može se uočiti da sustav nije bio u mogućnosti isprazniti bateriju do minimalne razine stanja napunjenosti jer dolazi do pada (propada) napona na bateriji uslijed angažiranja željenog iznosa snage pražnjenja baterije te je pražnjenje baterije sustav automatski prekinuo.

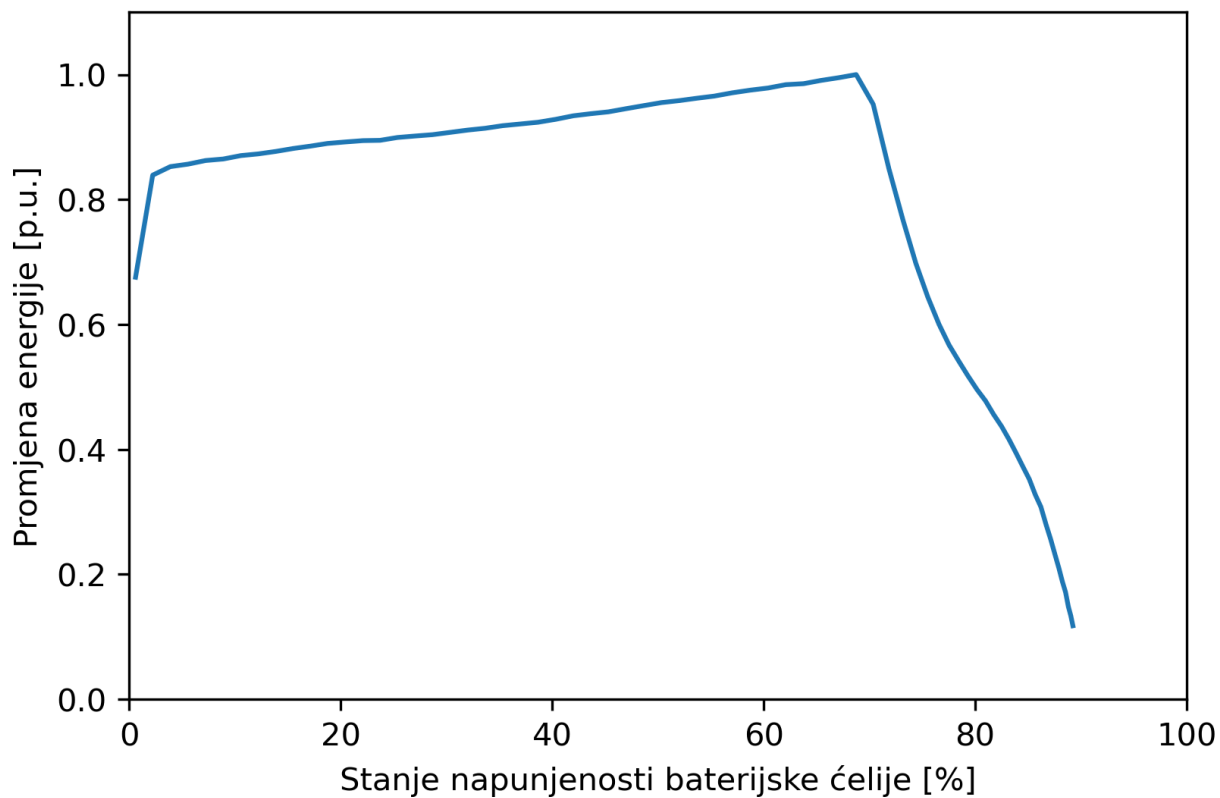


**Slika 7.3:** Karakteristika  $\Delta SOE/SOE$  energetskog modela punjenja i pražnjenja olovne gel (Pb GEL) baterije kapaciteta 110 Ah



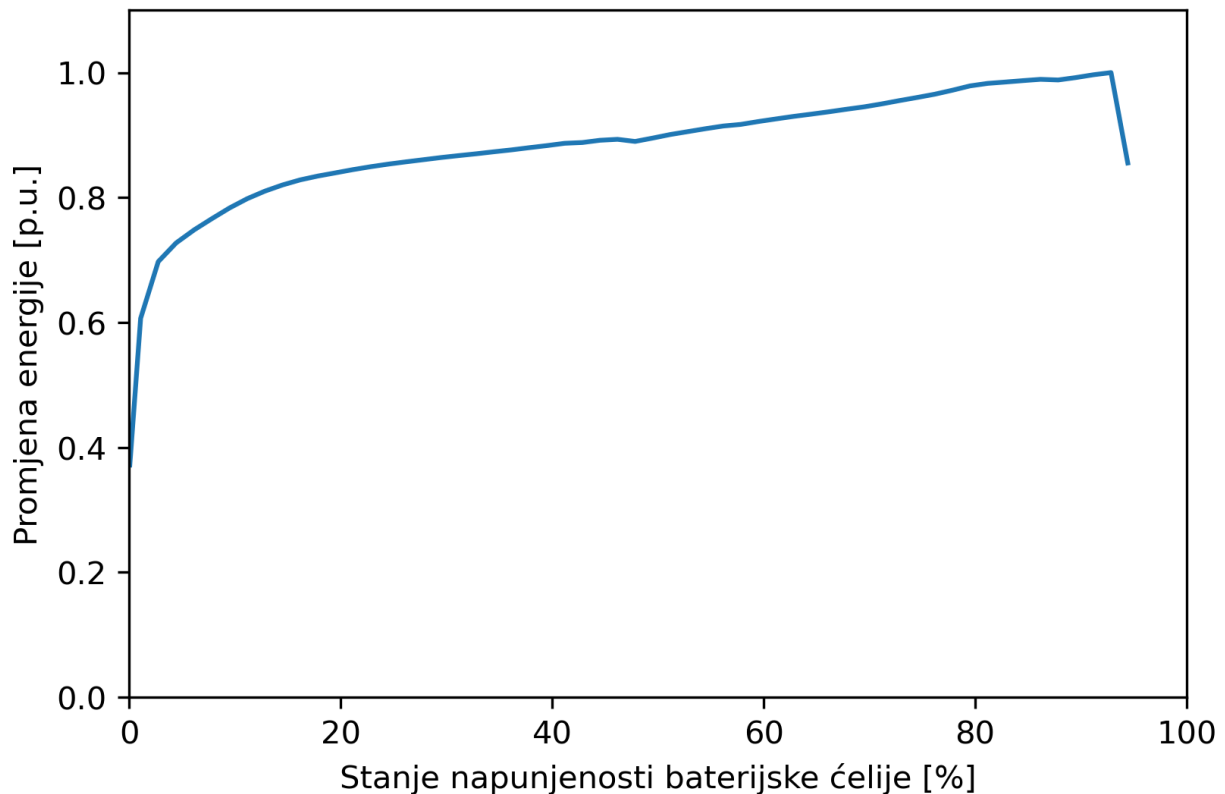
**Slika 7.4:** Promjena stanja napunjenosti olovne gel (Pb GEL) baterije kapaciteta 110 Ah

Slike 7.5 i 7.6 prikazuju rezultate mjerenja provedenih na baterijskoj ćeliji LG 18650HG2 kapaciteta 3000 mAh pomoću uređaja ICharger 4010DUO u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek. Iz rezultata mjerenja može se uočiti da iznos snage punjenja i pražnjenja ovisi o stanju napunjenosti baterijske ćelije.



**Slika 7.5:** Karakteristika  $\Delta SOE^{ch}/SOE$  baterijske ćelije LG 18650HG2 kapaciteta 3000 mAh





**Slika 7.6:** Karakteristika  $\Delta SOE^{dch}/SOE$  baterijske ćelije LG 18650HG2 kapaciteta 3000 mAh

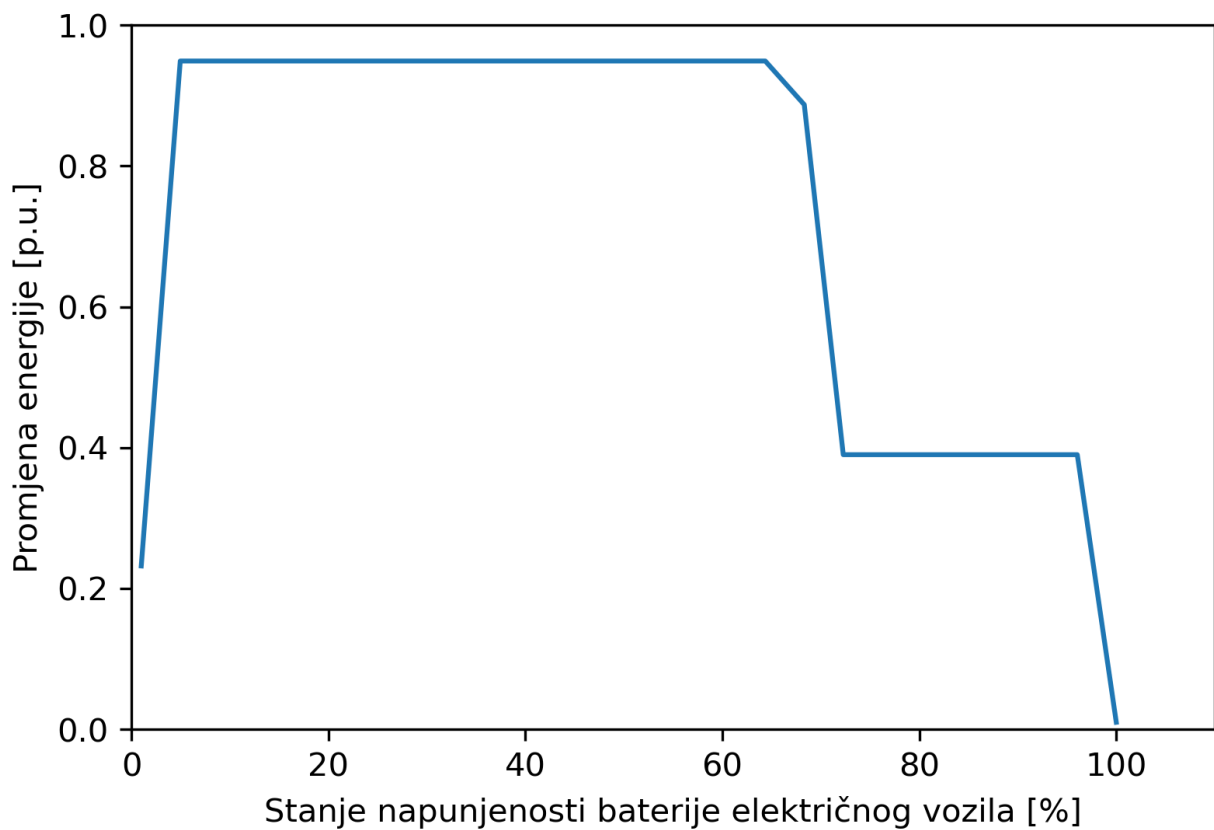
Rezultati mjerenja prikazani na slikama 7.1 - 7.4 provedeni su u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek pomoću dva Victron Energy MultiPlus Compact 24/1600/40-16 230V Invertera/Punjača i jednog Victron Energy MultiPlus Compact 24/800/16-16 230V Invertera/Punjača te potrebne ostale pomoćne opreme. Tehničke karakteristike Invertera/Punjača dostupne su u [130].

S obzirom na prikazane rezultate mjerenja provedenih na različitim baterijama (različiti tipovi, tehnologije izrade), model baterijskog sustava pohrane energije integriran u model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije, modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije, primijenjen je baterijski sustav pohrane energije i električna vozila te unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju.

Slika 7.7 prikazuje karakteristiku  $\Delta SOE/SOE$  baterije električnog automobila, Hyundai Ioniq, kapaciteta 28 kWh. Mjerenja su provedena na jednom ciklusu punjenja baterije električnog automobila na Schrack punionici snage 11 kW pomoću uređaja PQ-Box 200. Iz

dobivenih rezultata mjerenja može se primijetiti da prilikom punjenja baterije električnog vozila dolazi do smanjenja iznosa snage punjenja kako stanje napunjenosti baterije prelazi 80 % ukupne napunjenosti. Na osnovu rezultata, prilikom razvoja modela baterijskog sustava električnog vozila u obzir se uzima promjena iznosa snage punjenja koja ovisi o stanju napunjenosti baterije. Za slučaj pražnjenja baterije električnog vozila, pretpostavlja se da se baterija električnog vozila ponaša prema rezultatima dobivenim na slici 7.1 te se prema tome koristi energetska model pražnjenja baterije električnog vozila koji ovisi o stanju napunjenosti baterije.

Na osnovu provedenih mjerenja i dobivenih linearnih karakteristika  $\Delta SOE/SOE$ , u tablicama su prikazane koordinatne točke linearne aproksimacije 7.14, 7.15 i 7.16. Implementacija funkcijskih ovisnosti detaljno je opisana u potpoglavlju 5.9.



**Slika 7.7:** Karakteristika  $\Delta SOE/SOE$  baterije električnog automobila Hyundai Ioniq kapaciteta 28 kWh

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

**Tablica 7.14:** Koordinatne točke linearnih karakteristika  $\Delta SOE^{ch}/SOE$  baterije električnog vozila

$SOE_{ev}$ [%]	$\Delta SOE$ [%]
0	23.20
7.69	94.90
65.38	94.90
69.23	88.70
73.08	39.00
96.15	39.00
100	0

**Tablica 7.15:** Koordinatne točke linearnih karakteristika  $\Delta SOE^{ch}/SOE$  baterije sustava pohrane energije

$SOE_{bess}$ [%]	$\Delta SOE$ [p.u.]
0	95.89
98.51	94.82
98.84	4.30
100	0

**Tablica 7.16:** Koordinatne točke linearnih karakteristika  $\Delta SOE^{dch}/SOE$  baterije sustava pohrane energije

$SOE_{bess}$ [%]	$\Delta SOE$ [p.u.]
0	18.90
23.81	96.39
85.93	96.33
100	92.65

Prema [131], prosječna cijena (paketa) litij-ionske baterije ponderirana prema volumenu je 139 [\$/kWh]. Prosječna cijena definirana je na osnovu prosjeka primjene baterija u električnim vozilima i stacionarnim sustavima pohrane energije. Prosječna cijena litij-ionske baterije ponderirana prema volumenu od 128.57 [€/kWh] (prema srednjem tečaju Hrvatske narodne banke (HNB) na dan 2.4.2024. [132]) korištena je za potrebe rješavanja optimizacijskog problema.

Životni vijek baterije, korišten za potrebe rješavanja optimizacijskog problema, je 15 godina prema [66].

Nadalje, autori su u [84] zaključili kako je optimalno koristiti adaptivni faktor prilikom izračuna virtualnih troškova degradacije baterije jer u suprotnom sustav upravljanja energijom ne iskorištava mogućnosti baterije zbog visokih investicijskih troškova. Autori su odredili optimalni adaptivni koeficijent u iznosu od 0.4, pomoću kojeg se uzima u obzir degradacija i korištenje baterije.

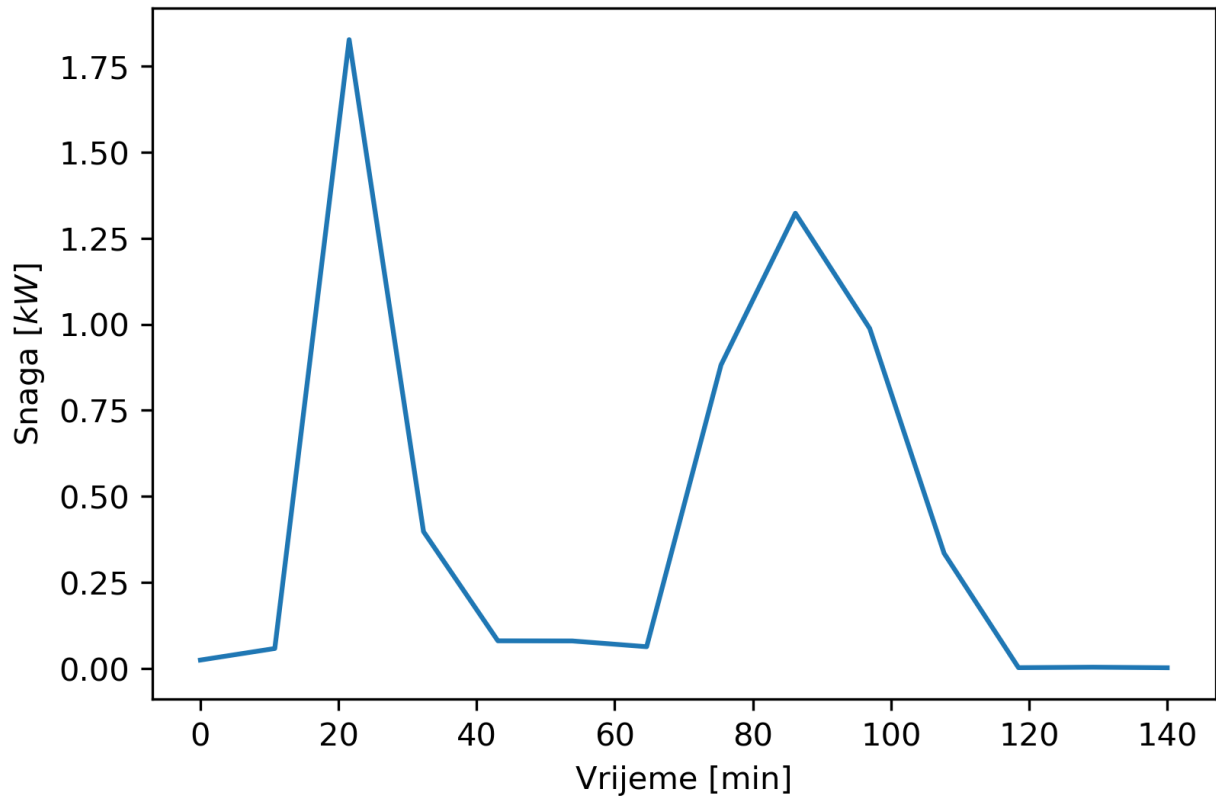
Na osnovu linearnih karakteristika  $\Phi(\delta) = 5.24 \cdot 10^{-4} \cdot \delta^{2.03}$ , u tablici su prikazane koordinatne točke linearne aproksimacije 7.17. Cikličko starenje baterije detaljno je opisao u potpoglavlju 5.8.

**Tablica 7.17:** *Koordinatne točke linearnih karakteristika  $\Phi(\delta) = 5.24 \cdot 10^{-4}$  virtualnog troška cikličkog starenja baterije*

<i>DOD</i> [%]	Gubitak životnog vijeka [p.u.]
0	0
23.21	0.0000233032
47.22	0.000110821
71.47	0.000264418
100	0.000518493

#### 7.1.4. Tehničke karakteristike upravljivih trošila električne energije

Profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila prikazan je na slici 7.8. Prikazani profil dobiven je na osnovu mjerenja jednog radnog ciklusa perilice posuđa pomoću uređaja PQ-Box 200 te je korišten za potrebe rješavanja optimizacijskog problema upravljanja energijom unutar energetske zajednice. Rezultati mjerenja su 10-minutne usrednjene vrijednosti snage koje su se prilagodile s obzirom na vremenski korak višeg i nižeg sloja modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom. Detaljan opis vremenski odgodivih trošila detaljno je opisan u potpoglavlju 5.3.1.



**Slika 7.8:** Profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila - perilica suđa

Tablica 7.18 prikazuje tehničke karakteristike sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije, odnosno klima uređaja preuzetih iz [30] i [109]. Detaljan opis sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije opisan je u potpoglavlju 5.3.2.

**Tablica 7.18:** Ulazni podaci za dinamički upravljiva trošila

	$Phvac_{max}^{heat}$ [kW]	$Phvac_{max}^{cool}$ [kW]	$Tin_{min}$ [°C]	$Tin_{max}$ [°C]	$\alpha_{hvac}$	$\beta_{h,c}$
Klima uređaj	3	3	18	24	0.9	11

U tablicama 7.19 i 7.20 prikazane su tehničke karakteristike sustava za pripremu tople vode, odnosno električnih bojlera te potrošnja i potrebna količina tople vode u različitim institucijama, prema [30], [110] i [133]. Detaljan opis sustava za pripremu tople vode opisan je u potpoglavlju 5.3.3.

**Tablica 7.19:** Ulazni podaci za statički upravljiva trošila

	$Pwh$ [kW]	$Thw_{min}$ [°C]	$Thw_{max}$ [°C]	$Tin_p$ [°C]	$Thw_{p,in}$ [°C]
Električni bojler	4.5	60	80	20	20

Tablica 7.20 prikazuje potrošnju tople vode po osobi u različitim institucijama, prema [133]. Za potrebe rješavanja optimizacijskog problema odabrana potrošnja tople vode u zgradi, odnosno uredima od 22 litre po osobi u danu.

**Tablica 7.20:** *Potrošnja i potrebna dnevna količina tople vode po osobi [133]*

Vrsta zgrade	l/dan
Tvornice (bez procesa)	22-45
Bolnice	110-160
Hosteli	90
Hoteli	90-160
Kuće i Stanovi	90-160
Uredi	22
Škole (internati)	115
Škole (dnevne)	15

Potrebni ulazni parametri za statički upravljiva trošila, odnosno električne bojlere određeni su prema metodologiji predstavljenoj u [110]. Osnovni parametri električnog bojlera i potrebni parametri za procjenu temperature tople vode u električnom bojleru prikazani su u tablici 7.21.

**Tablica 7.21:** *Ulazni parametri za električne bojlere [110]*

$R \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	$A_{wh} [m^2]$	$V_{wh} [l]$	$C_p \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$	$\rho_w \left[ \frac{kg}{l} \right]$
2.63	1.9	189	4181.3	1

gdje su:

- $R \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$  - otpor toplinske izolacije električnog bojlera,
- $A_{wh} [m^2]$  - vanjska površina električnog bojlera,
- $V_{wh} [l]$  - zapremina električnog bojlera,
- $C_p \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$  - specifični toplinski kapacitet vode,
- $\rho_w \left[ \frac{kg}{l} \right]$  - gustoća vode.

Vanjsku površinu električnog bojlera ( $A_{wh} [m^2]$ ) moguće je odrediti na osnovu zapremine električnog bojlera ( $V_{wh} [l]$ ) ako se u obzir uzme da je električni bojler cilindričnog oblika te da je omjer visine i polumjera baze 4.

7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

---

Ukupnu dnevnu potrošnje tople vode u uredima potrebno je odrediti na osnovu broj osoba u uredima, odnosno komercijalnoj zgradi. Ovdje se pretpostavlja da je u zgradi prisutno 50 osoba iz čega proizlazi da je ukupna potrošnje tople vode u zgradi 1100 litara po danu. Nadalje, pretpostavlja se da zgrada posjeduje tri električna bojlera za toplu vodu iz čega proizlazi da je prosječna potrošnja tople vode ( $F[l/h]$ ) po jednom električnom bojleru 15.27 litara po satu.

Ostali potrebni parametri za određivanje temperature tople vode u električnom bojleru određuju se na osnovu osnovnih parametara prikazanih u tablici 7.21 i prosječnoj potrošnji tople vode prema izrazima 7-3 - 7-6.

$$G = \frac{A_{wh}}{R} \quad (7-3)$$

$$B = \rho_w \cdot F \cdot C_p \quad (7-4)$$

$$C = V_{wh} \cdot \rho_w \cdot C_p \quad (7-5)$$

$$R' = \frac{1}{(G + B)} \quad (7-6)$$

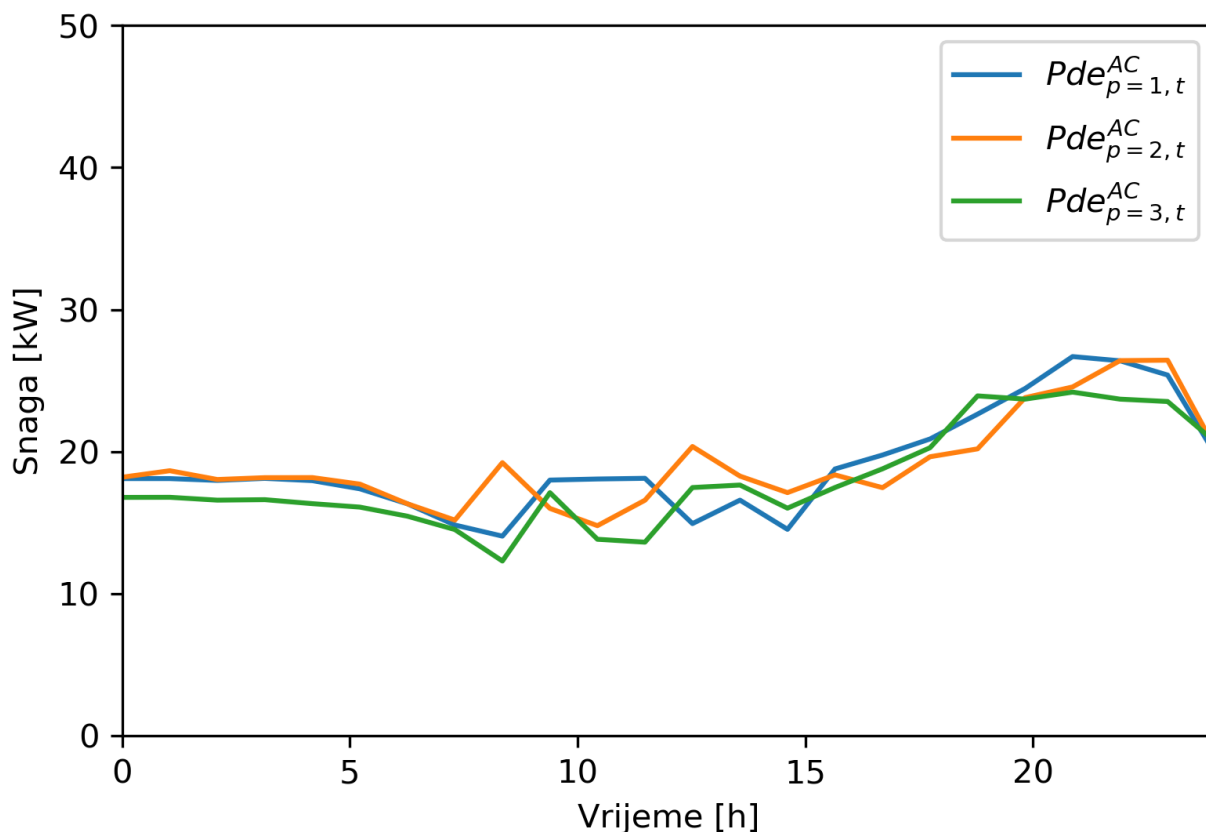
Parametri za određivanje temperature tople vode u električnom bojleru unutar zgrade prikazani su u tablici 7.22.

**Tablica 7.22:** *Parametri za određivanje temperature tople vode u električnom bojleru unutar zgrade*

$G$	$B$	$C$	$R'$	$F[l/h]$
0.72	63848.451	790265.7	$1.57 \cdot 10^{-5}$	15.27

### 7.1.5. Profili intenziteta sunčevog zračenja, potrošnje električne energije i vanjske temperature

Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na satnoj razini prikazani su na slici 7.9. Osnovni profili snage odnosno temeljna potrošnja aktivnih kupaca odnosi se na zadovoljavanje potrebe rada kritičnih trošila električne energije unutar zgrada. Kritična trošila ne spadaju niti u jednu grupu upravljivih trošila te samim time model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice nema utjecaj na rad spomenutih trošila. Osnovni profili snage odnosno temeljna potrošnja aktivnih kupaca na satnoj razini koristi se za potrebe rješavanja optimizacijskog problema višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.

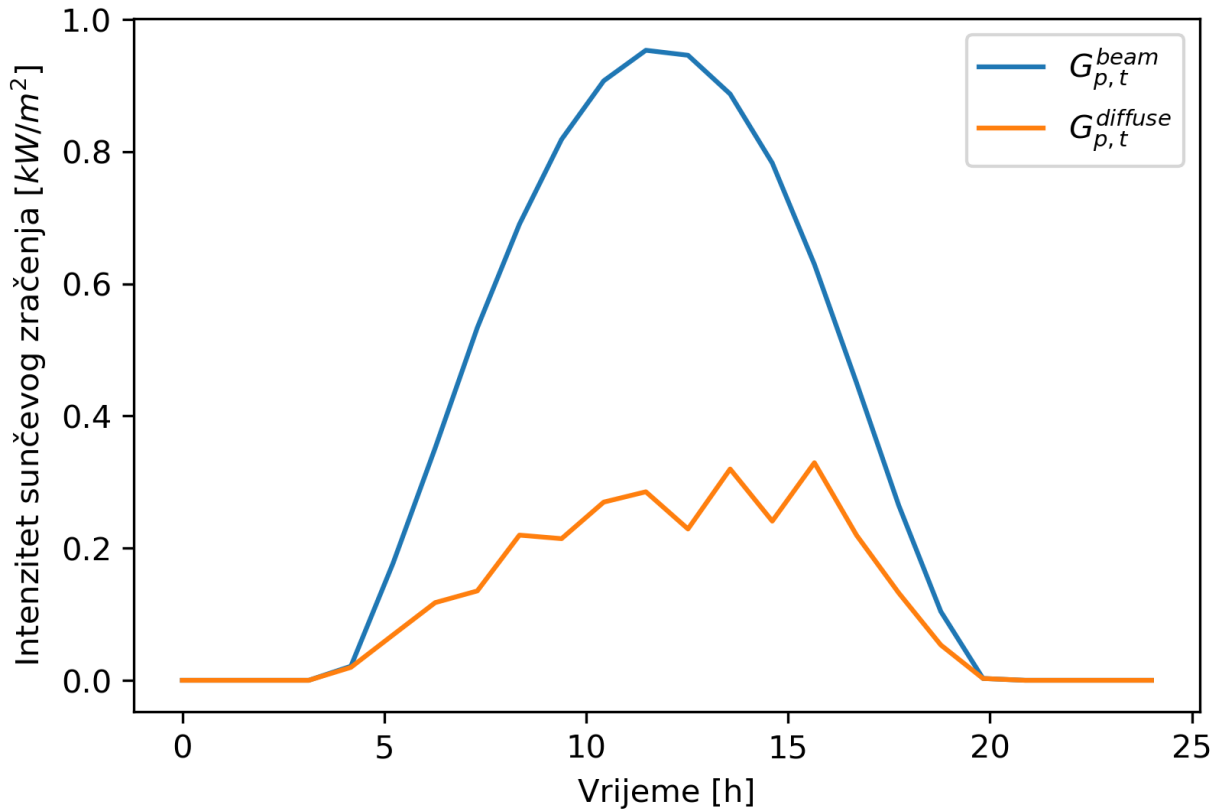


Slika 7.9: Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na satnoj razini

Na slici 7.10 prikazani su profili intenziteta sunčevog zračenja na satnoj razini koji se koriste za procjenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava prilikom rješavanja optimizacijskog problema višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno uprav-

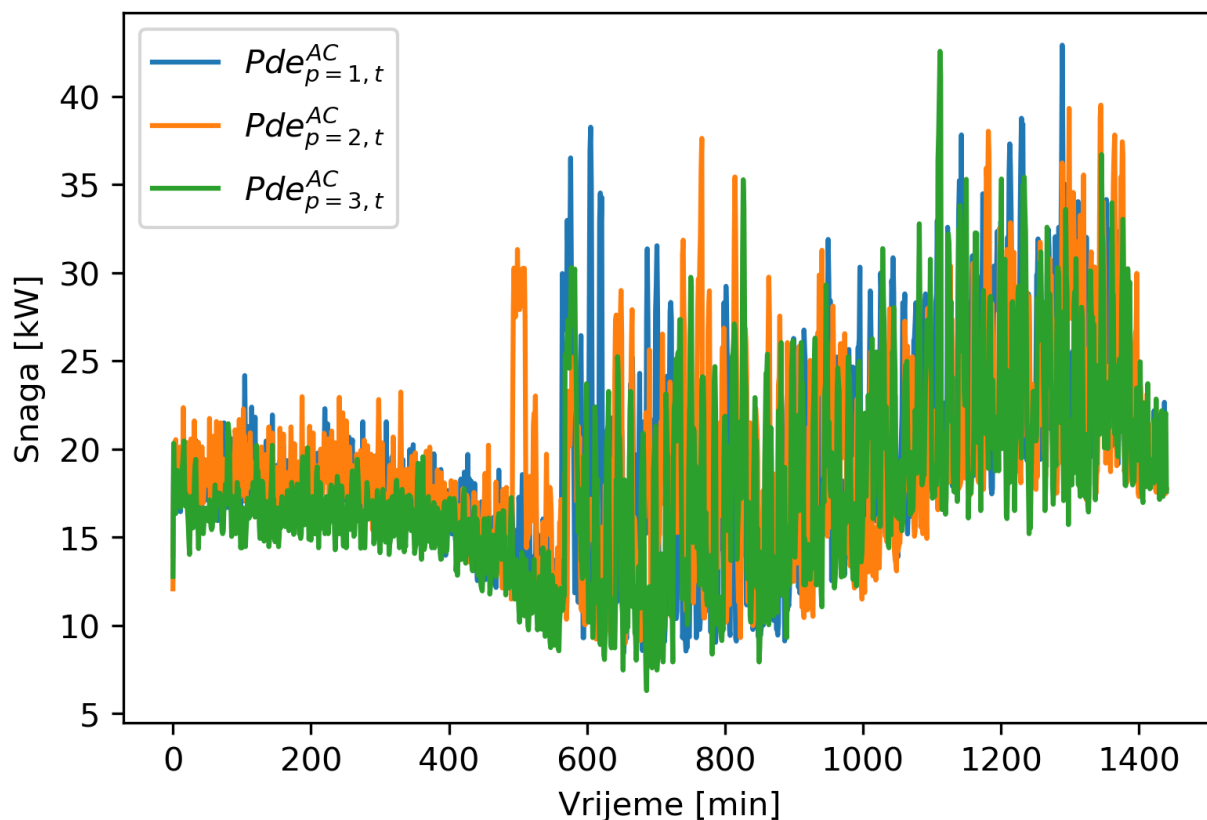


ljanje energijom unutar energetske zajednice. Pretpostavljeno je da su aktivni kupci u međusobnoj blizini te se profili prikazani na slici 7.10 koriste za procjenu proizvodnje električne energije za sve tri zgrade uz uzimanje u obzir ulaznih podataka položaja fotonaponskih modula prikazanih u tablici 7.5.



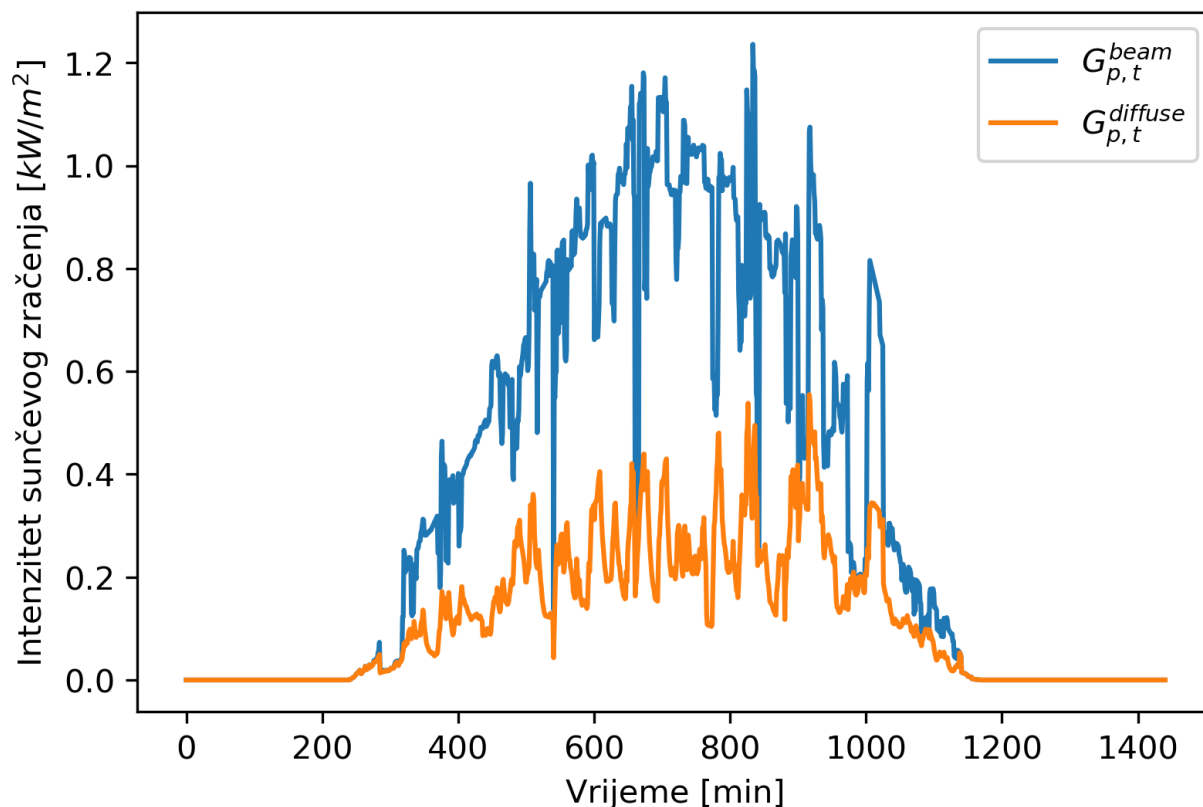
Slika 7.10: Profili intenziteta sunčevog zračenja na satnoj razini

Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na minutnoj razini prikazani su na slici 7.11. Osnovni profili snage odnosno temeljna potrošnja aktivnih kupaca na minutnoj razini koristi se za potrebe rješavanja optimizacijskog problema nižeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice.



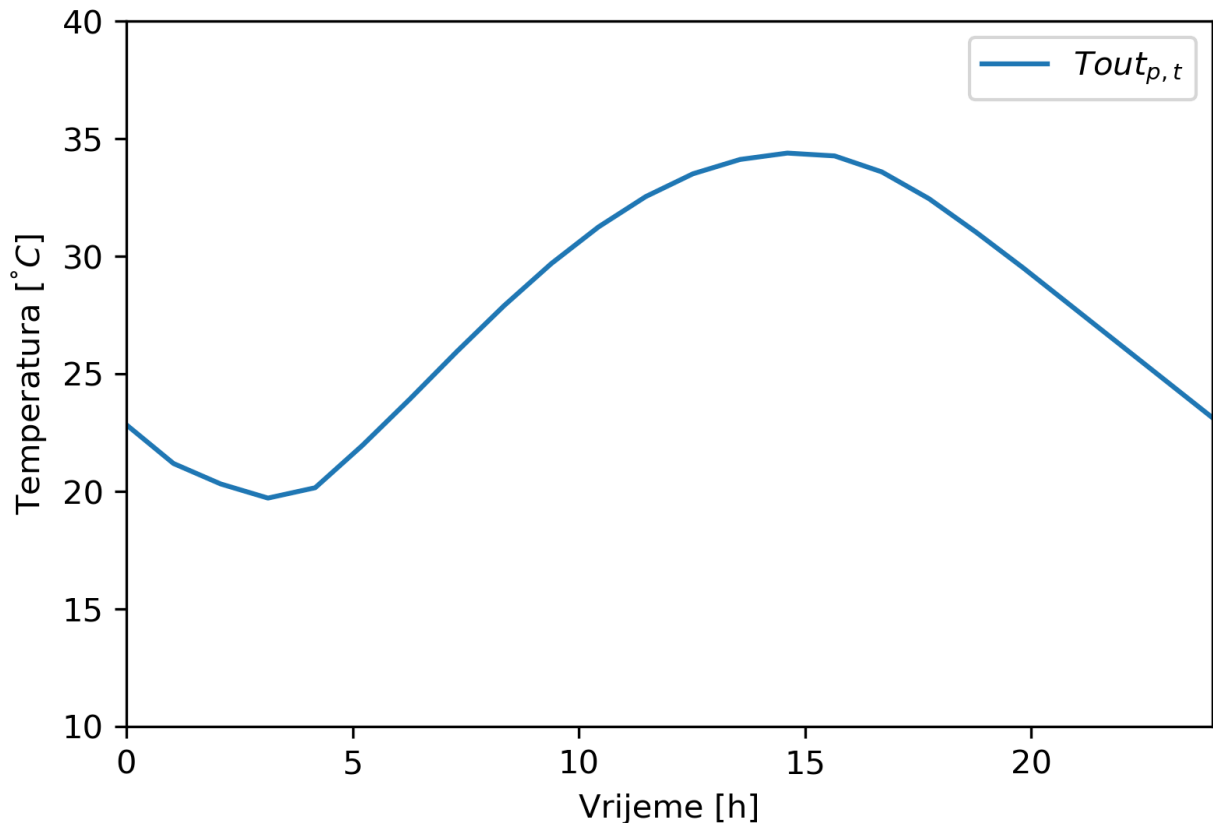
**Slika 7.11:** Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na minutnoj razini

Profili intenziteta sunčevog zračenja na minutnoj razini potrebni za rješavanje optimizacijskog problema nižeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice prikazani su na slici 7.12.



Slika 7.12: Profili intenziteta sunčevog zračenja na minutnoj razini

Na slici 7.13 prikazan je profil vanjske temperature na satnoj razini za potrebe rješavanja optimizacijskog problema višeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Prilikom rješavanja optimizacijskog problema nižeg sloja dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice pretpostavlja se da se temperatura unutar sata ne mijenja odnosno ostaje istoga iznosa tijekom promatranog sata prilikom provođenja optimizacije.



Slika 7.13: Profil vanjske temperature na satnoj razini

Profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže su dobiveni mjerenjem potrošnje zgrade fakulteta u Laboratoriju za OIE FERIT-a Osijek [134] dok su profili intenziteta sunčevog i vanjske temperature generirani pomoću PV\*SOL-a [135].

## 7.2. Određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge u komercijalnim zgradama

U ovom potpoglavlju prikazat će se rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i aktivnih kupaca. Predloženi postupak određivanja cijena električne energije za primjenu V2B usluge detaljno je opisan u potpoglavlju 4.3.

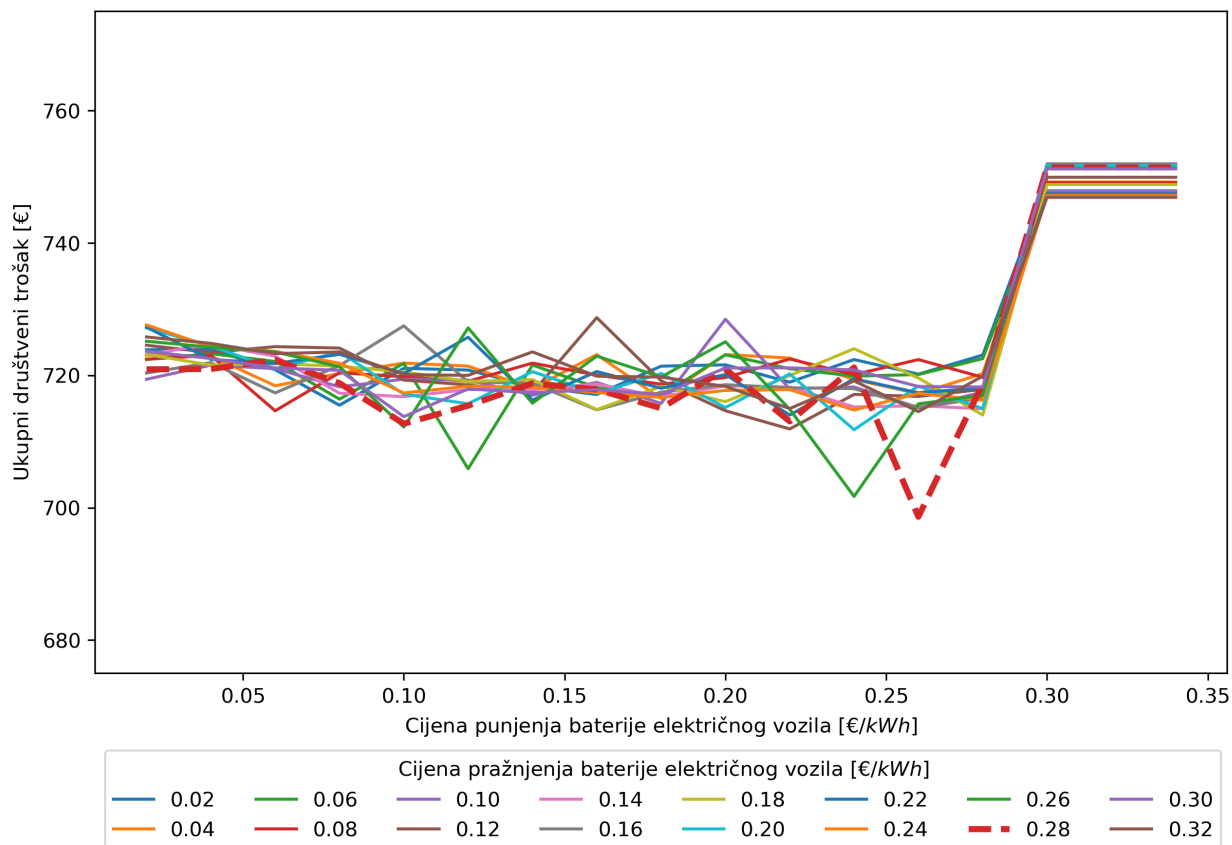
Prilikom određivanja cijena električne energije za primjenu V2B usluge odabran je korak povećanja cijena u iznosu od 0.02 [€/kWh]. Nadalje, raspon cijene električne energije za punjenje baterije električnog vozila je od 0.02 [€/kWh] do 0.34 [€/kWh], a za pražnjenje baterije električnog vozila od 0.02 [€/kWh] do 0.32 [€/kWh].

Prilikom definiranja simulacijskih scenarija, vlasnici električnih vozila podijeljeni su u tri kategorije s obzirom na cijenu električne energije koju plaćaju prilikom punjenja baterije električnog vozila. Prva kategorija vlasnika električnih vozila plaća cijenu punjenja od 0.09 [€/kWh] (niska tarifa - kućanstvo), druga kategorija plaća cijenu punjenja od 0 [€/kWh] (aktivni kupci) i treća kategorija plaća cijenu punjenja od 0.29 [€/kWh] (javne punionice). Na osnovu cijena električne energije koju vlasnici plaćaju za punjenje baterije električnog vozila (prema kategorijama) dolazi se do optimalne primjene V2B usluge, odnosno razmjene električne energije između električnih vozila i aktivnih kupaca minimizirajući ukupni društveni trošak.

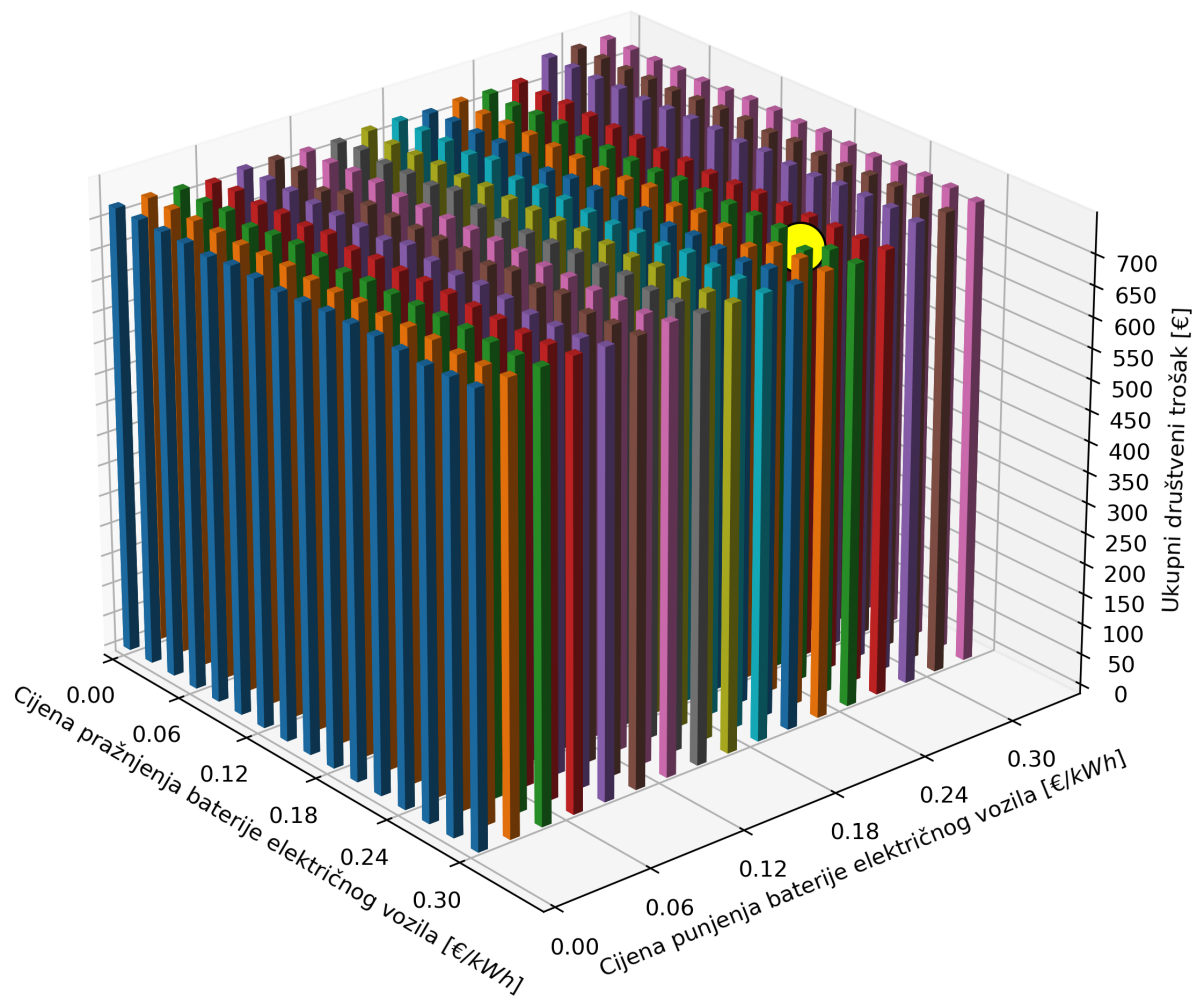
Na slici 7.14 prikazani su rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge unutar energetske zajednice ne uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterija električnih vozila. Na apscisi je prikazana cijena električne energije za punjenje baterije električnog vozila, a na ordinati je prikazan ukupni društveni trošak (vrijednost funkcije cilja). Svaka linija, prikazana na slici 7.14, predstavlja jednu cijenu električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila. Također, u cilju lakšeg razumijevanja dobivenih rezultata, rezultati su prikazani u trodimenzionalnom prikazu na slici 7.15.

Analizom dobivenih rezultata 7.14 i 7.15, najmanji ukupni društveni trošak je postignut s cijenom električne energije za punjenje baterije električnog vozila u iznosu 0.26 [€/kWh] i cijenom električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila u iznosu 0.28 [€/kWh] (označena crvena isprekidana linija na slici 7.14 te žuta oznaka na slici 7.15). Pri navedenim cijenama električne energije za primjenu V2B usluge ukupni društveni trošak iznosi 698.64 [€]. Nadalje, da se primijetiti iz rezultata da povećanje cijene električne energije za punjenje baterije električnog vozila preko iznosa od 0.29 [€/kWh] rezultira s povećanjem ukupnog društvenog troška. Ovo proizlazi iz razloga jer vlasnici električnih vozila imaju mogućnost punjenja baterija električnih vozila na kućnoj instalaciji po cijeni od 0.09 [€/kWh] ili na punionici po cijeni od 0.29 [€/kWh].

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



Slika 7.14: Cijene električne energije za primjenu V2B usluge

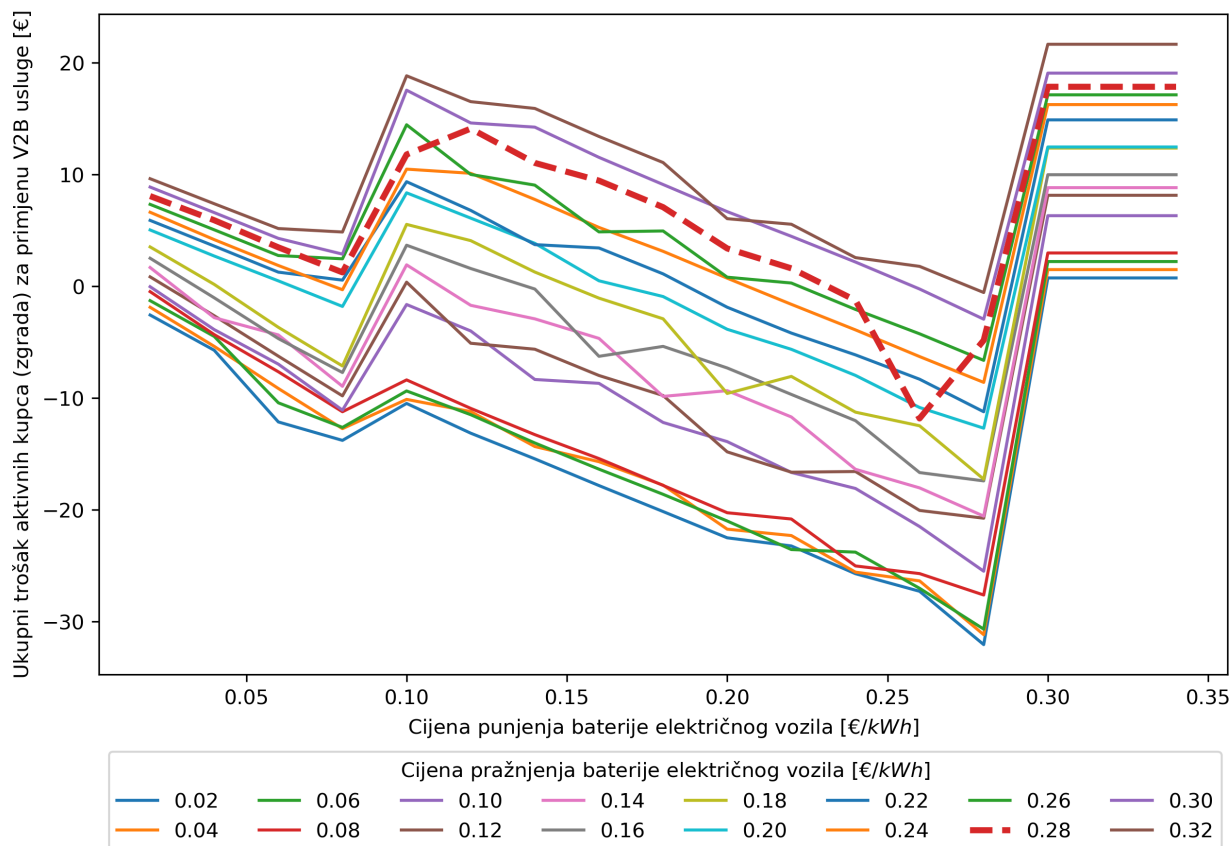


Slika 7.15: Cijene električne energije za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu

Slike 7.16 i 7.17 prikazuju ukupni trošak aktivnih kupca, odnosno zgrada za primjenu V2B usluge. Iz rezultata sa slike 7.16 može se primijetiti da ukupni trošak aktivnih kupca opada s rastom cijene punjenja odnosno raste s rastom cijene pražnjenja baterije električnih vozila. Negativna vrijednost troška predstavlja prihod. Smeđa linija na slici 7.16 predstavlja najvišu cijenu pražnjenja dok tamno plava linije predstavlja najnižu cijenu pražnjenja baterija električnih vozila. Prema navedenom, linije od donje (tamno plave) do gornje (smeđe) analogne su povećanju cijene pražnjenja u ranije definiranim koracima. Za očekivati je da s porastom cijene pražnjenja raste ukupni trošak električne energije zgrade jer zgrade plaćaju električnu energiju vlasnicima vozila. Označena crvena isprekidana linija (slika 7.16) i žuta

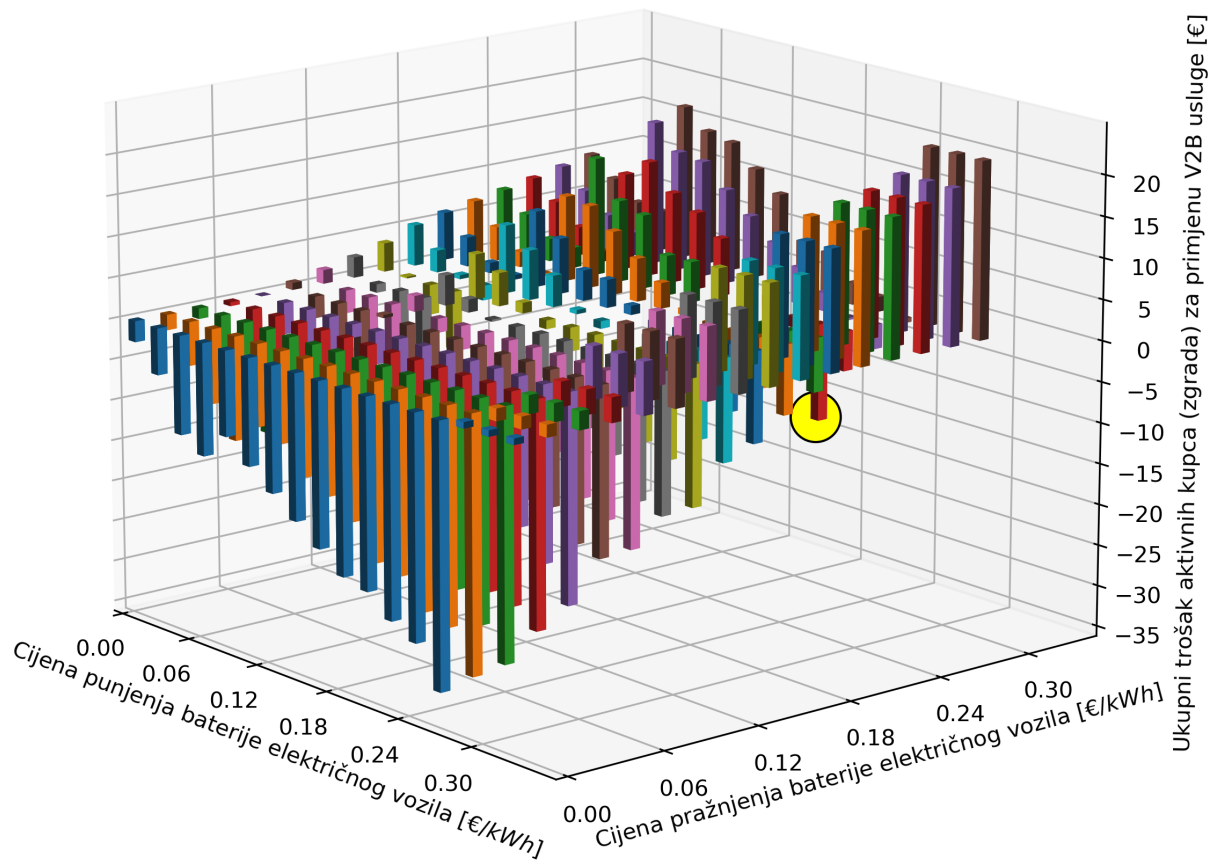
## 7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

oznaka (slika 7.15) predstavljaju ukupni trošak aktivnih kupca uz postignuti najmanji ukupni društveni trošak.



Slika 7.16: Ukupni trošak aktivnih kupca (zgrada) za primjenu V2B usluge



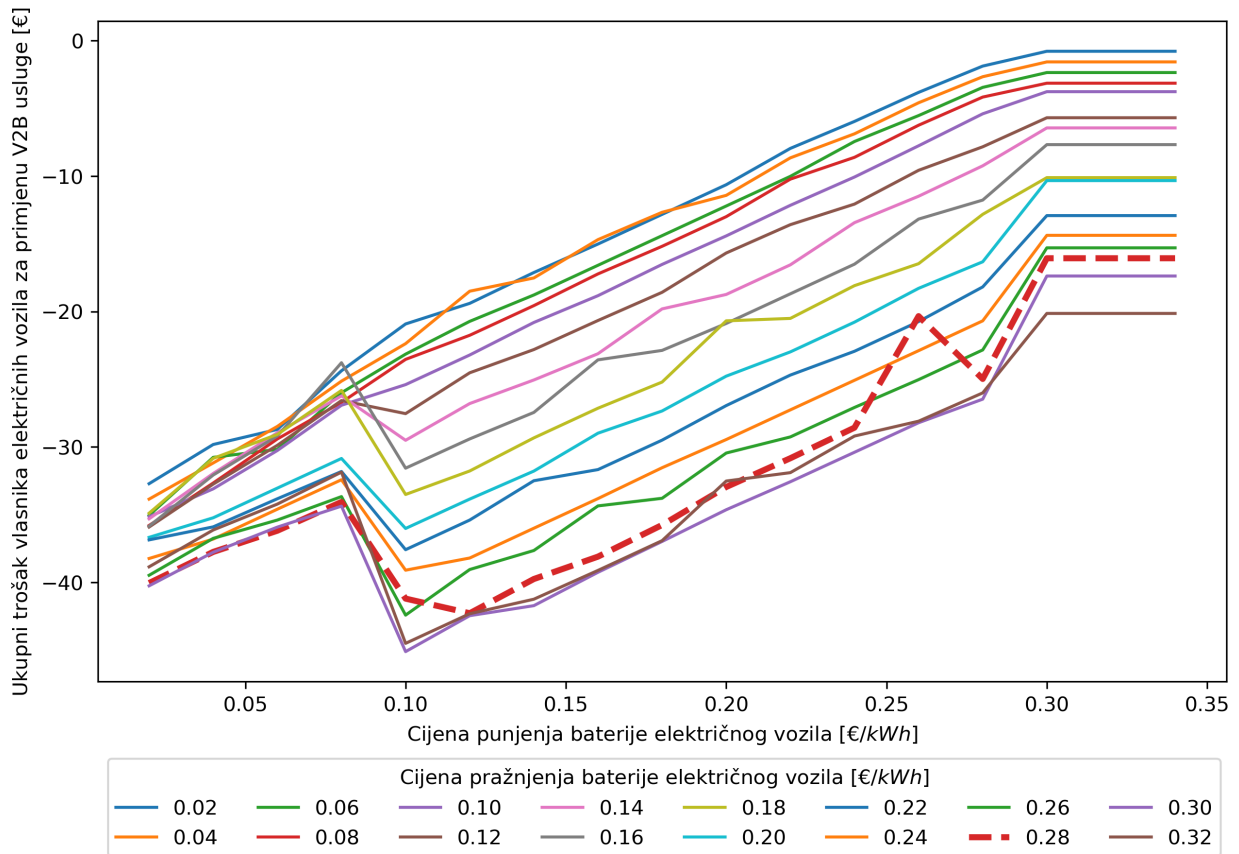


**Slika 7.17:** Ukupni trošak aktivnih kupca (zgrada) za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu

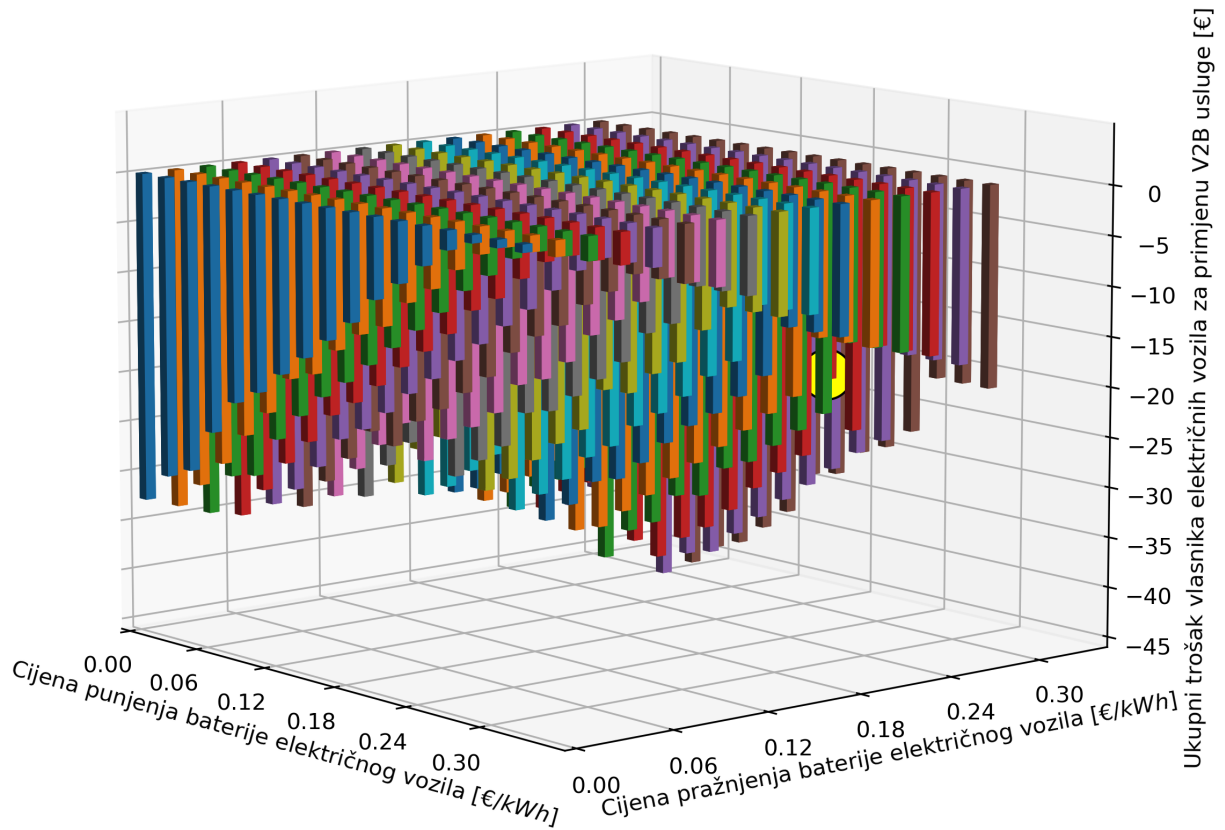
Na slici 7.18 prikazan je ukupni trošak vlasnika električnih vozila za primjenu V2B usluge. Ukupni trošak vlasnika električnih vozila je uvijek negativna vrijednost što predstavlja ukupni profit jer u slučaju pozitivne vrijednosti vlasniku električnog vozila se generiraju troškovi. Također, rezultati su prikazani u trodimenzionalnom prikazu radi lakšeg razumijevanja na slici 7.19. Iz rezultata sa slika 7.18 i 7.19 može se zaključiti da je ukupni profit vlasnika najviši pri najnižim cijenama električne energije za punjenje baterija električnih vozila i najvišim cijenama električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila. Donja smeđa linija predstavlja najvišu cijenu, gornja plava linija predstavlja najnižu cijenu dok

7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

linije u sredini predstavljaju cijenu električne energije pražnjenja baterije električnog vozila analogne koraku povećanja cijene, slika 7.18. Označena crvena isprekidana linija (slika 7.18) i žuta oznaka (slika 7.19) predstavljaju ukupni profit vlasnika električnih vozila uz postignuti najmanji ukupni društveni trošak.



**Slika 7.18:** *Ukupni trošak vlasnika električnih vozila za primjenu V2B usluge*



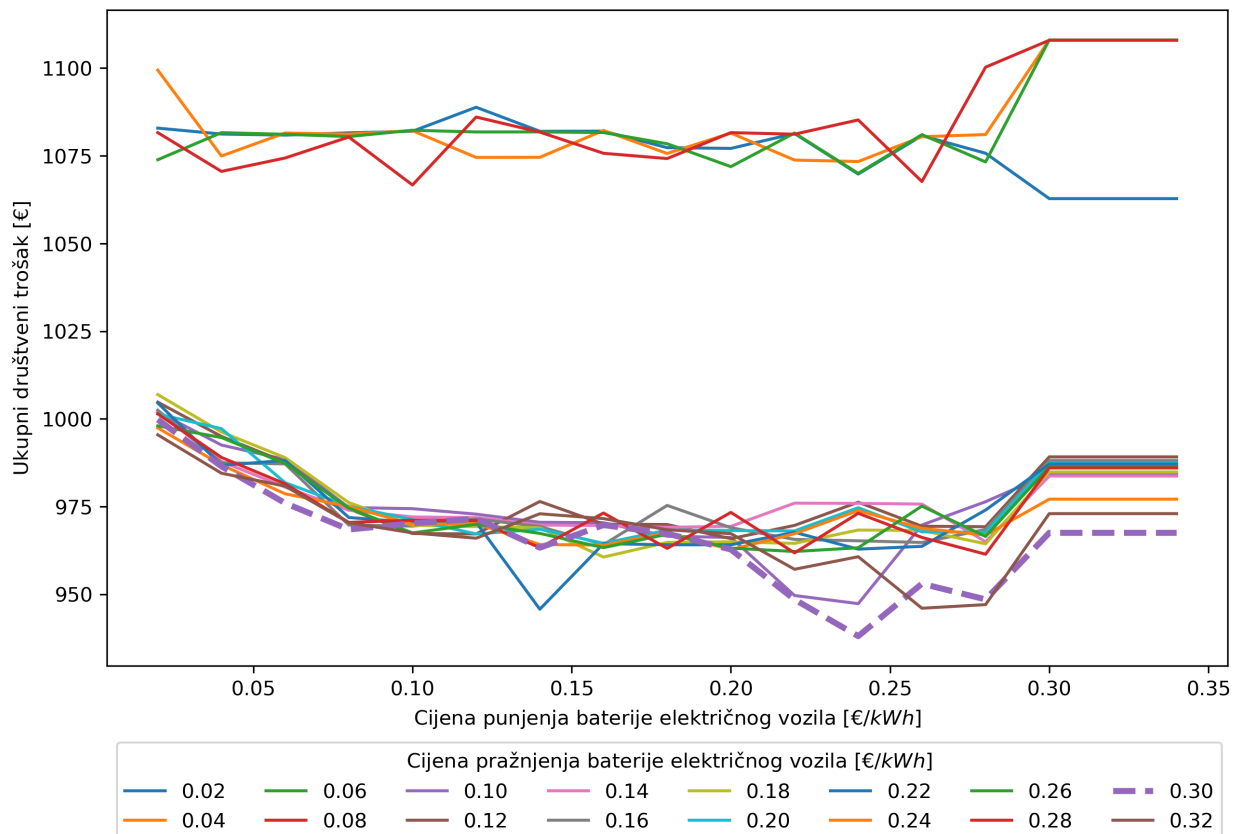
**Slika 7.19:** Ukupni trošak vlasnika električnih vozila za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu

Na slici 7.20 prikazani su rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge unutar energetske zajednice uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterija električnih vozila. Također, rezultati su prikazani u trodimenzionalnom prikazu radi lakšeg razumijevanja, slika 7.21.

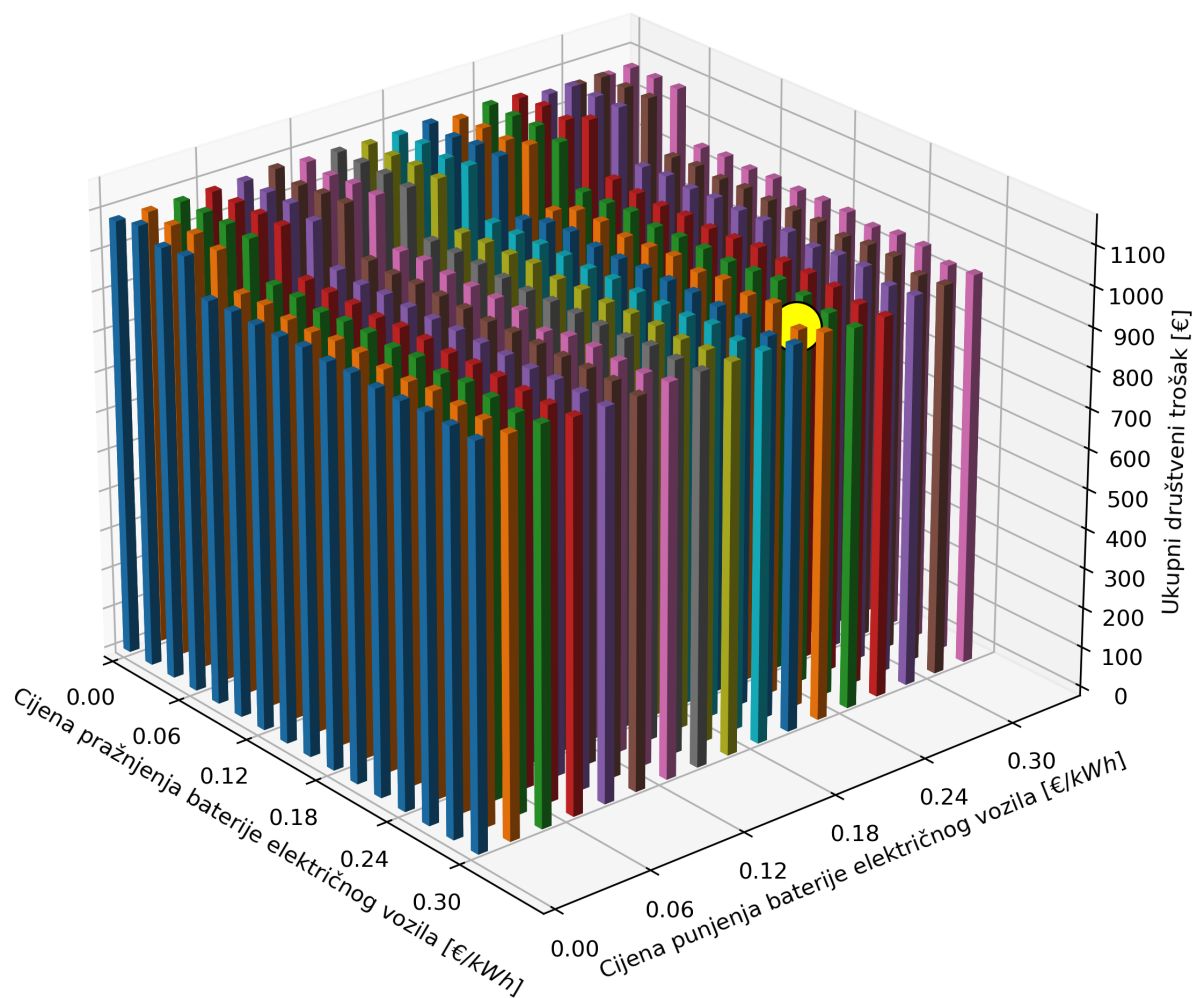
Analizom dobivenih rezultata 7.20 može se zaključiti da je došlo do povećanja ukupnog društvenog troška (povećanje iznosa funkcije cilja) jer se u obzir uzimaju virtualni troškovi degradacije baterija električnih vozila. Nadalje, može se primijetiti da je u rasponu cijene električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila od 0.02 [€/kWh] do 0.08 [€/kWh]

7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

ukupni društveni trošak većeg iznosa (prosječno 1082 [€]). Navedeno proizlazi iz cijene električne energije za punjenje koju plaćaju vlasnici u prvoj kategoriji jer ispod cijene od 0.09 [€/kWh] vlasnici prve kategorije ne pristaju prazniti baterije električnih vozila (jer su punili po cijeni od 0.09 [€/kWh]). Najmanji ukupni društveni trošak je postignut s cijenom električne energije za punjenje baterije električnog vozila u iznosu 0.24 [€/kWh] i cijenom električne energije za pražnjenje baterije električnog vozila u iznosu 0.3 [€/kWh] te iznosi 938.03 [€] (označena ljubičasta isprekidana linija na slici 7.20 i žuta oznaka na slici 7.21).



**Slika 7.20:** Cijene električne energije za primjenu V2B usluge uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnih vozila



**Slika 7.21:** Cijene električne energije za primjenu V2B usluge uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnih vozila u trodimenzionalnom prikazu

### 7.3. Rezultati modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

U ovom potpoglavlju prikazat će se rezultati dobiveni predloženim modelom dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice koji je detaljno opisan u poglavlju 4. Unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava

upravljanja energijom energetske zajednice uzimajući u obzir stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu jedan je od znanstvenih doprinosa ove disertacije.

Na osnovu navedenog, prvo će se prikazati rezultati dobiveni razvijenim optimizacijskim modelom u višem sloju stohastičkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i primjenom proširenoga matematičkog programiranja s ciljem minimizacije društvenog troška. Zatim će se prikazati rezultati dobiveni razvijenim optimizacijskim modelom u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i primjenom proširenoga matematičkog programiranja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu.

### **7.3.1. Rezultati optimizacijskog modela u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom**

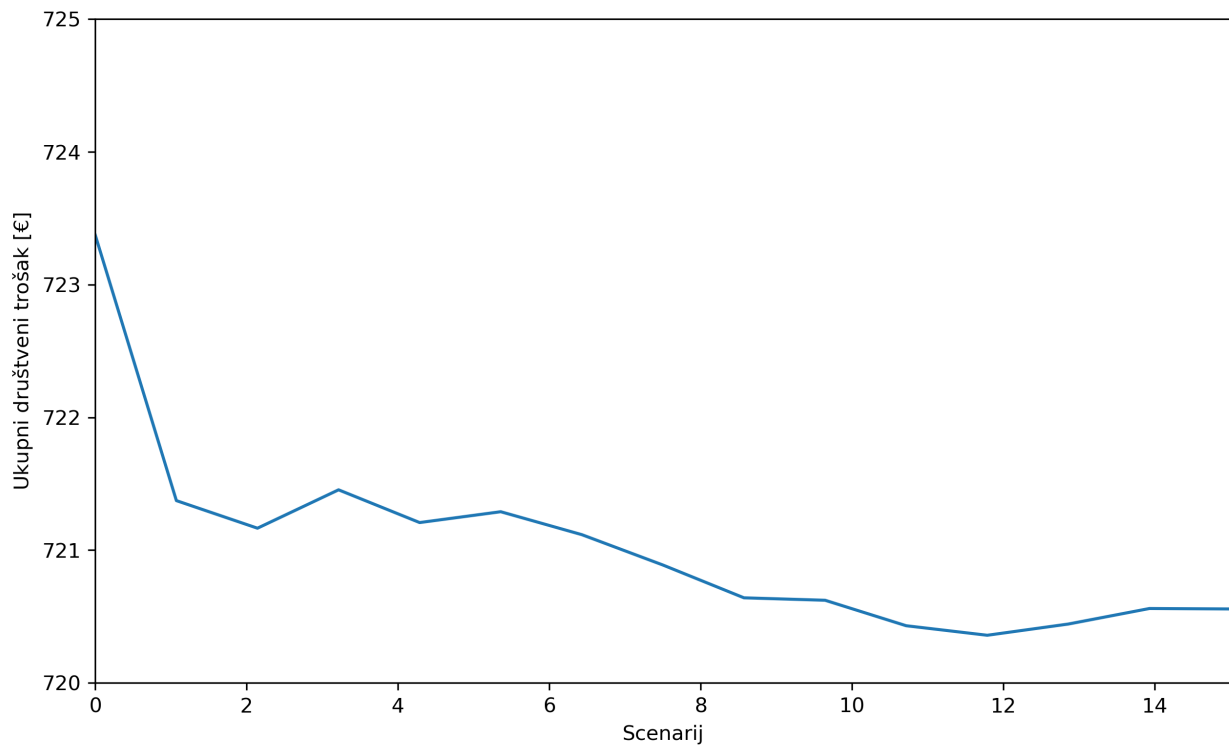
U tablici 7.23 prikazani su rezultati, odnosno iznosi ukupnog društvenog troška, pri različitim vrijednostima realizacije slučajne varijable, dobiveni optimizacijskim modelom u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Optimizacija u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom provedena je za 15 različiti vrijednosti realizacije slučajne varijable generirane pomoću Monte Carlo simulacije. Odabran raspon devijacije ukupnog sunčevog zračenja na površinu pod kutom je od 0.9 do 1.05 izračunatog sunčevog zračenja na površinu pod kutom.

**Tablica 7.23:** Ukupni društveni troškovi pri različitim vrijednostima realizacije slučajne varijable

Scenarij	Ukupni društveni trošak [€]
$s_1$	723.37
$s_2$	719.37
$s_3$	720.75
$s_4$	722.32
$s_5$	720.22
$s_6$	721.70
$s_7$	720.08
$s_8$	719.29
$s_9$	718.66
$s_{10}$	720.46
$s_{11}$	718.51
$s_{12}$	719.57
$s_{13}$	721.46
$s_{14}$	722.08
$s_{15}$	720.51

Obradom rezultata iz tablice 7.23 može se prikazati konvergencija ukupnog društvenog troška s obzirom na realizaciju slučajne varijable. Konvergencija ukupnog društvenog troška prikazana je na slici 7.22. Iz slike 7.22 i obradom rezultata iz tablice 7.23 dolazi se do zaključka da srednja vrijednost ukupnog društvenog troška konvergira u vrijednost 720.56 [€].

Srednja vrijednost ukupnog društvenog troška koja konvergira u vrijednost 720.56 [€] uzima se u obzir prilikom odabira scenarija s najvećom vjerojatnošću pojavljivanja. Najmanje odstupanje od srednje vrijednosti ukupnog društvenog troška koji konvergira u vrijednost 720.56 [€] dobiveno je u 15. scenariju te iznosi 0.05 [€]. S toga se 15. scenarij uzima kao scenarij s najvećom vjerojatnošću pojavljivanja. Varijable odluke višeg sloja odabranog scenarija se prosljeđuju nižem sloju u cilju rješavanja optimizacijskog problema u nižem sloju, determinističkim pristupom, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu.



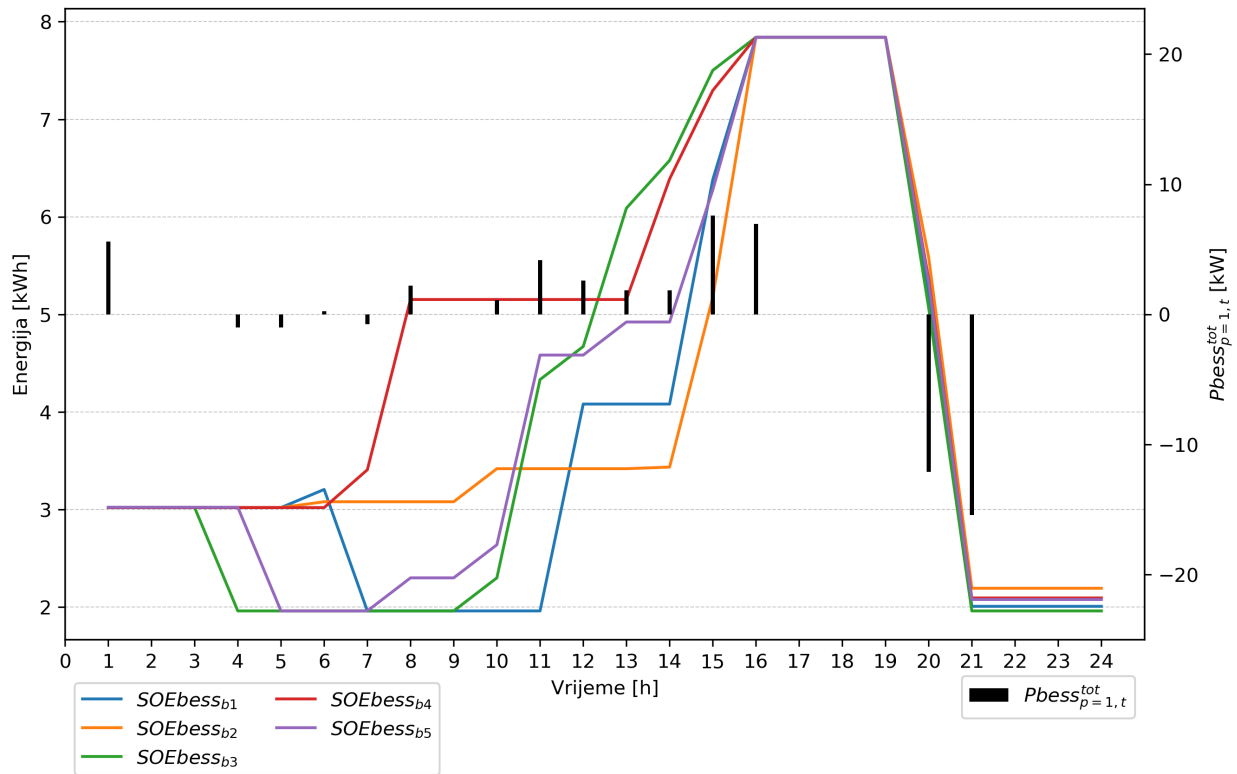
**Slika 7.22:** *Konvergencija ukupnog društvenog troška*

U nastavku će se prikazati vrijednosti nekih od varijabla odluka za 1. scenarij i za odabrani 15. scenarij u cilju razumijevanja ponašanja i prilagođavanja predloženog dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Kako je već spomenuto u potpoglavlju 4.1, dvostupanjski stohastički pristup omogućava fiksiranje iznosa određenih varijabli odluka 1. faze, bez obzira na mogući ishod 2. faze, na način ponovnog planiranja rada uređaja. U ovom slučaju, fiksiran je iznos snage prilikom razmjene električne energije s mrežom. Na ovaj način se smanjuje povratan utjecaj distribuirane proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i punjenja većeg broja električnih vozila na mrežu jer se određuju fiksni iznosi snage prilikom razmjene električne energije s mrežom.

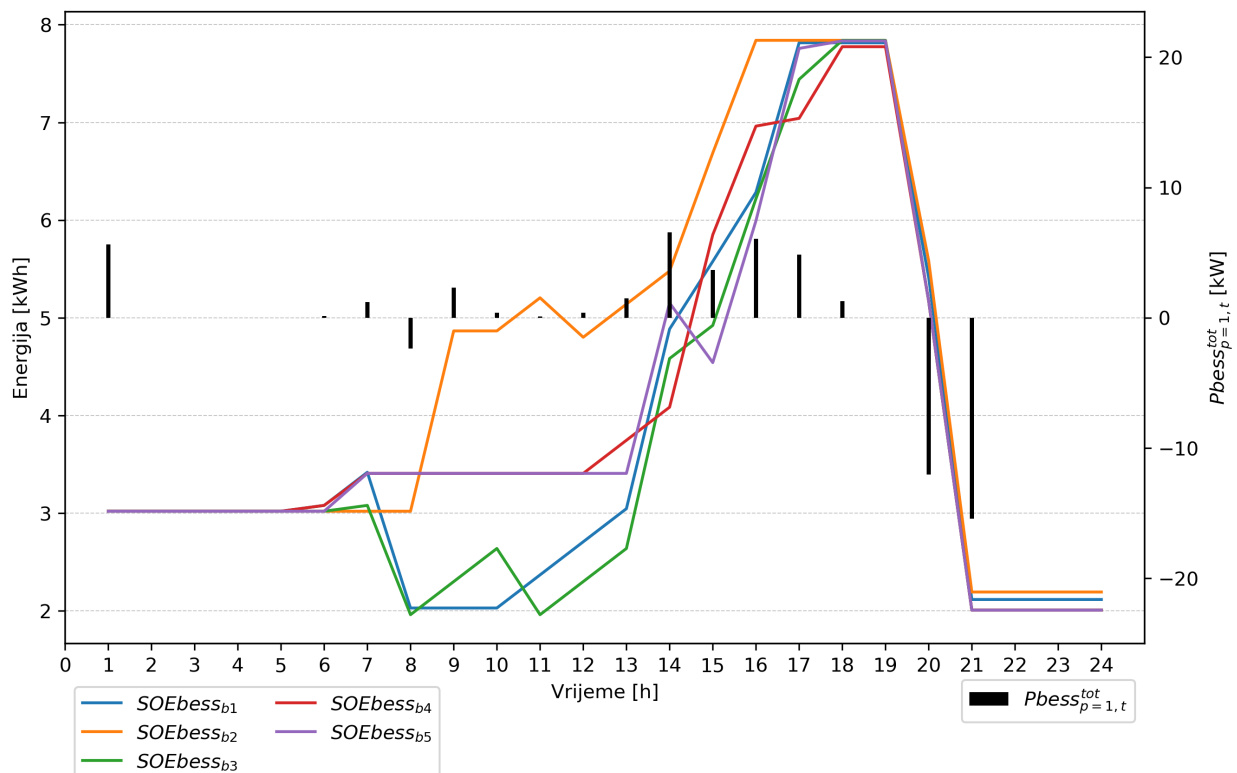
Na slikama 7.23 i 7.24 prikazana su stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca za odabrane scenarije. Može se primijetiti da sustav nastoji postići energetska arbitražu, spremajući električnu energiju kada je dostupna, uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije sustava pohrane energije.



7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



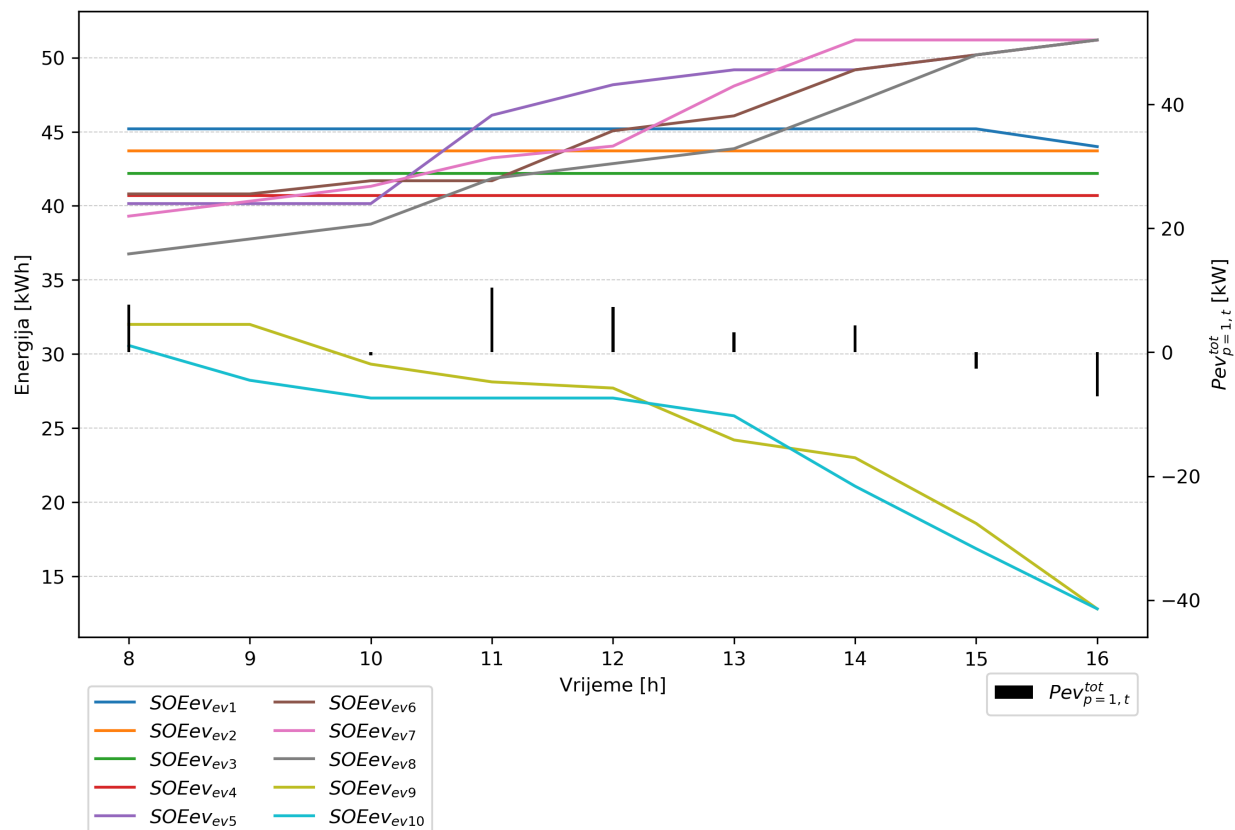
Slika 7.23: Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju



Slika 7.24: Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju

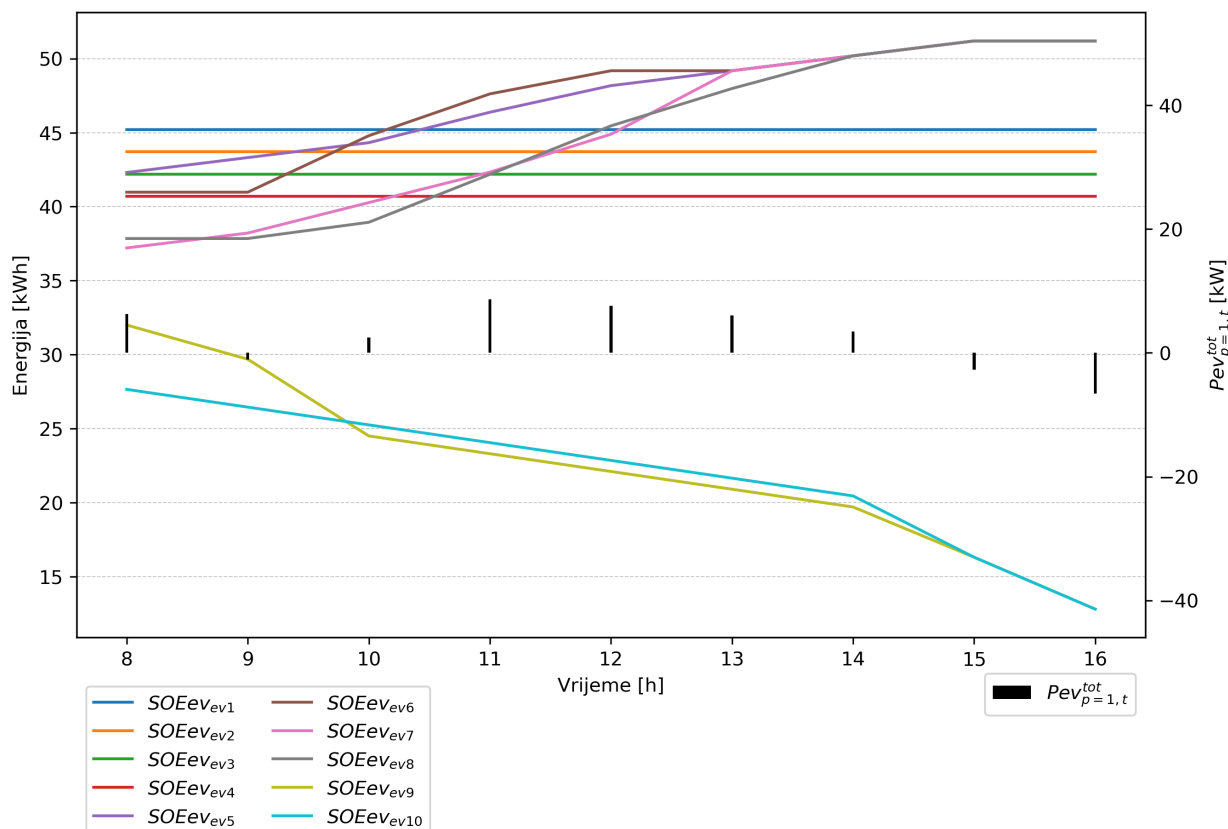
7. *Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice*

Na slikama 7.25 i 7.26 prikazana su stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca za odabrane scenarije. Iz rezultata se može zaključiti da sustav puni i prazni baterije električnih vozila uzimajući u obzir minimizaciju ukupnog društvenog troška. Sustav nastoji napuniti baterije električnih vozila vlasnika koji spadaju u treću kategoriju dok baterije onih vlasnika koji spadaju u drugu kategoriju nastoji isprazniti. Vlasnici koji spadaju u prvu kategoriju nalaze se u sredini (s obzirom na cijenu električne energije koju plaćaju za punjenje) te stanje napunjenosti baterija električnih vozila je gotovo nepromijenjeno.



**Slika 7.25:** Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



Slika 7.26: Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju

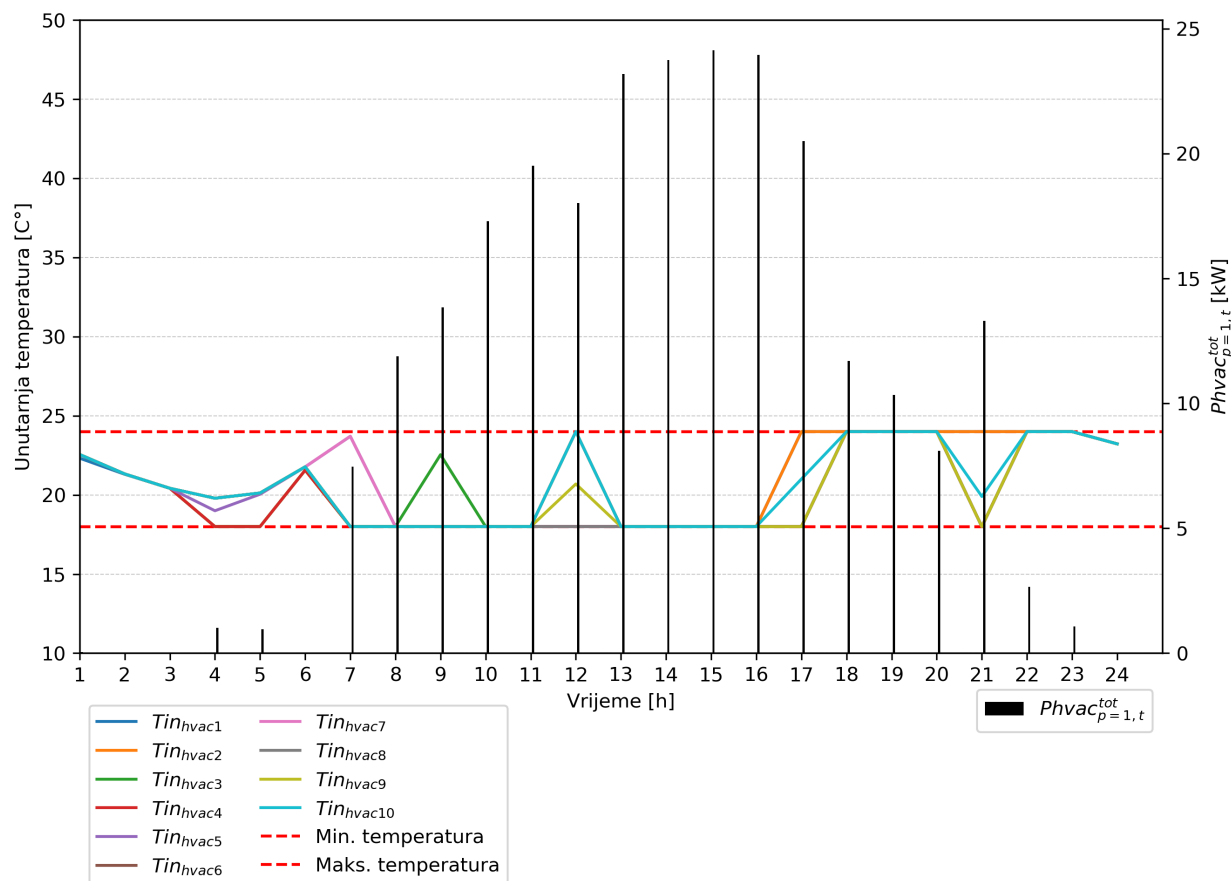
S obzirom na to da energetska zajednica za primjenu modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom integrira 3 aktivna kupca odnosno zgrade, intervali profila vremenski odgodivih trošila odnosno perilica posuđa podijeljeni su u tri (moguće) aktivacije. Vremenski intervali uzimaju u obzir (pretpostavljeno) radno vrijeme djelatnika zgrada te su prikazani u tablici 7.24. Provedenom optimizacijom dolazi se do rezultata da je optimalna aktivacija profila vremenski odgodivih trošila  $A_1$ .

**Tablica 7.24:** Intervali profila vremenski odgodivih trošila

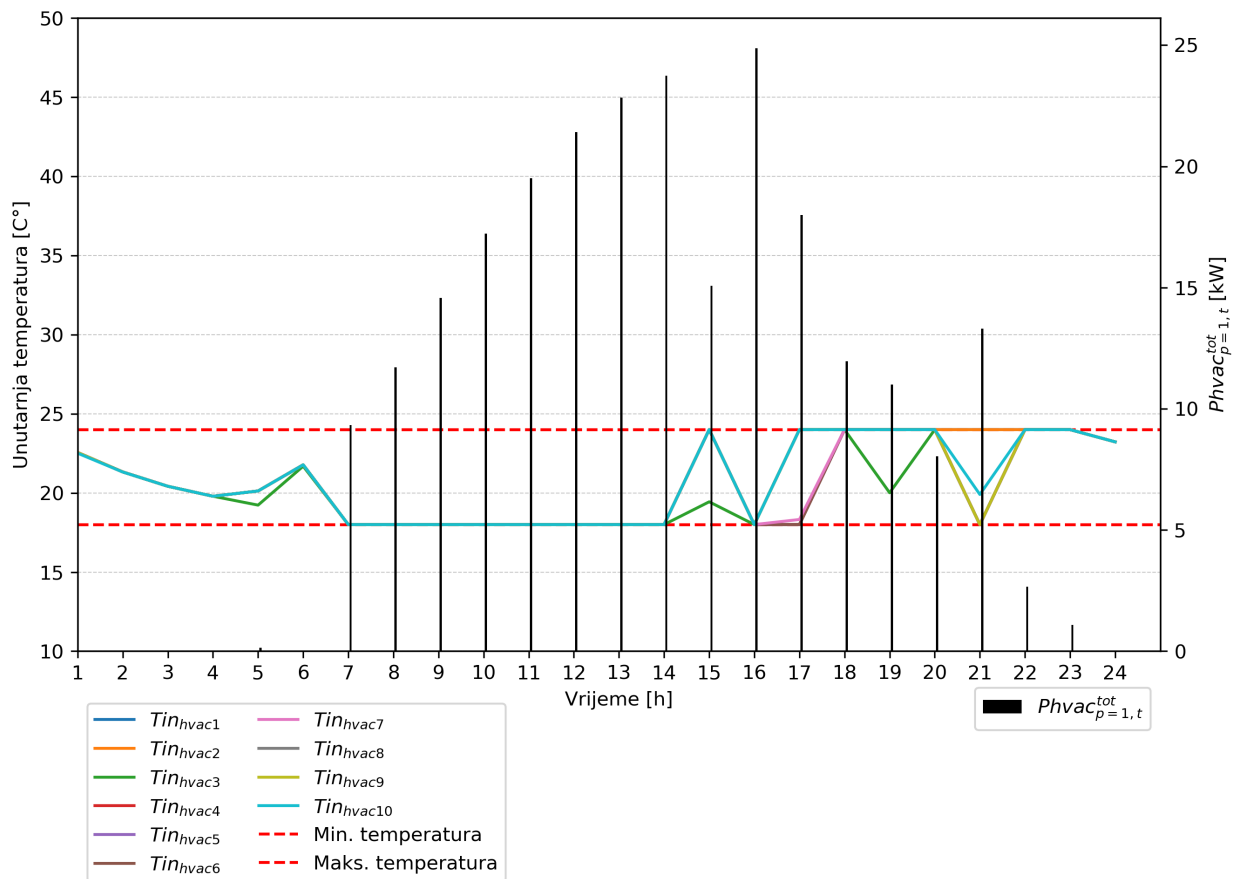
Aktivni kupac	Vremenski korak	Aktivacija profila potrošnje		
		$A_1$	$A_2$	$A_3$
$p_1$	$t_{14}$	<b>x</b>		
	$t_{15}$	<b>x</b>	x	
	$t_{16}$	<b>x</b>	x	x
	$t_{17}$		x	x
	$t_{18}$			x
$p_2$	$t_6$	<b>x</b>		
	$t_7$	<b>x</b>	x	
	$t_8$	<b>x</b>	x	x
	$t_9$		x	x
	$t_{10}$			x
$p_3$	$t_{17}$	<b>x</b>		
	$t_{18}$	<b>x</b>	x	
	$t_{19}$	<b>x</b>	x	x
	$t_{20}$		x	x
	$t_{21}$			x

Slike 7.27 i 7.28 prikazuju unutarnje temperature i ukupne angažirane snage potrebne za održavanje unutarnjih temperatura prostora kod 1. aktivnog kupca s obzirom na odabrane scenarije. Može se zaključiti da s obzirom na realizaciju slučajne varijable (scenarij) sustav drugačije planira rad dinamički upravljivih trošila odnosno sustava, grijanja ventilacije i klimatizacije. Nadalje, sa slika 7.27 i 7.28 može se zaključiti da angažirane snage potrebne za održavanje unutarnjih temperatura prostora prate promjene u vanjskoj temperaturi zraka.

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



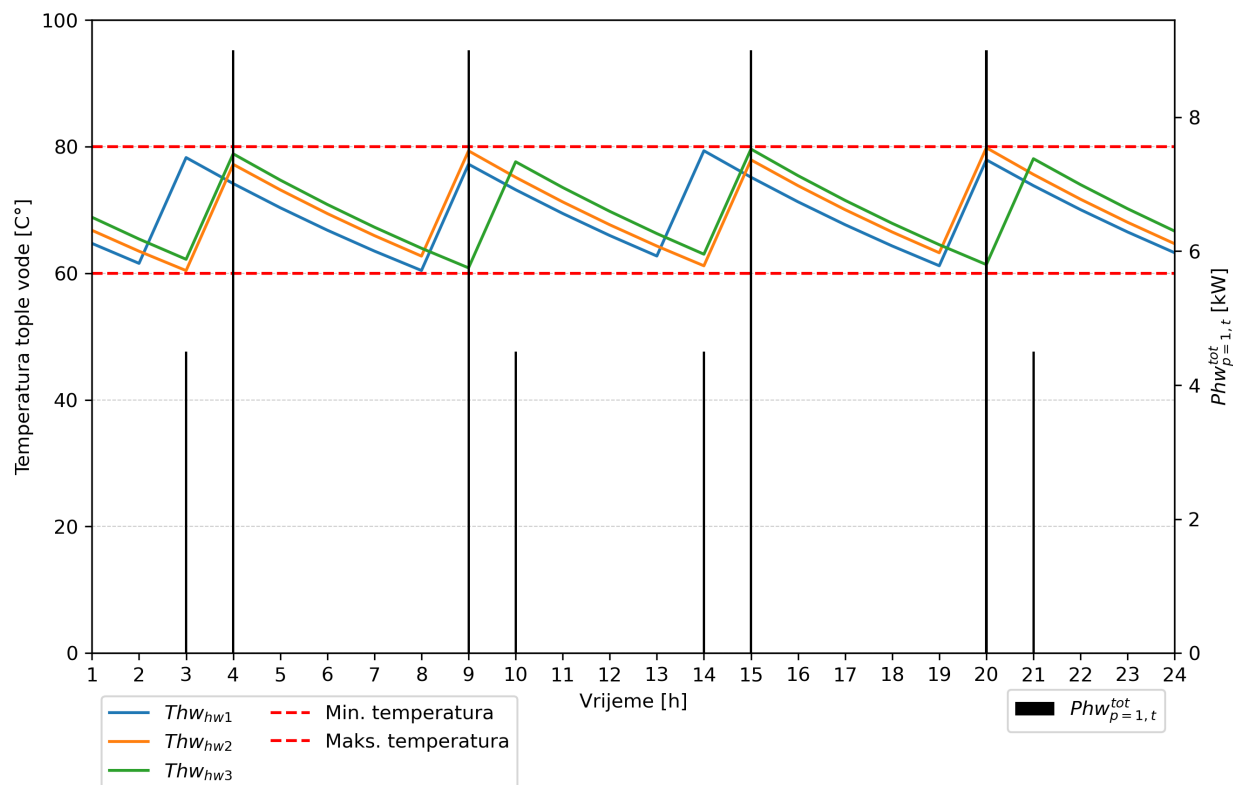
Slika 7.27: Unutarnje temperature i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju



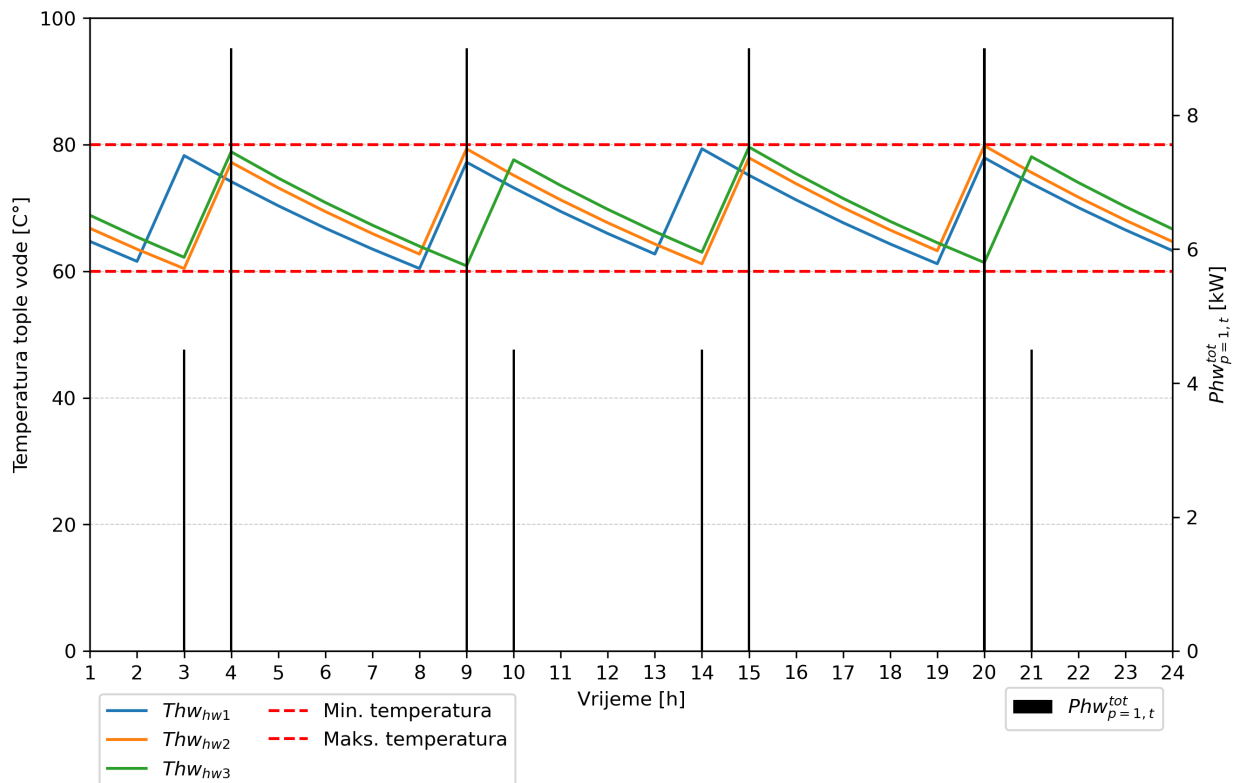
**Slika 7.28:** Unutarnje temperature i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju

Slike 7.27 i 7.28 prikazuju temperature tople vode i ukupne angažirane snage potrebne za održavanje temperatura tople vode kod 1. aktivnog kupca. Ako se statički upravljiva trošila, odnosno električni bojleri usporede s dinamički upravljivim trošilima, može se primijetiti da dinamički upravljiva trošila posjeduju veći stupanj fleksibilnosti. Na osnovu navedenoga i analizom rezultata sa slika 7.27 i 7.28 može se zaključiti da je rad statički upravljivih trošila ostao gotovo nepromijenjen s obzirom na realizaciju slučajne varijable (scenarij). Osim navedenog, u obzir se trebaju uzeti i konstantni zahtjevi (tijekom dana) za potrebnom količinom tople vode koja ne ovisi o vanjskoj temperaturi kao što je to slučaj kod dinamički upravljivih trošila koja su aktivna u slučajevima kada je vanjska temperatura veća od unutarnje željene temperature prostora (dolazi do zagrijavanja unutarnjeg prostora).

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



**Slika 7.29:** Temperatura tople vode i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje temperature vode kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju



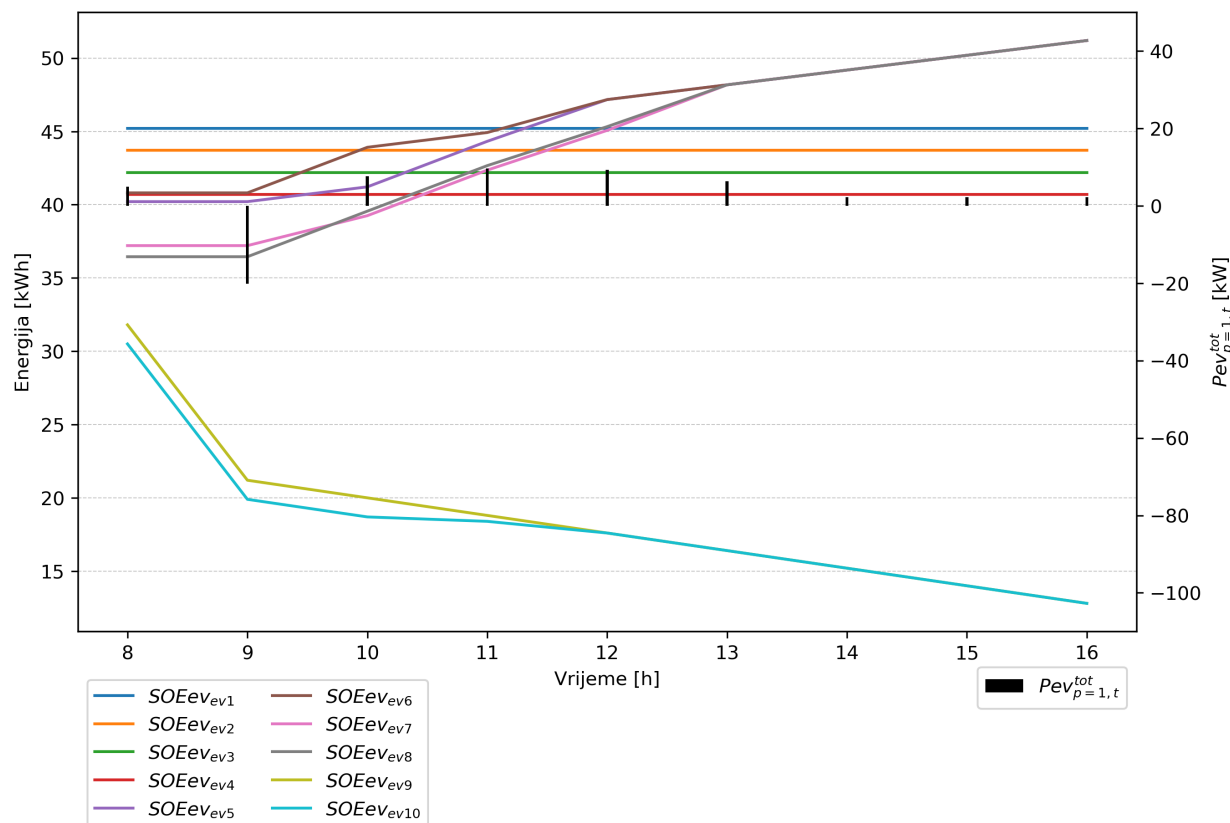
**Slika 7.30:** Temperatura tople vode i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje temperature vode kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju

### 7.3.2. Utjecaj virtualnog troška degradacije baterija električnih vozila

U ovom potpoglavlju prikazat će se kako virtualni troškovi degradacije baterija električnih vozila utječu na stanje napunjenosti baterija električnih vozila. Prikazani rezultati su dobiveni optimizacijskim modelom u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice uz konstantnu vrijednost realizacije slučajne varijable. Iz navedenog proizlazi da se u obzir nije uzimala stohastika proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora nego se težilo razumjeti ponašanje sustava uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterija električnih vozila.

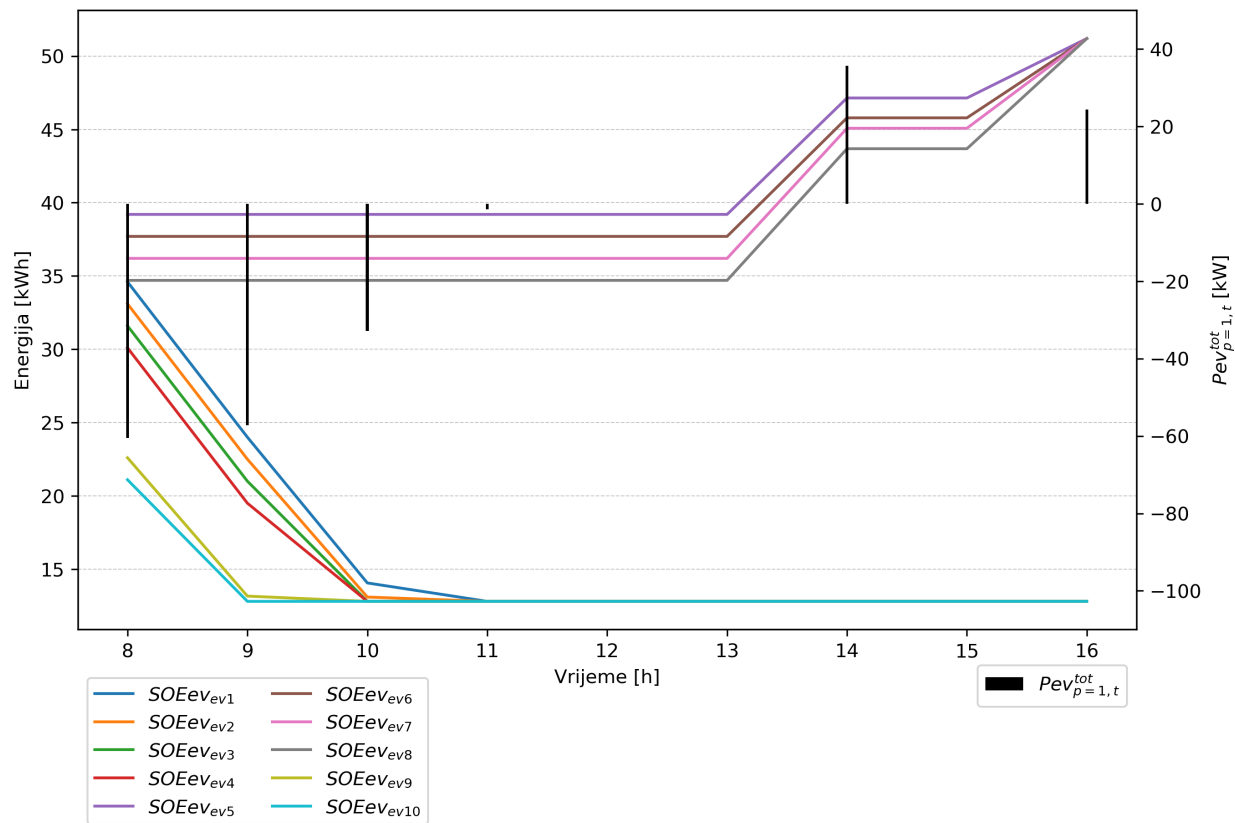
Slika 7.31 prikazuje stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca ne uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila. Iz rezultata se može zaključiti da se sustav ponaša identično kao i u prethodnom potpoglavlju 7.3.1, gdje su rezultati optimizacije prikazani na slikama 7.25 i 7.26.





**Slika 7.31:** Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca ne uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila

Na slici 7.32 prikazana su stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila. Iz dobivenih rezultata jasno se vidi utjecaj virtualnih troškova degradacije baterija električnih vozila koji ovise o visokim troškovima zamjene baterija. Na osnovu navedenog sustav nastoji stanje napunjenosti baterija održavati na nižim vrijednostima uz poštivanje ograničenja vezanih za cijene električne energije punjenja koje su vlasnici platili. Navedeno proizlazi iz razloga jer stanje napunjenosti baterije direktno utječe na iznos virtualnog troška kalendarskog starenja baterije dok virtualni trošak cikličkog starenja baterije ovisi o dubini pražnjenja ciklusa baterije te je prisutno samo prilikom pražnjenja baterije.



**Slika 7.32:** Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila

### 7.3.3. Osiguravanje fleksibilnosti u radu energetske zajednice

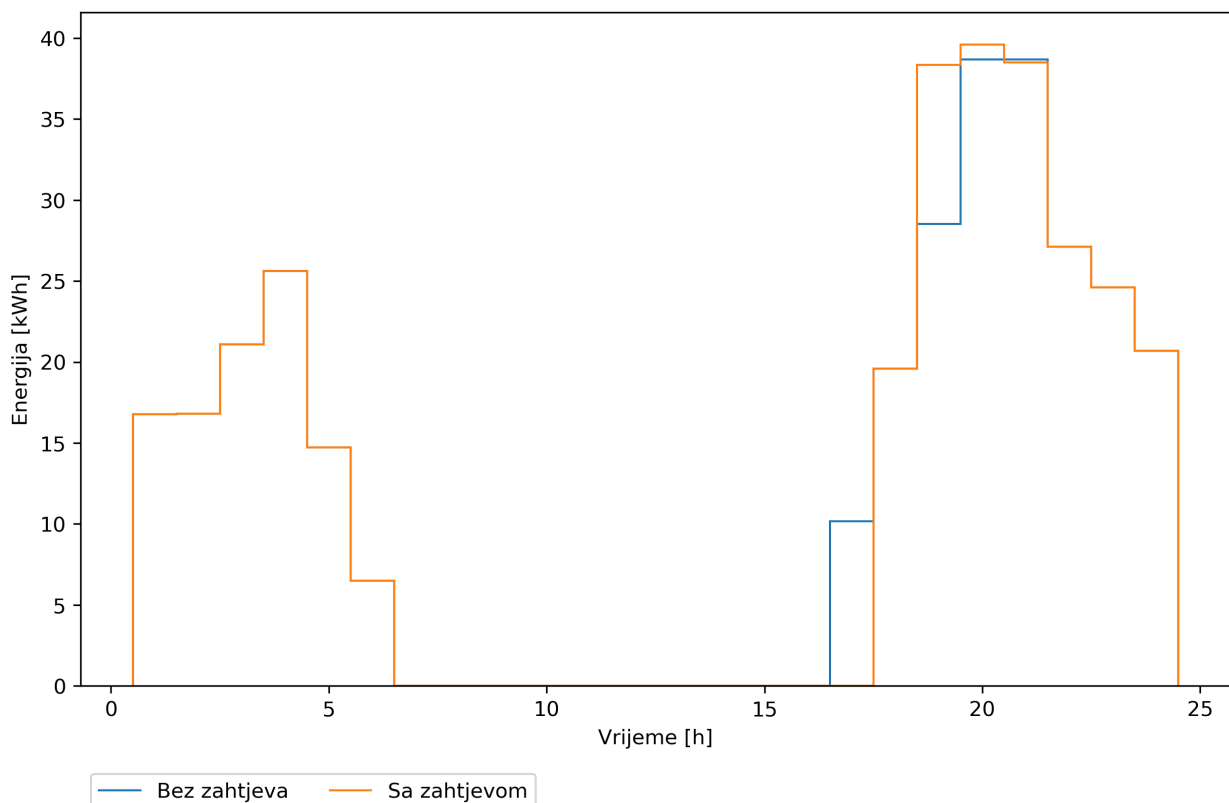
U ovom potpoglavlju nastoji se pokazati mogućnost iskorištenja fleksibilnosti u radu koje nudi energetska zajednica. Ova mogućnost proizlazi iz činjenice da energetska zajednica integrira uređaje koji osiguravaju fleksibilnosti u radu, odnosno baterijske sustave za pohranu energije i električna vozila. Uz stacionarne baterijske sustave pohrane energije, električna vozila posjeduju velik potencijal primjene zbog visokih iznosa snaga punjenja i pražnjenja te kapaciteta baterija električnih vozila. Dodano, implementirajući napredne tehnologije kao što je V2G uz određivanje optimalnih cijena razmijene električne energije investicijski troškovi se mogu zanemariti u usporedbi sa stacionarnim baterijskim sustavima pohrane energije.

Rezultati prikazani u nastavku dobiveni su optimizacijskim modelom u višem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice uz konstantnu vrijednost realizacije slučajne varijable. Iz navedenog proizlazi da se u obzir nije uzimala stohastika proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora nego se težilo

razumjeti ponašanje sustava uzimajući u obzir zahtjev za promjenom snage prilikom preuzimanja i/ili predaje električne energije u mrežu.

U primjeru prikazanom u nastavku nastoji se u određenom satu u danu postaviti ograničenje za preuzimanje električne energije iz mreže od strane energetske zajednice. Kako prilikom proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora tijekom dana ne dolazi do uvoza električne energije iz mreže ( $t_7 - t_{16}$ ) osim u 17 satu od strane 3. aktivnog kupca u iznosu od 10.17 kW. S obzirom na navedeno, u ovom pokaznom primjeru upućuje se zahtjev na ograničenje snage prilikom preuzimanja električne energije iz mreže od strane energetske zajednice u 17 satu na iznos 0 kW.

Na slici 7.33 prikazana je uvezena električna energija iz mreže od strane 3. aktivnog kupca bez i sa zahtjevom za smanjenje snage prilikom preuzimanja električne energije iz mreže od strane energetske zajednice. Analizom rezultata sa slike 7.33 jasno se vidi da je energetska zajednica ispunila traženi zahtjev te da ne dolazi do preuzimanja električne energije iz mreže u 17 satu od strane 3. aktivnog kupca odnosno energetske zajednice. Nadalje, kompenzacija traženog zahtjeva primjećuje se u 19 satu kada 3. aktivni kupac preuzima potrebnu količinu električne energije iz mreže.



**Slika 7.33:** Uvezena električna energija iz mreže od strane 3. aktivnog kupca bez i sa zahtjevom za smanjenje snage

Ukupni društveni trošak bez zahtjeva za smanjenje snage prilikom preuzimanja električne energije iz mreže od strane energetske zajednice iznosi 700.21 [€], a za slučaj sa zahtjevom 701.37 [€]. Iz rezultata se može primijetiti neznatno povećanje ukupnog društvenog troška od 1.16 [€] na osnovu koga se može ocijeniti moguća zarada od pružanja usluge fleksibilnosti.

Navedeni rezultati pokazuju mogućnost primjene usluge fleksibilnosti energetske zajednice u pogledu odgode ulaganja u mrežnu infrastrukturu, uravnoteženja bilančne grupe te potencijalno povećanja potrošnje i uravnoteženja elektroenergetskog sustava. Osim navedenog, primjena baterijskih spremnika energije na razini korisnika je postizanje energetske arbitraže, rezanja vršne snage te praćenje potrošnje i proizvodnje električne energije. Potencijal baterijskog spremnika (sustavi pohrane energije i električna vozila) je u tome da može osigurati više od jedne usluge odnosno primarnu za koju je prvenstveno namijenjen te nekoliko sekundarnih usluga koje ovise o tehničkim karakteristikama, lokaciji i prilikama u mreži. [99]

#### **7.3.4. Rezultati optimizacijskog modela u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom**

Kako je već detaljno opisano u potpoglavlju 4.2, predloženi model dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice uzima u obzir stohastičke odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška u nižem sloju u gotovo stvarnom vremenu. Shodno navedenom, u nastavku će se prikazati rezultati dobiveni optimizacijskim modelom u nižem sloju, uzimajući u obzir varijable odluke (odabranog) 15. scenarija dobivene rješavanjem optimizacijskog problema u višem sloju.

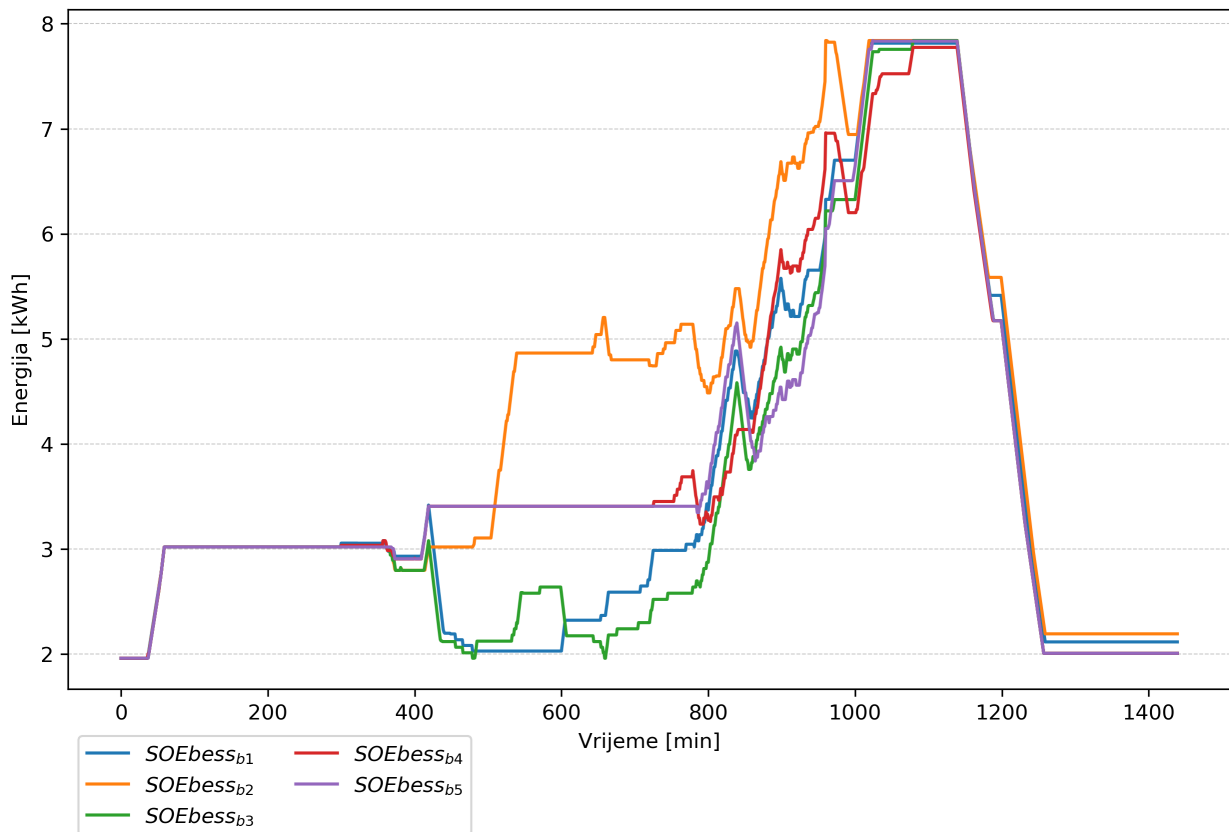
Planiranje rada vremenski odgodivih trošila zasniva se na dobivenom rješenju optimizacijskog problema u višem sloju te su profili prilagođeni s obzirom na vremenski korak nižeg sloja. Tako se u nižem sloju koristi aktivacija profila vremenski odgodivih trošila  $A_1$ . Nadalje, planiranje rada dinamički i statički upravljivih trošila električne energije u nižem sloju eksplicitno je uvjetovano varijablama odluke odabranog scenarija iz višeg sloja. Na osnovu navedenog, varijable odluke (snage) odabranog scenarija dobivene rješavanjem optimizacijskog problema u višem sloju za dinamički upravljiva trošila odnosno sustave grijanja, ventilacije i klimatizacije prikazane su u tablicama P.1, P.2 i P.3. Također, varijable odluke (snage) odabranog scenarija dobivene rješavanjem optimizacijskog problema u višem sloju za statički upravljiva trošila odnosno električne bojlere prikazane su u tablicama P.4, P.5 i P.6.

Ovakav pristup planiranju rada dinamički i statički upravljivih trošila električne energije proizlazi iz činjenice da je temperatura sporo promjenjiva veličina koja se može s dovoljnom točnošću predvidjeti za potrebe rješavanja optimizacijskog problema u višem sloju, a nižem sloju osigurava smanjenje računalne kompleksnosti i vrijeme izvođenja (rješavanja) optimizacijskog problema.

Za razliku od dinamički i statički upravljivih trošila električne energije, početna i konačna stanja napunjenosti baterija sustava pohrane energije i električnih vozila prosljeđuju se nižem sloju za svaki vremenski korak s obzirom na varijable odluke odabranog scenarija iz višeg sloja. Ovo omogućava sustavu ponovno planiranje rada uređaja, odnosno odabir optimalnog iznosa snage punjenja i pražnjenja baterije s obzirom na novonastale promjene u proizvodnji i potrošnji električne energije uz zadovoljenje navedenih ograničenja. Početna stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane energije prikazana su u tablicama P.7, P.8 i P.9 dok su početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila prikazana u tablicama P.10, P.11 i P.12.

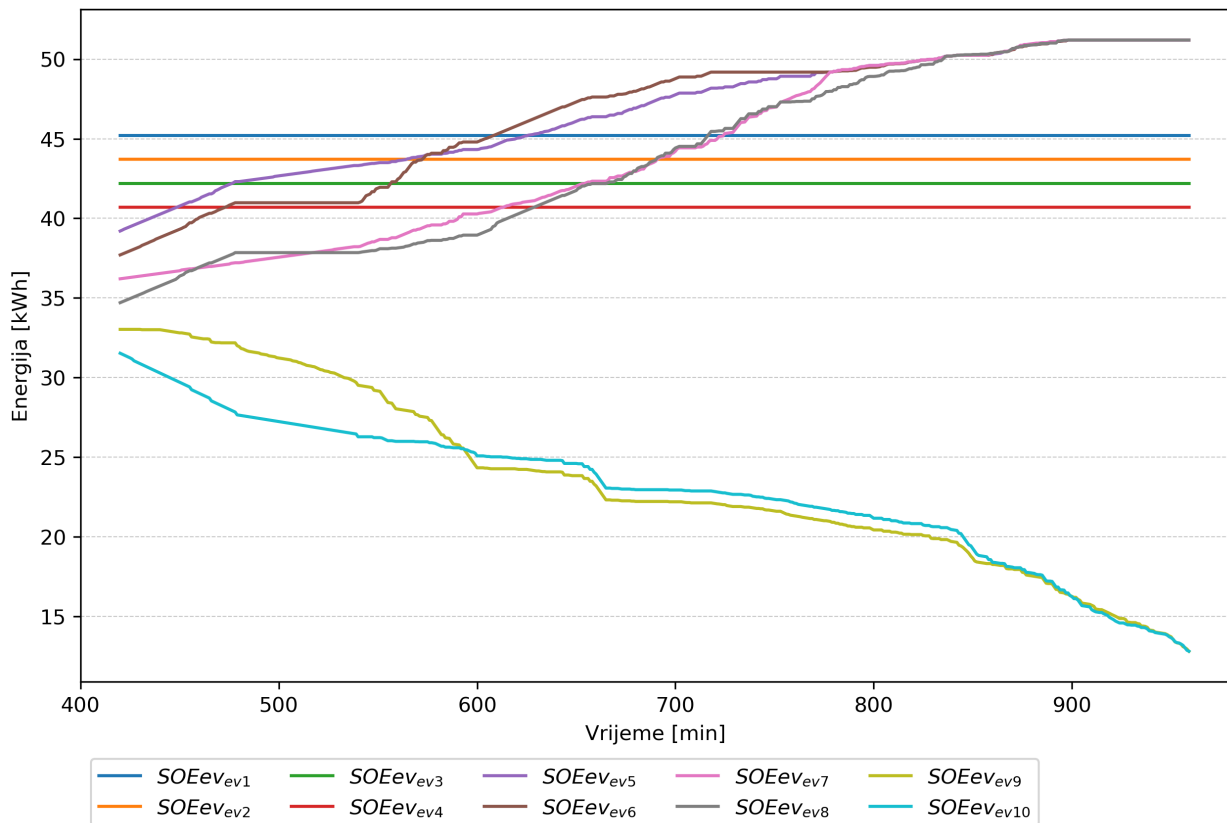
Na slici 7.34 prikazana su stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca. Usporedbom rezultata prikazanih na slikama 7.24 i 7.34 jasno se vidi da sustav nastoji promjene u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora i u potrošnji električne energije kompenzirati na način ponovnog planiranja rada uređaja, odnosno u ovom slučaju baterijskih sustava pohrane energije.

7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



Slika 7.34: Stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca

Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca prikazana su na slici 7.35. Također, analizom i usporedbom rezultata prikazanih na slikama 7.26 i 7.35 može se vidjeti da sustav nastoji optimalno kompenzirati nastale promjene u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora i u potrošnji električne energije.



Slika 7.35: Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca

Kako je već napomenuto, prilikom planiranja rada uređaja (rezultati prikazani na slikama 7.34 i 7.35), optimizacijskom modelu u nižem sloju prosljeđuju se varijable odluke iz višeg sloja, odnosno početna i konačna stanja napunjenosti baterija sustava pohrane energije i električnih vozila koja se moraju zadovoljiti za osiguranje minimalnog društvenog troška dobivenog u višem sloju što u određenoj mjeri utječe na računalnu kompleksnost i vrijeme izvođenja (rješavanja) optimizacijskog problema. Na osnovu navedenog, baterijski sustavi pohrane energije i električna vozila mogu osigurati fleksibilnost u radu uslijed nastanka određenih promjena u proizvodnji i potrošnji električne energije.

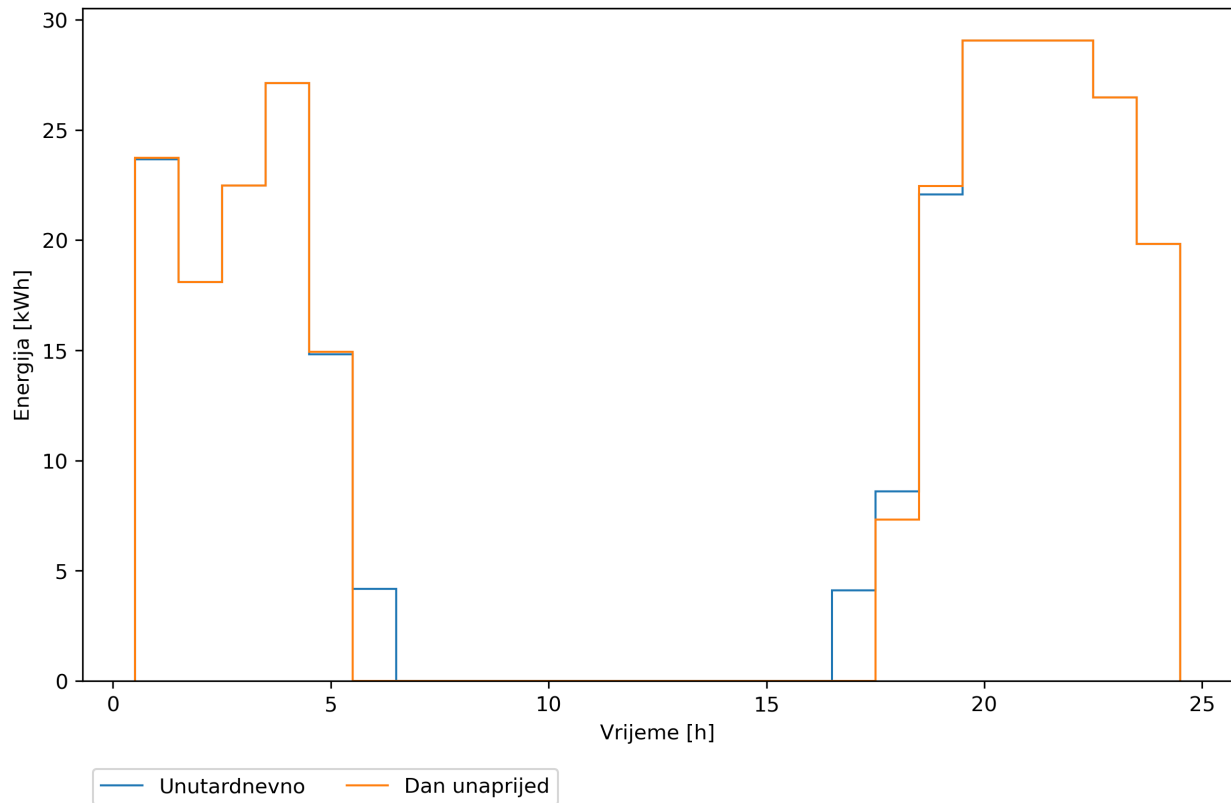
### 7.3.5. Usporedba rezultata optimizacijskog modela u višem i nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom

U ovom potpoglavlju analizirat će se rezultati dobiveni optimizacijskim modelima u višem i nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava upravljanja energijom energetske zajednice.

Na slikama 7.36, 7.37 i 7.38 prikazane su uvezene količine električne energije iz mreže od strane 1., 2. i 3. aktivnog kupca dobiveni optimizacijskim modelima u višem i nižem sloju. Analizom rezultata prikazanih na slikama (7.36, 7.37 i 7.38) dolazi se do zaključka

### 7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice

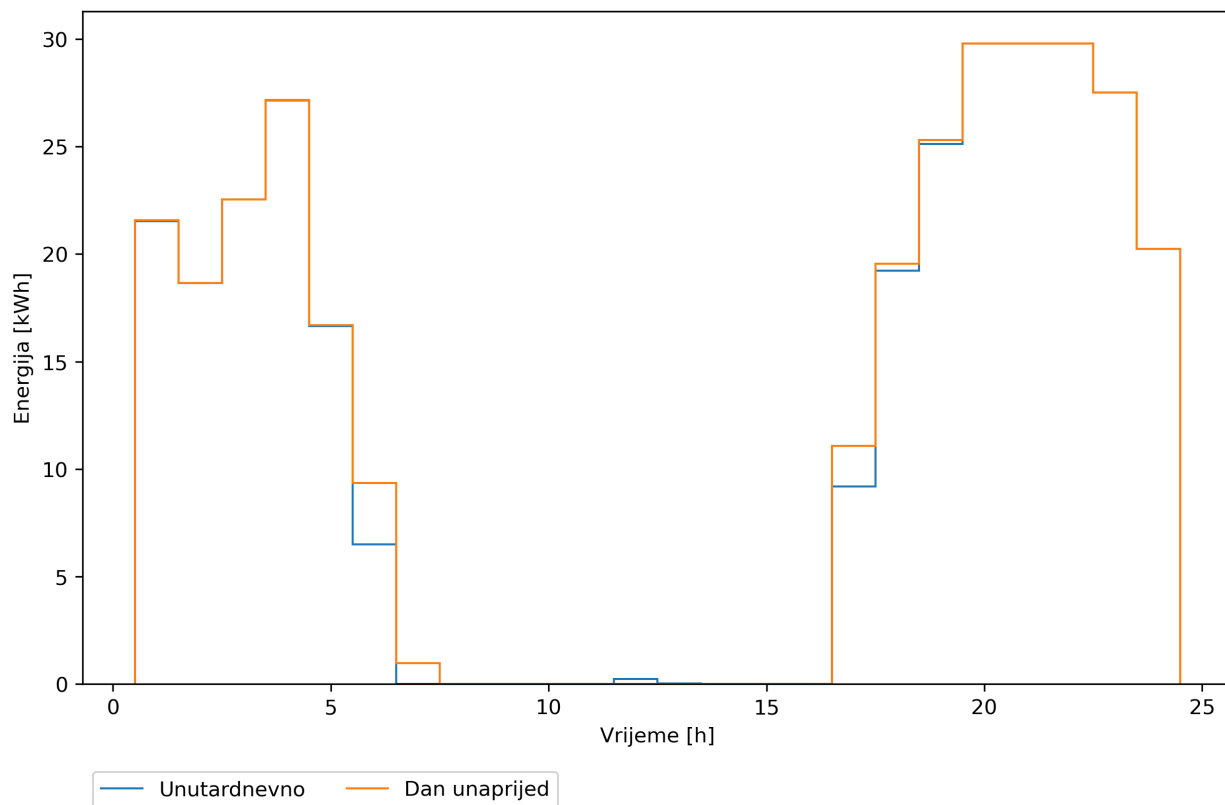
da postoji određena razlika u količini električne energije uvezene iz mreže u vremenskim trenucima kada počinje i prestaje proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava. Navedeno proizlazi iz vremenskih koraka korištenih u višem i nižem sloju te ostalih ulaznih podataka pripremljenih na osnovu vremenskih koraka.



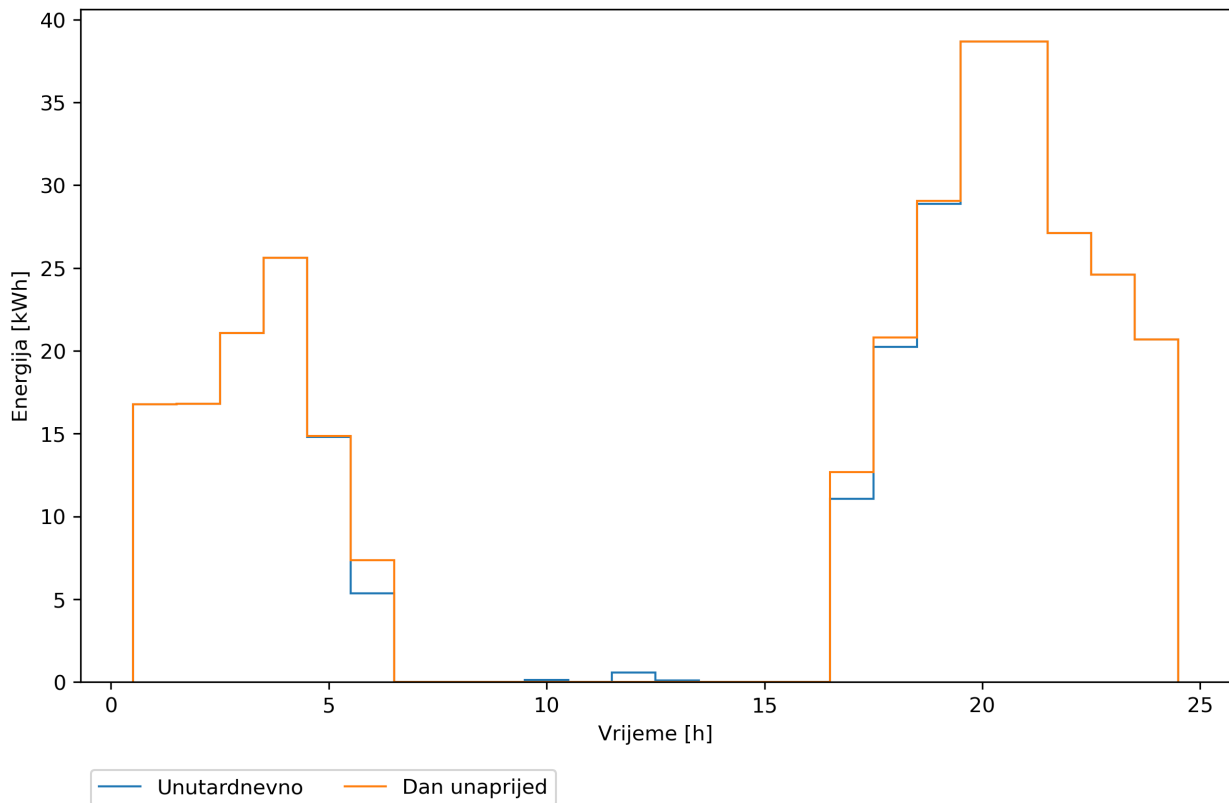
**Slika 7.36:** Uvezena električna energija iz mreže od strane 1. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutardnevno



7. Primjena modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice



**Slika 7.37:** Uvezena električna energija iz mreže od strane 2. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutardnevno



**Slika 7.38:** Uvezena električna energija iz mreže od strane 3. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutardnevno

Tablica 7.25 prikazuje postignute troškove optimizacijskih modela u višem i nižem sloju. Analizom rezultata dolazi se do zaključka da je trošak razmijene električne energije približno jednakog iznosa kao i troškovi opskrbe i mjernog mjesta koji su fiksnog iznosa. U trošak razmijene električne energije su uračunati virtualni troškovi degradacije baterija sustava pohrane energije jer se samo oni u ovom slučaju uzimaju u obzir. Nadalje, najveće povećanje ukupnog društvenog troška proizlazi iz povećanja troška angažirane snage. Navedeno proizlazi iz razloga jer se angažirane snage implicitno uzimaju u obzir prilikom rješavanja optimizacijskog problema u nižem sloju te iz razloga jer se javljaju vršne vrijednosti snage prilikom proizvodnje i potrošnje električne energije u nižem sloju koje nisu vidljive u vremenskom koraku višeg sloja optimizacijskog modela zbog usrednjavanja vrijednosti. Zabilježene vršne vrijednosti snaga u minutnim intervalima se usrednjuju, ako se gleda u satnim intervalima, što dovodi do toga da su vrijednosti manje u višem sloju. Trošak angažirane snage u nižem sloju u iznosu od 694.56 [€] je dobiven na osnovu 15 minutnog prosjeka snage u nižem sloju prilikom preuzimanja električne energije iz mreže od strane aktivnih kupaca, odnosno zgrada unutar energetske zajednice.

**Tablica 7.25:** Postignuti troškovi optimizacijskog modela u višem i nižem sloju

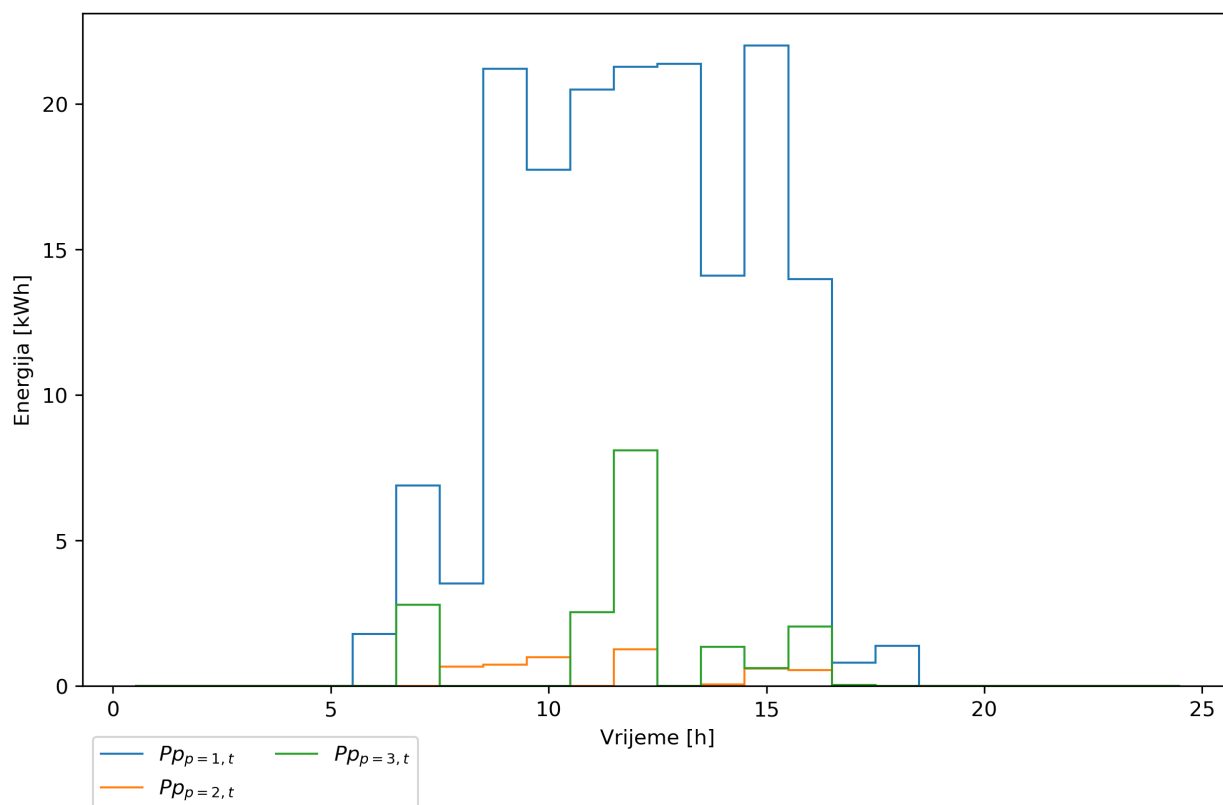
	Trošak razmjene energije [€]	Trošak angažirane snage [€]	Trošak opskrbe i mjernog mjesta [€]	Ukupni društveni trošak [€]
Unutardnevno	110.54	694.56	34.33	839.42
Dan unaprijed	115.62	570.56	34.33	720.51

Prema dobivenim rezultatima, količina ukupno uvezene električne energije iz mreže je 894.48 kWh u višem sloju te 893.79 kWh u nižem sloju iz čega proizlazi da je ukupna emisija  $CO_2^e$  približno jednakog iznosa od 220 kg postignuta u oba sloja.

Izvezene količine električne energije u mrežu od strane aktivnih kupaca prilikom rješavanja optimizacijskom modela u višem sloju su iznosa 0 kWh. Navedeno proizlazi iz činjenice da sustav nastoji iskoristiti svu proizvedenu električnu energiju na mjestu proizvodnje jer cijene za predaju električne energije u mreže nisu motivirajuće.

Slika 7.39 prikazuje količine izvezene električne energije u mrežu od strane aktivnih kupaca dobivene optimizacijskim modelom u nižem sloju. Ukupan iznos izvezene električne energije u mrežu je 188 kWh. Analizom rezultata sa slike 7.39 dolazi se do zaključka da se pojavljuju vršne vrijednosti snage prilikom proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora koje nisu prisutne prilikom rješavanja optimizacijskog problema u višem sloju zbog vremenskog koraka i usrednjavanja vrijednosti.

Navedene viškove proizvedene električne energije sustav nastoji prodati na lokalnom tržištu (dijeljenje energije, tablica 7.26) ili u mrežu kada je to neophodno. Ovdje je važno napomenuti da dobiveni rezultati optimizacijskog modela u višem sloju pokazuju da ne dolazi do trgovanja električnom energijom na lokalnom tržištu.



Slika 7.39: Izvezena električna energija u mrežu od strane aktivnih kupaca unutarodneвно

Tablica 7.26 prikazuje količine električne energije razmijenjene na lokalnom tržištu dobivene rješavanjem optimizacijskog problema u nižem sloju. Ukupno je na lokalnom tržištu električne energije razmijenjeno 18.46 kWh.

**Tablica 7.26:** *Količine električne energije razmijenjene na lokalnom tržištu*

Vremenski korak	Aktivni kupac	$El_{p,t}^{\text{imp}}$ [kWh]	$El_{p,t}^{\text{exp}}$ [kWh]
$t_6$	$p_1$	0.00	3.90
	$p_2$	2.63	0.00
	$p_3$	1.27	0.00
$t_7$	$p_1$	0.00	1.35
	$p_2$	0.51	0.00
	$p_3$	0.88	0.04
$t_8$	$p_1$	0.00	0.00
	$p_2$	0.00	0.00
	$p_3$	0.00	0.00
$t_9$	$p_1$	0.00	0.64
	$p_2$	0.00	0.00
	$p_3$	0.64	0.00
$t_{10}$	$p_1$	0.00	2.17
	$p_2$	0.44	0.23
	$p_3$	1.97	0.00
$t_{11}$	$p_1$	0.00	0.01
	$p_2$	0.00	0.00
	$p_3$	0.01	0.00
$t_{12}$	$p_1$	0.00	1.35
	$p_2$	0.50	0.00
	$p_3$	0.86	0.00
$t_{13}$	$p_1$	0.00	1.27
	$p_2$	0.36	0.00
	$p_3$	0.91	0.00
$t_{14}$	$p_1$	0.00	1.31
	$p_2$	0.00	0.00
	$p_3$	1.31	0.00
$t_{15}$	$p_1$	0.00	0.00
	$p_2$	0.00	0.00
	$p_3$	0.00	0.00

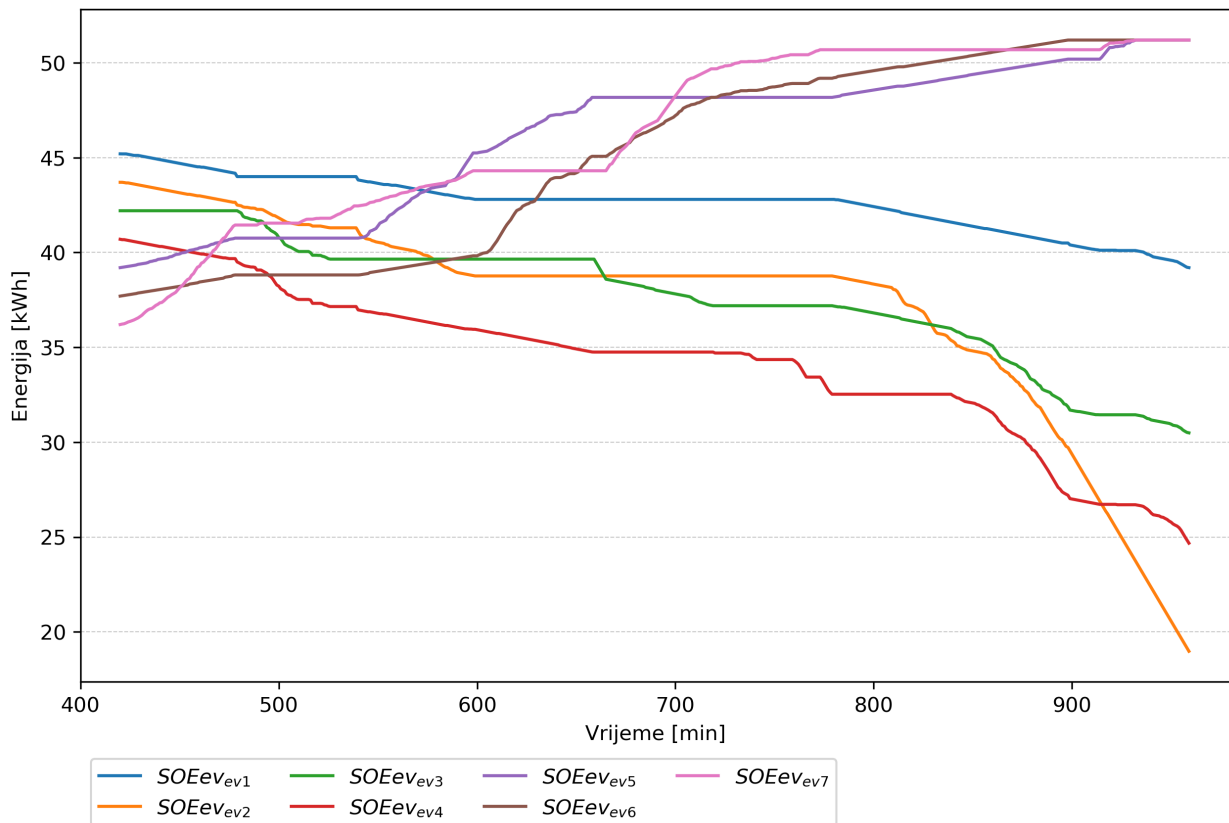
**Tablica 7.26:** (Nastavak) Količine električne energije razmijenjene na lokalnom tržištu

Vremenski korak	Aktivni kupac	$El_{p,t}^{\text{imp}}$ [kWh]	$El_{p,t}^{\text{exp}}$ [kWh]
$t_{16}$	$p_1$	0.00	2.32
	$p_2$	0.14	0.00
	$p_3$	2.18	0.00
$t_{17}$	$p_1$	0.00	3.41
	$p_2$	1.89	0.00
	$p_3$	1.55	0.04
$t_{18}$	$p_1$	0.00	0.39
	$p_2$	0.07	0.00
	$p_3$	0.34	0.02

### 7.3.6. Rezultati optimizacijskog modela u nižem sloju dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom - utjecaj prisutnosti električnih vozila

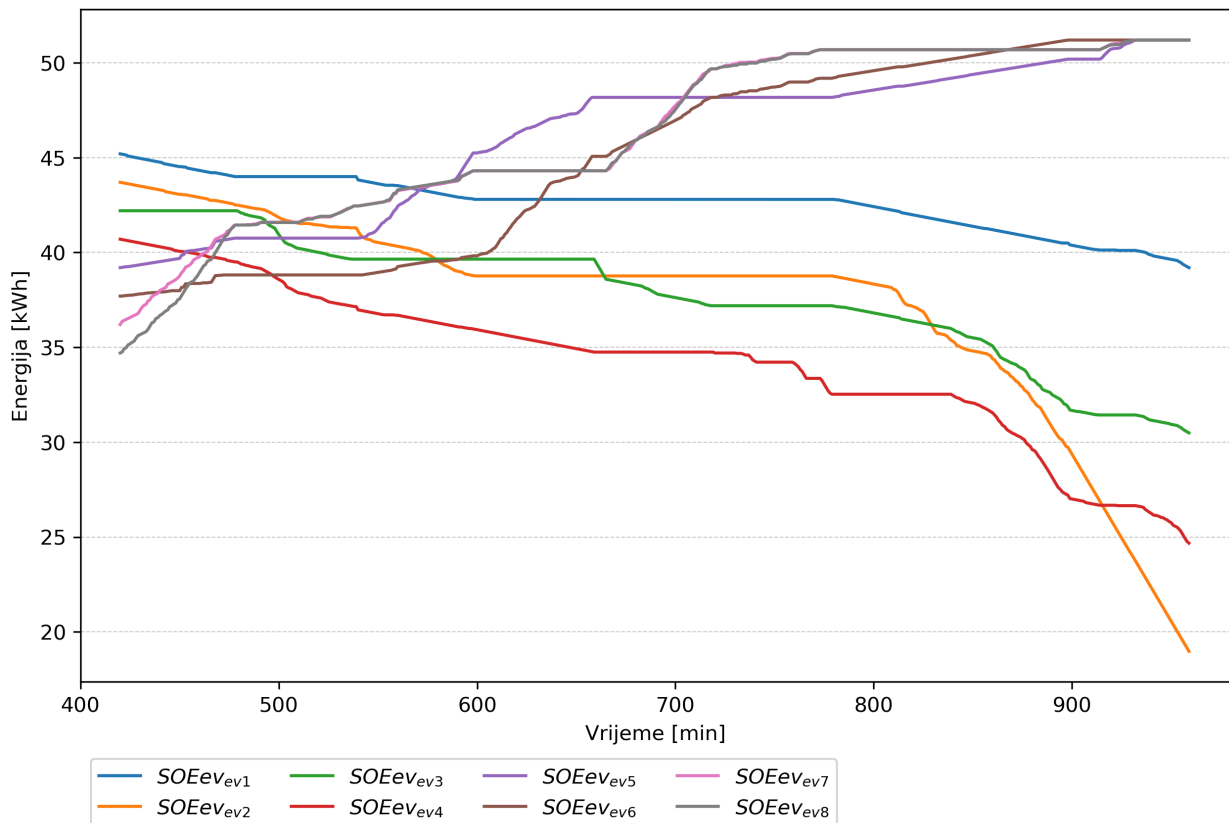
U ovom potpoglavlju nastoji se ispitati izvedivost optimizacijskog modela u nižem sloju ako se pretpostavi, kao najnepovoljniji slučaj, nepredviđen dolazak i/ili odlazak električnog vozila s punionice. Shodno navedenom, prema već odabranom scenariju iz višeg sloja prosljeđuju se varijable odluke nižem sloju uz promijenjen broj električnih vozila na punionicama kod 2. aktivnog kupca.

Slika 7.40 prikazuje stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za osnovni slučaj sa 7 električnih vozila priključenih na punionice. Iz rezultata sa slike 7.40 može se primijetiti da sustav nastoji isprazniti baterije električnih vozila vlasnika koji spadaju u prvu kategoriju jer se tako osigurava smanjenje ukupnog društvenog troška. S druge strane, sustav nastoji napuniti baterije električnih vozila vlasnika koji spadaju u treću kategoriju iz već navedenih razloga. Vlasnici električnih vozila koji spadaju u drugu kategoriju nisu prisutni odnosno električna vozila nisu spojena na punionice kod drugog aktivnog kupca.



**Slika 7.40:** Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za osnovni slučaj sa 7 električnih vozila priključenih na punionice

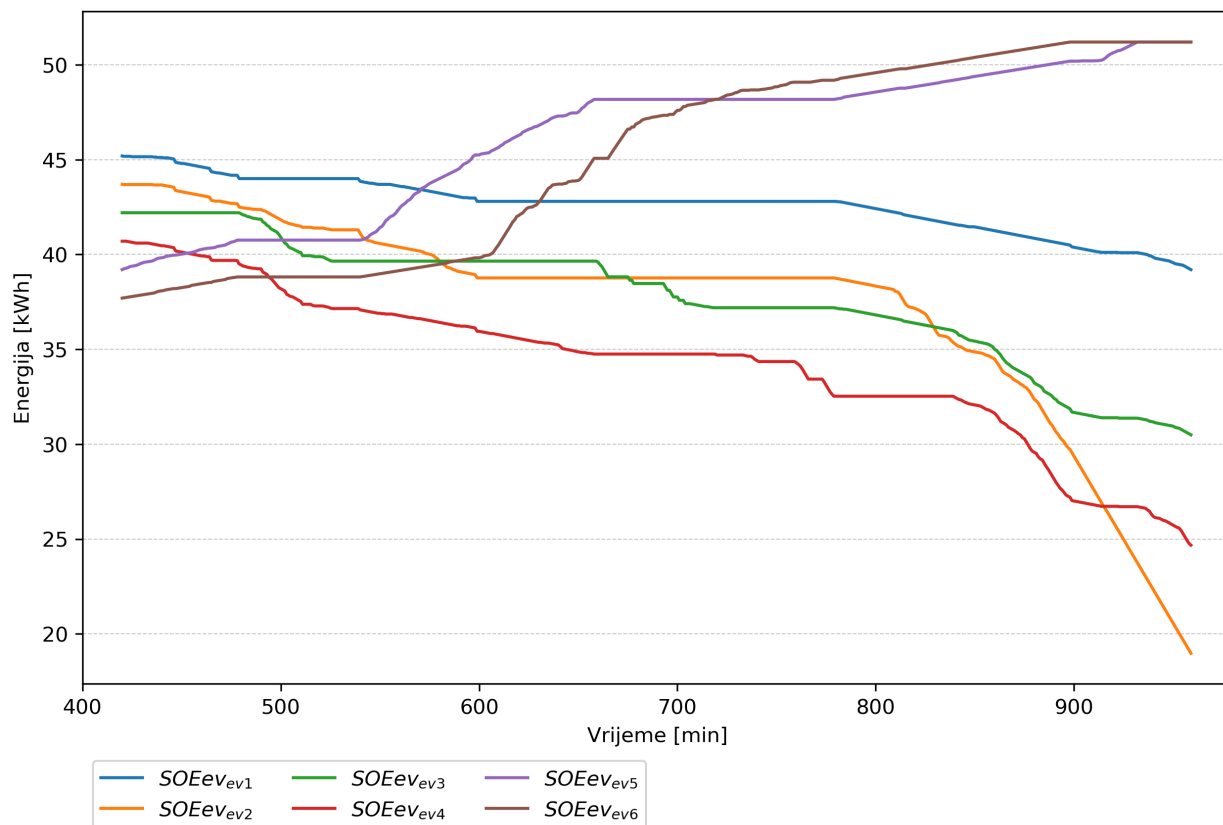
Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj jednog više električnog vozila, odnosno s 8 električnih vozila priključenih na punionice prikazuje slika 7.41. S obzirom na to da se radi o vlasniku električnog vozila koji spada u treću kategoriju, prema već odabranim optimalnim cijenama električne energije za primjenu V2B usluge, omogućeno je punjenje baterije električnog vozila. Nadalje, pretpostavlja se najnepovoljniji slučaj, a to je da vlasnik želi konačno stanje napunjenosti baterije električnog vozila od 80 %, odnosno iskazano u energiji u iznosu od 51.2 kWh. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 8 električnih vozila spojenih na punionice prikazana su u tablici P.13.



**Slika 7.41:** Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj s 8 električnih vozila priključenih na punionice

Slika 7.42 prikazuje stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj sa 6 električnih vozila priključenih na punionice. U ovom slučaju se pretpostavlja da jedan od vlasnika električnog vozila koji spada u kategoriju 3 nije svoje vozilo priključio na punionicu kod 2. aktivnog kupca. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 6 električnih vozila spojenih na punionice prikazana su u tablici P.14.





**Slika 7.42:** Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj sa 6 električnih vozila priključenih na punionice

S obzirom na rezultate prikazane na slikama 7.42 i 7.41, može se zaključiti da je optimizacijski model u nižem sloju izvediv što je sustav postigao ponovnim planiranjem uređaja koji osiguravaju fleksibilnost u pogonu, a to su baterijski sustavi pohrane energije i električna vozila. Nadalje, trošak razmjene energije je za slučaj sa 7 električnih vozila 110.54 [€], za slučaj s 8 električnih vozila 106.73 [€] i za slučaj sa 6 električnih vozila 114.11 [€], dok je trošak angažirane snage ostao nepromijenjen. Navedeni iznosi troška razmjene energije prate prodaju električne energije vlasnicima vozila.

## 8. Zaključak

Integracijom obnovljivih izvora energije nastoje se zadovoljiti sve veće potrebe za električnom energijom uz istodobno praćenje i dostizanje postavljenih globalnih ciljeva za smanjenje emisija stakleničkih plinova i porasta prosječne temperature. Pozitivna strana integracije obnovljivih izvora energije je smanjenje stakleničkih plinova, dok je negativna strana neizvjesnost proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, posebice promjene u intenzitetu sunčevog zračenja i brzini puhanja vjetra. Osim integracije obnovljivih izvora energije, prelazak s konvencionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem na električna vozila posjeduje značajan potencijal u dostizanju navedenih ciljeva.

Integracija obnovljivih izvora energije, kao i električna vozila, povlače za sobom problem povratnog negativnog djelovanja na mrežu. Nadalje, istraživanja su pokazala da je optimalno koristiti proizvedenu električnu energiju iz obnovljivih izvora na mjestu proizvodnje u cilju smanjenja navedenog utjecaja na mrežu. Shodno navedenom, svaki pasivni kupac električne energije integracijom obnovljivih izvora energije postaje aktivni kupac električne energije koji, osim što preuzima električnu energiju iz mreže, može izvoziti viškove električne energije u mrežu. Uz obnovljive izvore energije i električna vozila imaju znatan utjecaj na tokove snaga aktivnog kupca zbog visokih iznosa snaga punjenja, ali i pražnjenja u budućnosti primjenom V2G usluge te kapaciteta baterije. U cilju rješavanja navedenih problema i donošenja optimalnih odluka neophodna je implementacija sustava upravljanja energijom te razvoj organizacijskih struktura aktivnih kupaca. Prema tvrdnjama nekih od autora znanstvenih radova energetske zajednice će imati ključnu ulogu u nadolazećoj energetskej tranziciji.

U znanstvenoj literaturi primjetan je veći broj znanstvenih radova koji se bavi problematikom razvoja sustava upravljanja energijom i organizacijskih struktura. Tako neki od autora znanstvenih radova razvijaju sustave upravljanja energijom na razini jednoga aktivnog kupca, dok s druge strane mogu se pronaći primjeri radova u kojima autori razvijaju sustave upravljanja na razini više aktivnih kupaca, odnosno energetske zajednice.

U disertaciji razvijeni su optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne ener-

gije za primjenu V2B usluge te unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge, odnosno cijene razmijene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada razvijen je pomoću MATLAB-a i GAMS-a. Unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom razvijen je u GAMS-u te realiziran u višem sloju stohastičkim pristupom s horizontom planiranja od 24 sata u budućnost i vremenskim korakom od 1 sat, a u nižem sloju determinističkim pristupom s horizontom planiranja od 1 sat i vremenskim korakom od 1 minute pomoću mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja i proširenog matematičkog programiranja, uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu. Optimizacijski problem višeg sloja sustava upravljanja energijom rješava se pomoću Lindo *solver*-a u GAMS-u, dok se niži sloj sustava upravljanja energijom temelji na strategiji pomičnog horizonta implementiranoj kombinacijom algoritma u MATLAB-u i optimizacijskog problema koji se rješava u GAMS-u Lindo *solver*-om. Nadalje, unaprijeđeni model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom integrira model baterijskog sustava pohrane energije koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije te modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije. Model baterijskog sustava pohrane primijenjen je na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila te je unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju.

Primjenom optimizacijskog algoritma za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge kao rezultat dobivaju se vrijednosti funkcije cilja, odnosno ukupnog društvenog troška za svaku kombinaciju cijena električne energije za punjenje i pražnjenje baterije električnog vozila. Optimizacijski algoritam može se primijeniti uzimajući u obzir samo dobrobit aktivnog kupca, dobrobit vlasnika električnog vozila ili oboje te uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterija. Također, optimizacijski algoritam može se primijeniti na energetsku zajednicu s različitim brojem aktivnih kupaca, odnosno komercijalnih zgrada unutar zajednice.

Primjenom optimizacijskog modela u višem sloju kao rezultat se dobivaju varijable odluke za vremenski horizont planiranja od 24 sata u budućnost s vremenskim korakom od 1 sat za proizvoljan broj realizacije slučajne varijable odnosno scenarija. Navedeno omogućava

ispitivanje izvedivosti modela s obzirom na različite scenarije proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Nadalje, s obzirom na odabrane članove funkcije cilja moguće je pojedinačno ispitivanja utjecaja svakog člana zasebno na vrijednost funkcije cilja, odnosno provedbu analize osjetljivosti. Na osnovu prikaza rezultata u disertaciji može se zaključiti da je moguće postići minimizaciju ukupnog društvenog troška, smanjenje angažirane vršne snage i virtualnih troškova degradacije baterija te osiguravanje fleksibilnosti u radu energetske zajednice optimalnim upravljanjem energijom.

Primjenom optimizacijskog modela u nižem sloju kao rezultat se dobivaju varijable odluke za vremenski horizont planiranja od 1 sata u budućnost s vremenskim korakom od 1 minute. Vremenski korak od 1 minute osigurava rezultate simulacije koji odgovaraju upravljanju energijom u gotovo stvarnom vremenu. Nadalje, niži sloj omogućava ispitivanje izvedivosti modela s obzirom na različite moguće scenarije koji mogu nastati neposredno prije provođenja optimizacijskog postupka, kao što je nedolazak na vrijeme i/ili nedolazak vlasnika električnog vozila na punionicu prema unaprijed definiranom rasporedu. Na osnovu prikaza rezultata u disertaciji može se zaključiti da model sustava upravljanja energijom u nižem sloju može kompenzirati pogreške prognoza iz višeg sloja kao i pogreške nastale usrednjavanjem vrijednosti ulaznih podataka odnosno prognoza. Nadalje, pokazalo se da model sustava upravljanja energijom u nižem sloju može kompenzirati nepredviđeno ponašanje vlasnika električnog vozila.

Iz navedenog proizlazi mogućnošću široke primjene razvijenih programskih alata, odnosno optimizacijskog algoritma za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge te unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice u cilju ostvarivanja novih i dopunjavanja postojećih saznanja.

## Literatura

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto protocol. dostupno: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol) (pristup: 7. rujna 2022.), 1997.
- [2] United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris agreement. dostupno: <https://unfccc.int/process-andmeetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (pristup: 7. rujna 2022.), 2015.
- [3] European Commission. Climate action - 2030 climate & energy framework. dostupno: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/> (pristup: 7. rujna 2022.), 2018.
- [4] O. Chen, T.V. García, and Rogé A. Co2 emissions in 2022. International energy agency, 2023.
- [5] European Commission. 2050 energy strategy. dostupno: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (pristup: 8. rujna 2022.), 2019.
- [6] European Commission. Clean energy for all europeans package. dostupno: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/cleanenergy-all-europeansen> (pristup: 8. rujna 2022.), 2019.
- [7] Energy performance of buildings directive 2018/844. dostupno: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildingsdirectiveen> (pristup: 9. rujna 2022.).
- [8] Renewable energy directive (eu) 2018/2001. dostupno: <https://ec.europa.eu/energy/topics/renewableenergy/renewable-energy-directive/overviewen> (pristup: 9. rujna 2022.).

- [9] Energy efficiency directive (eu) 2018/2002. dostupno: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energyefficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiencydirectiveen> (pristup: 9. rujna 2022.).
- [10] Governance of the energy union and climate action (eu) regulation 2018/1999. dostupno: [https://ec.europa.eu/info/energyclimate-change-environment/implementation-eucountries/energy-and-climate-governance-andreporting/national-energy-and-climate-plans\\_en](https://ec.europa.eu/info/energyclimate-change-environment/implementation-eucountries/energy-and-climate-governance-andreporting/national-energy-and-climate-plans_en) (pristup: 12. rujna 2022.).
- [11] Electricity market design. dostupno: [https://energy.ec.europa.eu/topics/marketsand-consumers/market-legislation/electricity-marketdesign\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/marketsand-consumers/market-legislation/electricity-marketdesign_en) (pristup: 12. rujna 2022.).
- [12] Common rules for the internal market for electricity - directive (eu) 2019/944. dostupno: [https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2019.158.01.0125.01.ENG&toc=OJ:L:2019:158:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.158.01.0125.01.ENG&toc=OJ:L:2019:158:TOC) (pristup: 8. rujna 2022.).
- [13] Internal market for electricity – regulation (eu) 2019/943. dostupno: [https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2019.158.01.0125.01.ENG&toc=OJ:L:2019:158:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.158.01.0125.01.ENG&toc=OJ:L:2019:158:TOC) (pristup: 8. rujna. 2022.).
- [14] Risk-preparedness in the electricity sector - regulation (eu) 2019/941. dostupno: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply_en) (pristup: 8. rujna 2022.).
- [15] European union agency for the cooperation of energy regulators - regulation (eu) 2019/942. dostupno: [https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/institutions-and-bodies-profiles/agency-cooperation-energy-regulators-acer\\_en](https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/institutions-and-bodies-profiles/agency-cooperation-energy-regulators-acer_en) (pristup: 8. rujna 2022.).
- [16] Y. Abdelilah, H. Bahar, T. Criswell, P. Bojek, F. Briens, J. Moorhouse, and L.M. Martinez. Renewables 2022. International energy agency, 2022.
- [17] O. Alsauskas, E. Connelly, A. Daou, A. Gouy, M. Huismans, H. Kim, J.B. Le Marois, S. McDonagh, A. Petropoulos, and J. Teter. Global ev outlook 2023. International energy agency, 2023.

- [18] A. Toffler. *The Third Wave*. William Morrow and Company, 1980.
- [19] Directive (eu) 2019/944 of the european parliament and of the council of 5 june 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending directive 2012/27/eu. dostupno: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944> (pristup: 7. rujna 2022.).
- [20] N. Shaukat, B. Khan, S.M. Ali, C.A. Mehmood, J. Khan, U. Farid, M. Majid, S.M. Anwar, M. Jawad, and Z. Ullah. A survey on electric vehicle transportation within smart grid system. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81:1329–1349, 2018.
- [21] M. Žnidarec, D. Šljivac, and D. Topić. Influence of distributed generation from renewable energy sources on distribution network hosting capacity. In *Proc. 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Budapest, Hungary, 21-24 June 2017.
- [22] M.H.J. Bollen and F. Hassan. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, SAD, 2011.
- [23] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac. *Embedded Generation*. The Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [24] M. Čavlović. Izazovi optimiranja utjecaja oie na distribucijsku mrežu. dostupno: [https://www.ieee.hr/\\_download/repository/Cavlovic\\_Izazovi\\_optimiranja\\_utjecaja\\_obnovljivih\\_izvora\\_na\\_distribucijsku\\_mrezu.pdf](https://www.ieee.hr/_download/repository/Cavlovic_Izazovi_optimiranja_utjecaja_obnovljivih_izvora_na_distribucijsku_mrezu.pdf) (pristup: 12. rujna 2022.), 2015.
- [25] D. Karavidović. Aktivna distribucijska mreža kao izazov ustaljenim funkcijama vođenja, zaštite i automatizacije. dostupno: [https://www.ho-cired.hr/images/prezentacije/Karavidovic\\_9.pdf](https://www.ho-cired.hr/images/prezentacije/Karavidovic_9.pdf) (pristup: 12. rujna 2022.), 2016.
- [26] T.U. Solanke, V.K. Ramachandaramurthy, J.Y. Yong, J. Pasupuleti, P. Kasinathan, and A. Rajagopalan. A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles. *J. Energy Storage*, 28:101193, 2020.
- [27] S. Nazari, F. Borrelli, and A. Stefanopoulou. Electric vehicles for smart buildings: A survey on applications, energy management methods, and battery degradation. *Proc. IEEE*, 109:1128–1144, 2021.

- [28] N. Mišljenović, M. Žnidarec, G. Knežević, D. Šljivac, and A. Sumper. A review of energy management systems and organizational structures of prosumers. *Energies*, 16:3179, 2023.
- [29] N. Koltsaklis, I.P. Panapakidis, D. Pozo, and Christoforidis G.C. A prosumer model based on smart home energy management and forecasting techniques. *Energies*, 14:1724, 2021.
- [30] X. Hou, J. Wang, T. Huang, T. Wang, and P. Wang. Smart home energy management optimization method considering energy storage and electric vehicle. *IEEE Access*, 7:144010–144020, 2019.
- [31] H. Zhou, Y. Zhou, J. Hu, G. Yang, D. Xie, Y. Xue, and L. Nordström. Lstm-based energy management for electric vehicle charging in commercial-building prosumers. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 9:1205–1216, 2021.
- [32] Z. Šimić, N. Mišljenović, M. Dubravac, and D. Topić. The impact of different prosumer configurations on achieving savings due to the increase in electricity prices. In *Proc. 4th International Conference on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET)*, Cavtat, Croatia, 24-28 Apr. 2023.
- [33] G. Knežević, N. Mišljenović, N. Radić, and A. Brandis. The optimal use of stationary battery storage in a prosumer power system. In *Proc. 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split / Bol, Croatia, 05-08 July 2022.
- [34] N. Mišljenović, G. Knežević, M. Žnidarec, and M. Dubravac. Optimal utilization of the electric vehicle in a various market approach. In *Proc. International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, 19-21 October 2022.
- [35] N. Mišljenović, G. Knežević, M. Žnidarec, and D. Topić. Optimal utilization of stationary battery storage and electric vehicle in a prosumer power system. In *Proc. 18th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Ljubljana, Slovenia, 13-15 September 2022.
- [36] N. Mišljenović, M. Stanić, G. Knežević, and J. Jakab. Optimal maintenance of the electric vehicle battery storage level in prosumer power network. In *Proc. 30th In-*



- ternational Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2021)*, Osijek, Croatia, 10-10 Dec. 2021.
- [37] F. Giordano, A. Ciocia, P.D. Leo, A. Mazza, F. Spertino, A. Tenconi, and S. Vaschetto. Vehicle-to-home usage scenarios for self-consumption improvement of a residential prosumer with photovoltaic roof. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 56(3):2945–2956, 2020.
- [38] N. Mišljenović, K. Fekete, G. Knežević, and M. Pleskalt. Optimal utilization of electric vehicles in the parking lot of the faculty building to increase social welfare. In *2023 IEEE 6th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Budapest, Hungary, 19-20 Oct. 2023.
- [39] P. Moura, G.K.W. Yu, S. Sarkar, and J. Mohammadi. Linking parking and electricity values to unlock potentials of electric vehicles in portuguese buildings. In *2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, Montreal, QC, Canada, 02-06 Aug. 2020.
- [40] P. Moura, G.K.W. Yu, and J. Mohammadi. Management of electric vehicles as flexibility resource for optimized integration of renewable energy with large buildings. In *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 26-28 Oct. 2020.
- [41] J. Huang, D. Wang, R. Wu, C.S. Lai, C. Xie, Z. Zhao, and L.L. Lai. Optimal operation of smart buildings with stochastic connection of electric vehicles. In *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Piscataway, NJ, USA, 28 Sep. - 01 Oct. 2020.
- [42] G. Bianco, F. Delfino, G. Ferro, M. Robba, and M. Rossi. A hierarchical building management system for temperature’s optimal control and electric vehicles’ integration. *Energy Convers. Manag.*, 17:100339, 2023.
- [43] M.S. Javadi, M. Gough, A.E. Nezhad, S.F. Santos, M. Shafie-khah, and J.P.S. Catalão. Pool trading model within a local energy community considering flexible loads, photovoltaic generation and energy storage systems. *Sustainable Cities and Society*, 79:103747, 2022.

- [44] B. Lokeshgupta and S. Sivasubramani. Multi-objective home energy management with battery energy storage systems. *Sustainable Cities and Society*, 47:101458, 2019.
- [45] S. Viti, A. Lanzini, F.D. Minuto, M. Caldera, and R. Borchiellini. Techno-economic comparison of buildings acting as single-self consumers or as energy community through multiple economic scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 61:102342, 2020.
- [46] L. Li and S. Yu. Optimal management of multi-stakeholder distributed energy systems in low-carbon communities considering demand response resources and carbon tax. *Sustainable Cities and Society*, 61:102230, 2020.
- [47] R. Faia, J. Soares, Z. Vale, and J.M. Corchado. An optimization model for energy community costs minimization considering a local electricity market between prosumers and electric vehicles. *Electronics*, 10:129, 2021.
- [48] P. Mochi, K. Pandya, J. Soares, and Z. Vale. Optimizing power exchange cost considering behavioral intervention in local energy community. *Mathematics*, 11:2367, 2023.
- [49] A. Al-Sorour, M. Fazeli, M. Monfared, and A.A. Fahmy. Investigation of electric vehicles contributions in an optimized peer-to-peer energy trading system. *IEEE Access*, 11:12489–12503, 2023.
- [50] A. Saif, S.K. Khadem, M.F. Conlon, and B. Norton. Impact of distributed energy resources in smart homes and community-based electricity market. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 59:59–69, 2023.
- [51] A. Saif, S. K. Khadem, M. Conlon, and B. Norton. Local electricity market operation in presence of residential energy storage in low voltage distribution network: Role of retail market pricing. *Energy Reports*, 9:5799–5811, 2023.
- [52] N. Mišljenović, G. Knežević, M. Žnidarec, and D. Topić. Optimal state of charge control of ev batteries within energy community considering cost minimization and environmental impact. In *Proc. 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Istanbul, Türkiye, 10-12 Jun. 2024.

- [53] S.M. Ahsan, H.A. Khan, S. Sohaib, and A.M Hashmi. Optimized power dispatch for smart building and electric vehicles with v2v, v2b and v2g operations. *Energies*, 16:4884, 2023.
- [54] J. Iria and F. Soares. Real-time provision of multiple electricity market products by an aggregator of prosumers. *Appl. Energy*, 255:113792, 2019.
- [55] J. Iria, F. Soares, and M. Matos. Optimal bidding strategy for an aggregator of prosumers in energy and secondary reserve markets. *Appl. Energy*, 238:1361–1372, 2019.
- [56] M. Yazdani-Damavandi, N. Neyestani, M. Shafie-khah, J. Contreras, and J.P.S. Catalao. Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach. *IEEE Trans. Power Syst.*, 33:397–411, 2017.
- [57] G. Knežević, M. Maligec, V. Golub, and D. Topić. The optimal utilization of the battery storage for a virtual prosumer participating on a day-ahead market. In *Proc. 2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, 14–16 Oct. 2020.
- [58] S.N. Makhadmeh, A.T. Khader, M.A. Al-Betar, S. Naim, A.K. Abasi, and Z.A.A. Alyasseri. Optimization methods for power scheduling problems in smart home: Survey. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 115:54–65, 2019.
- [59] H. Shareef, M.S. Ahmed, A. Mohamed, and E. Al Hassan. Review on home energy management system considering demand responses, smart technologies, and intelligent controllers. *IEEE Access*, 6:24498–24509, 2018.
- [60] M.A. Putratama, R. Rigo-Mariani, A.D. Mustika, V. Debusschere, A. Pachurka, and Y. Bésanger. A three-stage strategy with settlement for an energy community management under grid constraints. *IEEE Trans. Smart Grid*, 14:1505–1514, 2023.
- [61] M. Di Somma, A. Buonanno, M. Caliano, G. Graditi, G. Piazza, S. Bracco, and F. Del-fino. Stochastic operation optimization of the smart savona campus as an integrated local energy community considering energy costs and carbon emissions. *Energies*, 15:8418, 2022.

- [62] J.M. Zepter, A. Lüth, P. Crespo del Granado, and R. Egging. Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. *Energy Build*, 184:163–176, 2019.
- [63] A. Lüth, J.M. Zepter, P. Crespo del Granado, and R. Egging. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: The role of battery flexibility. *Appl. Energy*, 229:1233–1243, 2018.
- [64] F. Luo, Z.Y. Dong, G. Liang, J. Murata, and Z. Xu. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain. *IEEE Trans.*, 34(5):4097–4108, 2019.
- [65] S.A. Sedgh, H. Aghamohammadloo, H. Khazaei, M. Mehdinejad, and S. Asadi. A new design for the peer-to-peer electricity and gas markets based on robust probabilistic programming. *Energies*, 16(8):3464, 2023.
- [66] M. Žnidarec. *Unaprijedjeni dvoslojni adaptivni sustav upravljanja energijom za kratkoročno planiranje pogona mikromreže*. PhD thesis, Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2022.
- [67] Q. Zhong, S. Buckley, A. Vassallo, and Sun Y. Energy cost minimization through optimization of ev, home and workplace battery storage. *Sci. China Technol. Sci.*, 61:761–773, 2018.
- [68] P. Olivella-Rosell, F. Rullan, P. Lloret-Gallego, E. Prieto-Araujo, R. Ferrer-San-José, S. Barja-Martinez, S. Bjarghov, V. Lakshmanan, A. Hentunen, J. Forsström, S.Ø. Ottesen, R. Villafafila-Robles, and A. Sumper. Centralised and distributed optimization for aggregated flexibility services provision. *IEEE Trans. Smart Grid*, 11:3257–3269, 2020.
- [69] L. Zou, M.S. Munir, K. Kim, and C.S. Hong. Day-ahead energy sharing schedule for the p2p prosumer community using lstm and swarm intelligence. In *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Barcelona, Spain, 07-10 Jan. 2020.
- [70] Z. Rehman, M. Fatima, A. Khan, s. Shah, R.W. Ahmad, A. Din, and A. Rehman. Energy optimization in a smart community grid system using genetic algorithm. *Int. J. Commun. Syst.*, 36(12):e4265, 2023.

- [71] C.K. Nayak, K. Kasturi, and M.R. Nayak. Economical management of microgrid for optimal participation in electricity market. *J. Energy Storage*, 21:657–664, 2019.
- [72] M. Mahmoud and S.B. Slama. Peer-to-peer energy trading case study using an ai-powered community energy management system. *Appl. Sci.*, 13(13):7838, 2023.
- [73] G. Knežević. *Optimalna zajednička ponuda na tržištu električne energije za sustav hidroelektrana i vjetroelektrana*. PhD thesis, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2013.
- [74] Hrvatska burza električne energije (cropex). dostupno: <https://www.cropex.hr/hr/> (pristup: 28. veljače 2024.).
- [75] M.F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S.M. Muyeen, K. Techato, and J.M. Guerrero. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access*, 8:19410–19432, 2020.
- [76] S.F. Rafique and Z. Jianhua. Energy management system, generation and demand predictors: a review. *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, 12:519–530, 2018.
- [77] U.K. Das, K.S. Tey, M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, M.Y.I. Idris, W. Van Deventer, B. Horan, and A. Stojcevski. Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81:912–928, 2018.
- [78] M. Abdullah Al, S. Md, M. Naeem, H.S. Md Samiul, D Debopriya Roy, and H. Eklas. A comprehensive review of the load forecasting techniques using single and hybrid predictive models. *IEEE Access*, 8:134911 – 134939, 2020.
- [79] I.S. Jahan, V. Snasel, and S. Misak. Intelligent systems for power load forecasting: A study review. *Energies*, 13(22):6105, 2020.
- [80] A. Pourdaryaei, M. Mohammadi, M. Karimi, H. Mokhlis, H.A. Illias, S.H.A. Kaboli, and S. Ahmad. Recent development in electricity price forecasting based on computational intelligence techniques in deregulated power market. *Energies*, 14(19):6104, 2021.
- [81] E. Xydas, C. Marmaras, L.M. Cipcigan, N. Jenkins, S. Carroll, and M. Barker. A data-driven approach for characterising the charging demand of electric vehicles: A uk case study. *Appl. Energy*, 162:763–771, 2016.

- [82] C. Diaz, F. Ruiz, and D. Patino. Smart charge of an electric vehicles station: A model predictive control approach. In *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Copenhagen, Denmark, 21-24 Aug. 2018.
- [83] H. Pandžić and V. Bobanac. An accurate charging model of battery energy storage. *IEEE Trans. Power Syst.*, 34:1416–1426, 2019.
- [84] A. Hentunen, J. Forsströmm, and V. Mukherjee. Smart system of renewable energy storage based on INtegrated EVs and bAtteries to empower mobile, Distributed and centralised Energy storage in the distribution grid - INVADE D6.5 Advanced battery techno-economics tool. Horizon 2020 project deliverable, 2018.
- [85] H. Gong and Dan M. Ionel. Optimization of aggregated ev power in residential communities with smart homes. In *Proc. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA, 23-26 June 2020.
- [86] M. Žnidarec, D. Šljivac, G. Knežević, and H. Pandžić. Double-layer microgrid energy management system for strategic short-term operation scheduling. *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, 157:109816, 2024.
- [87] C. Zhao, X. Li, and Y. Yao. Quality analysis of battery degradation models with real battery aging experiment data. In *Proc. 2023 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 13-14 Feb. 2023.
- [88] B. Xu, J. Zhao, T. Zheng, E. Litvinov, and D.S. Kirschen. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets. *IEEE Trans. Power Syst.*, 33:2248–2259, 2018.
- [89] H. Bašić, V. Bobanac, and H. Pandžić. Determination of lithium-ion battery capacity for practical applications. *Batteries*, 9:459, 2023.
- [90] D. Borge-Diez, D. Icaza, E. Açıkkalp, and H. Amaris. Combined vehicle to building (v2b) and vehicle to home (v2h) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*, 237:121608, 2021.
- [91] M. Gilleran, E. Bonnema, J. Woods, P. Mishra, I. Doebber, C. Hunter, M. Mitchell, and M. Mann. Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings. *Energy Convers. Manag.*, 4:100062, 2021.

- [92] N. Mišljenović, M. Žnidarec, G. Knežević, and D. Topić. Improved two-stage energy community optimization model considering stochastic behaviour of input data. *Electr Eng*, page 28, 2024.
- [93] Na sunčanoj strani - energetske zajednice građana i zajednice oie. dostupno: <https://nasuncanojstrani.hr/gradanska-energija/energetske-zajednice/> (pristup: 12. ožujka 2024.).
- [94] My energy community - energetske zajednice. dostupno: <https://www.myenergycommunity.eu/> (pristup: 14 ožujka 2024.).
- [95] Directive (eu) 2018/2001 of the european parliament and of the council of 11 december 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. dostupno: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC) (pristup: 14. ožujka 2024.).
- [96] Narodne novine br. 111/2021. Zakon o tržištu električne energije. dostupno: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_10\\_111\\_1940.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_10_111_1940.html) (pristup: 7. veljače 2024.), 2021.
- [97] Narodne novine br. 83/2023. Zakon o izmjenama zakona o tržištu električne energije. dostupno: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023\\_07\\_83\\_1295.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_07_83_1295.html) (pristup: 7. veljače 2024.), 2023.
- [98] Hrvatska energetska regulatorna agencija (hera). dostupno: <https://www.hera.hr/hr/html/index.html> (pristup: 14. ožujka 2024.).
- [99] I. Pavić and H. Pandžić. *Primjene spremnika energije*. Zavod za visoki napon i energetiku, FER, 2021.
- [100] GAMS Development Corporation. Gams, mixed integer nonlinear programming (minlp). dostupno: [https://www.gams.com/latest/docs/UG\\_ModelSolve.html#UG\\_ModelSolve\\_ModelClassificationOfModels\\_MINLP](https://www.gams.com/latest/docs/UG_ModelSolve.html#UG_ModelSolve_ModelClassificationOfModels_MINLP) (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [101] GAMS Development Corporation. Gams, stochastic programming. dostupno: [https://www.gams.com/latest/docs/UG\\_EMP\\_SP.html#UG\\_EMP\\_SPStages](https://www.gams.com/latest/docs/UG_EMP_SP.html#UG_EMP_SPStages) (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.

- [102] GAMS Development Corporation. Gams, general algebraic modeling system. dostupno: <https://www.gams.com/> (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [103] GAMS Development Corporation. Gams, lindo and lindoglobal. dostupno: [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_LINDO.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_LINDO.html) (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [104] GAMS Development Corporation. Gams, extended mathematical programming (emp). dostupno: [https://www.gams.com/latest/docs/UG\\_EMP.html](https://www.gams.com/latest/docs/UG_EMP.html) (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [105] MATLAB. Matlab, programski jezik visoke razine i interaktivna okolina za numeričko i matricno računanje, te za vizualizaciju i programiranje. dostupno: <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html> (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [106] D. Zoričić, G. Knežević, M. Miletić, D. Dolinar, and D.M. Sprčić. Integrated risk analysis of aggregators: Policy implications for the development of the competitive aggregator industry. *Energies*, 15(14):5076, 2022.
- [107] K. Deb. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Hoboken, New York, SAD, 2001.
- [108] A. Alarcon-Rodriguez, G. Ault, and S. Galloway. Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5):1353–1366, 2010.
- [109] N. Li, L. Chen, and S.H. Low. Optimal demand response based on utility maximization in power networks. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 24-28 July 2011.
- [110] M.H. Nehrir, R. Jia, D.A. Pierre, and D.J. Hammerstrom. Power management of aggregate electric water heater loads by voltage control. In *Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 24-28 June 2007.
- [111] Hrvatska elektroprivreda d.d. (hep d.d.). dostupno: <https://www.hep.hr/> (pristup: 14. ožujka 2024.).
- [112] HEP-ELEKTRA d.o.o., Hrvatska elektroprivreda-Elektra. Tarifni modeli - kućanstvo dostupno: <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifni-modeli/1577> (pristup: 8. travnja 2024.), 2024.



- [113] HEP-ELEKTRA d.o.o., Hrvatska elektroprivreda-Elektra. Tarifni modeli - poduzetništvo dostupno: <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifni-modeli-1548/1548> (pristup: 8. travnja 2024.), 2024.
- [114] Kupac s vlastitom proizvodnjom - kategorija kućanstvo. dostupno: <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom-kategorija-kucanstvo/1545> (pristup: 14. ožujka 2024.).
- [115] Zajamčeni otkup električne energije – kategorija poduzetništvo. dostupno: <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/zajamceni-otkup-elektricne-energije-kategorija-poduzetnistvo/1647> (pristup: 14. ožujka 2024.).
- [116] Kupac korisnik postrojenja za samoopskrbu – ustanove – kategorija poduzetništvo. dostupno: <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/kupac-korisnik-postrojenja-za-samoopskrbu-ustanove/1683> (pristup: 21. kolovoza 2024.).
- [117] M. Žnidarec, D. Šljivac, D. Došen, and B.N. Smaragdakis. Performance evaluation of simple pv microgrid energy management system. In *Proc. 2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, 14-16 Oct. 2020.
- [118] Z. Šimić, D. Topić, I. Crnogorac, and G. Knežević. Method for sizing of a pv system for family home using economic indicators. *Energies*, 14:4529, 2021.
- [119] N. Mišljenović, Z. Šimić, D. Topić, and G. Knežević. An algorithm for the optimal sizing of the pv system for prosumers based on economic indicators and the input data time step. *Solar Energy*, 262:111882, 2023.
- [120] M.A.M. Ramli and H.R.E.H. Boucekara. Estimation of solar radiation on pv panel surface with optimum tilt angle using vortex search algorithm. *IET Renew. Power Gener.*, 12:1138–1145, 2018.
- [121] M.A.M. Ramli, H.R.E.H. Boucekara, M.S. Shahriar, A.H. Milyani, and M. Rawa. Maximization of solar radiation on pv panels with optimal intervals and tilt angle: Case study of yanbu, saudi arabia. *Front. Energy*, 9:753998, 2021.

- [122] SMA Solar Technology AG. *Efficiency and Derating*, 11 2022. Rev. 5.1.
- [123] Rossum G. Python, high-level general-purpose programming language. dostupno: <https://www.python.org/> (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [124] Charles, F.J. and Gerhard, V. Pypi - pwlf 2.2.1., piecewise linear functions to data. dostupno: <https://pypi.org/project/pwlf/> (pristup: 10. travnja 2024.), 2019.
- [125] N. Mišljenović, G. Knežević, D. Topić and M. Žnidarec. Pilot anketni upitnik istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila. Google Forms, Mar. 2023.
- [126] N. Mišljenović, M. Žnidarec, G. Knežević, and D. Topić. Electric vehicles as flexible assets for households and system operators: Survey results. In *Proc. 2024 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, 16-18 Oct. 2024.
- [127] Narodne novine br. 74/2018. Mrežna pravila distribucijskog sustava. dostupno: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_08\\_74\\_1539.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html) (pristup: 7. veljače 2024.), 2018.
- [128] BISOL Group, d.o.o. *PV module specification*, 9 2011. -.
- [129] SMA Solar Technology AG. *SMA Home Storage*, - - -.
- [130] Victron Energy B.V. *Datasheet-MultiPlus-inverter-charger-800VA-5kVA-EN*, - - -.
- [131] BloombergNEF (BNEF). Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split. dostupno: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> (pristup: 10. travnja 2024.), 2023.
- [132] HRVATSKA NARODNA BANKA (HNB). Tečajna lista. dostupno: <https://www.hnb.hr/statistika/statisticki-podaci/financijski-sektor/sredisnja-banka-hnb/devizni-tecajevi/tecajna-lista-za-klijente-hnb> (pristup: 2. travnja 2024.).

- [133] The Engineering ToolBox. Potrošnja tople vode po korisniku dostupno: [https://www.engineeringtoolbox.com/hot-water-consumption-person-d\\_91.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hot-water-consumption-person-d_91.html) (pristup: 8. travnja 2024.), 2023.
- [134] Laboratorij za obnovljive izvore energije FERIT Osijek. dostupno: <https://reslab.ferit.hr/> (pristup: 2. svibnja 2024.).
- [135] Valentin Software. Pv\*sol, the design and simulation software for photovoltaic systems. dostupno: <https://valentin-software.com/> (pristup: 2. svibnja 2024.), 2023.

## Popis slika

2.1. Primjer sustava upravljanja energijom aktivnog kupca . . . . .	14
2.2. Glavni element optimizacijskog modela sustava upravljanja energijom unutar energetske zajednice . . . . .	18
4.1. Primjer energetske zajednice s prikazom informacijskih i energetske tokova .	40
4.2. Predloženi pristup za razvoj unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice . .	43
4.3. Predloženi dvoslojni stohastički pristup za realizaciju višeg sloja unaprijeđenog modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice . . . . .	47
4.4. Predloženi algoritam implementacije strategije pomičnog horizonta u cilju rješavanja optimizacijskog problema nižeg sloja kroz cijeli vremenski horizont planiranja iz višeg sloja . . . . .	49
4.5. Algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu vehicle-to-building usluge . . . . .	51
5.1. Profil potrošnje električne energije vremenski odgodivog trošila . . . . .	68
5.2. Dinamički upravljiva trošila . . . . .	70
5.3. Statički upravljiva trošila . . . . .	72
5.4. Sunčevo zračenje na površinu pod kutom . . . . .	83
5.5. Primjeri profila izravnog i difuznog sunčevog zračenja na ravnu površinu za lokaciju Osijek na dan 26.7.2020. . . . .	84
5.6. Karakteristika $\Delta SOE^{ch}/SOE$ energetskeg modela punjenja baterije . . . . .	88
5.7. Karakteristika $\Delta SOE^{dch}/SOE$ energetskeg modela pražnjenja baterije . . . .	89
5.8. Primjer nelinearne karakteristike učinkovitosti pretvarača ovisna o snazi . . . .	100
5.9. Primjer nelinearne karakteristike učinkovitosti baterije ovisna o snazi . . . .	101

5.10. Primjer linearne karakteristike učinkovitosti pretvarača ovisna o snazi . . . . .	102
5.11. Primjer linearne karakteristike učinkovitosti baterije ovisna o snazi . . . . .	103
5.12. Primjer mapiranja vrijednosti s izmjenične (AC) strane na istosmjernu (DC) stranu . . . . .	104
5.13. Linearni segmenti i koordinatne točke linearne aproksimacije . . . . .	105
7.1. Karakteristika $\Delta SOE/SOE$ energetskog modela punjenja i pražnjenja litij-željezo-fosfatne (LiFePO4) baterije kapaciteta 160 Ah . . . . .	125
7.2. Promjena stanja napunjenosti litij-željezo-fosfatne (LiFePO4) baterije kapaciteta 160 Ah . . . . .	126
7.3. Karakteristika $\Delta SOE/SOE$ energetskog modela punjenja i pražnjenja olovne gel (Pb GEL) baterije kapaciteta 110 Ah . . . . .	127
7.4. Promjena stanja napunjenosti olovne gel (Pb GEL) baterije kapaciteta 110 Ah	128
7.5. Karakteristika $\Delta SOE^{ch}/SOE$ baterijske ćelije LG 18650HG2 kapaciteta 3000 mAh . . . . .	129
7.6. Karakteristika $\Delta SOE^{dch}/SOE$ baterijske ćelije LG 18650HG2 kapaciteta 3000 mAh . . . . .	130
7.7. Karakteristika $\Delta SOE/SOE$ baterije električnog automobila Hyundai Ioniq kapaciteta 28 kWh . . . . .	131
7.8. Profil potrošnje električne energije vremenski odgodiva trošila - perilica suđa	134
7.9. Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na satnoj razini . . . . .	137
7.10. Profili intenziteta sunčevog zračenja na satnoj razini . . . . .	138
7.11. Osnovi profili snage aktivnih kupaca prilikom preuzimanja električne energije iz mreže na minutnoj razini . . . . .	139
7.12. Profili intenziteta sunčevog zračenja na minutnoj razini . . . . .	140
7.13. Profil vanjske temperature na satnoj razini . . . . .	141
7.14. Cijene električne energije za primjenu V2B usluge . . . . .	143
7.15. Cijene električne energije za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu	144
7.16. Ukupni trošak aktivnih kupca (zgrada) za primjenu V2B usluge . . . . .	145
7.17. Ukupni trošak aktivnih kupca (zgrada) za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu . . . . .	146
7.18. Ukupni trošak vlasnika električnih vozila za primjenu V2B usluge . . . . .	147

7.19. Ukupni trošak vlasnika električnih vozila za primjenu V2B usluge u trodimenzionalnom prikazu . . . . .	148
7.20. Cijene električne energije za primjenu V2B usluge uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnih vozila . . . . .	149
7.21. Cijene električne energije za primjenu V2B usluge uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnih vozila u trodimenzionalnom prikazu . . . . .	150
7.22. Konvergencija ukupnog društvenog troška . . . . .	153
7.23. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju . . . . .	154
7.24. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju . . . . .	154
7.25. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju . . . . .	155
7.26. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju . . . . .	156
7.27. Unutarnje temperature i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju . . . . .	158
7.28. Unutarnje temperature i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju . . . . .	159
7.29. Temperatura tople vode i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje temperature vode kod 1. aktivnog kupca u 1. scenariju . . . . .	160
7.30. Temperatura tople vode i ukupna angažirana snaga potrebna za održavanje temperature vode kod 1. aktivnog kupca u 15. scenariju . . . . .	161
7.31. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca ne uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila . . . . .	162
7.32. Stanja napunjenosti i ukupne angažirane snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca uzimajući u obzir virtualne troškove degradacije baterije električnog vozila . . . . .	163
7.33. Uvezena električna energija iz mreže od strane 3. aktivnog kupca bez i sa zahtjevom za smanjenje snage . . . . .	164
7.34. Stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca	167

7.35. Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca . . . . .	168
7.36. Uvezena električna energija iz mreže od strane 1. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutarдневно . . . . .	169
7.37. Uvezena električna energija iz mreže od strane 2. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutarдневно . . . . .	170
7.38. Uvezena električna energija iz mreže od strane 3. aktivnog kupca za dan unaprijed i unutarдневно . . . . .	171
7.39. Izvezena električna energija u mrežu od strane aktivnih kupaca unutarдневно	173
7.40. Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za osnovni slučaj sa 7 električnih vozila priključenih na punionice . . . . .	176
7.41. Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj sa 8 električnih vozila priključenih na punionice . . . . .	177
7.42. Stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj sa 6 električnih vozila priključenih na punionice . . . . .	178
P.1. Dob korisnika električnih vozila . . . . .	208
P.2. Broj članova kućanstva korisnika električnih vozila . . . . .	208
P.3. Tip stambene jedinice korisnika električnih vozila . . . . .	209
P.4. Tip mjesta stanovanja korisnika električnih vozila . . . . .	209
P.5. Tip električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	210
P.6. Vlasništvo električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	210
P.7. Način korištenja električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	211
P.8. Kapacitet baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	211
P.9. Najčešći način punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće	212
P.10. Najčešće mjesto punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće	212
P.11. Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . .	213
P.12. Prosječno dnevno korištenje električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . .	213
P.13. Dani i doba dana najčešćeg punjenje električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	214
P.14. Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	215
P.15. Prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	215

P.16. Ovisnost financijske naknade o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	216
P.17. Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	216
P.18. Interesiranje za primjenu naprednih usluga u kategoriji obiteljske kuće . . . . .	217
P.19. Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu regulacijom unutarnje temperature prostora . . . . .	217
P.20. Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu regulacijom temperature tople vode . . . . .	218
P.21. Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom kuhanja . . . . .	218
P.22. Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom pranja rublja . . . . .	219
P.23. Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom pranja posuđa . . . . .	219
P.24. Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u fotonaponsku elektranu . . . . .	220
P.25. Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u sustav pohrane energije . . . . .	220
P.26. Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u sustav za upravljanje električnom energijom . . . . .	221
P.27. Spremnost korisnika električnih vozila na prihvatanje novih modela naplate električne energije . . . . .	221
P.28. Tip električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	222
P.29. Vlasništvo električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	222
P.30. Način korištenja električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	223
P.31. Kapacitet baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	223
P.32. Najčešći način punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade	224
P.33. Najčešće mjesto punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	224
P.34. Problemi prilikom punjenja baterije električnog vozila na javnim punionicama	225
P.35. Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji stambene zgrade .	225



P.36. Prosječno dnevno korištenje električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	226
P.37. Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	226
P.38. Prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	227
P.39. Ovisnost financijske naknade o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	228
P.40. Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini u kategoriji stambene zgrade . . . . .	228
P.41. Dani i doba dana najčešćeg punjenje električnog vozila u kategoriji stambene zgrade . . . . .	229
P.42. Interesiranje za primjenu naprednih usluga u kategoriji stambene zgrade . . . . .	230

## Popis tablica

7.1. Ulazni podaci aktivnih kupaca . . . . .	116
7.2. Cijene električne energije . . . . .	117
7.3. Maksimalna snaga razmijene električne energije s mrežom i lokalnim tržištem	118
7.4. Ulazni podaci fotonaponskih modula [128] . . . . .	119
7.5. Ulazni podaci položaja fotonaponskih modula . . . . .	119
7.6. Učinkovitost ovisna o opterećenju za inverter SHP 100-20 [122] . . . . .	120
7.7. Ulazni podaci za baterijski sustav pohrane energije . . . . .	120
7.8. Učinkovitost ovisna o opterećenju za pretvarač energetske elektronike SBS3.7- 10 [122] . . . . .	121
7.9. Ulazni podaci baterije električnog vozila . . . . .	121
7.10. Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za bateriju LiFePo4 . . . . .	122
7.11. Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za baterijsku ćeliju 18650 SONY (US18650VTC5) . . . . .	122
7.12. Povratna učinkovitost ovisna o opterećenju za bateriju LiFePo4 . . . . .	123
7.13. Ukupna učinkovitost punjenja baterijskog sustava pohrane ovisna o opterećenju	124
7.14. Koordinatne točke linearnih karakteristika $\Delta SOE^{ch}/SOE$ baterije električnog vozila . . . . .	132
7.15. Koordinatne točke linearnih karakteristika $\Delta SOE^{ch}/SOE$ baterije sustava po- hrane energije . . . . .	132
7.16. Koordinatne točke linearnih karakteristika $\Delta SOE^{dch}/SOE$ baterije sustava pohrane energije . . . . .	132
7.17. Koordinatne točke linearnih karakteristika $\Phi(\delta) = 5.24 \cdot 10^{-4}$ virtualnog troška cikličkog starenja baterije . . . . .	133
7.18. Ulazni podaci za dinamički upravljiva trošila . . . . .	134
7.19. Ulazni podaci za statički upravljiva trošila . . . . .	134

7.20. Potrošnja i potrebna dnevna količina tople vode po osobi [133] . . . . .	135
7.21. Ulazni parametri za električne bojlere [110] . . . . .	135
7.22. Parametri za određivanje temperature tople vode u električnom bojleru unutar zgrade . . . . .	136
7.23. Ukupni društveni troškovi pri različitim vrijednostima realizacije slučajne varijable . . . . .	152
7.24. Intervali profila vremenski odgodivih trošila . . . . .	157
7.25. Postignuti troškovi optimizacijskog modela u višem i nižem sloju . . . . .	172
7.26. Količine električne energije razmijenjene na lokalnom tržištu . . . . .	174
7.26. (Nastavak)Količine električne energije razmijenjene na lokalnom tržištu . . .	175
P.1. Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca . . . . .	230
P.2. Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 2. aktivnog kupca . . . . .	231
P.3. Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 3. aktivnog kupca . . . . .	232
P.4. Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 1. aktivnog kupca . . . . .	233
P.5. Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 2. aktivnog kupca . . . . .	234
P.6. Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 3. aktivnog kupca . . . . .	235
P.7. Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca . . . . .	236
P.8. Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 2. aktivnog kupca . . . . .	237
P.9. Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 3. aktivnog kupca . . . . .	238
P.10. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca	239
P.11. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca	240
P.12. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 3. aktivnog kupca	241

P.13. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 8 električnih vozila spojenih na punionice . . . . .	242
P.14. Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 6 električnih vozila spojenih na punionice . . . . .	243

## Popis kratica

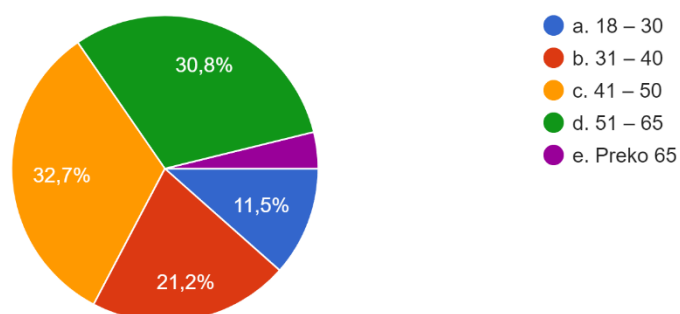
- V2G - razmjena električne energije između električnih vozila i mreže (engl. *Vehicle-To-Grid*),
- V2B - razmjena električne energije između električnih vozila i (komercijalne) zgrade (engl. *Vehicle-To-Building*),
- P2V - razmjena električne energije između članova (aktivnih kupaca) i električnih vozila (engl. *Prosumer-To-Vehicle*),
- V2H - razmjena električne energije između električnih vozila i kućanstva (engl. *Vehicle-To-Home*),
- RES - obnovljivi izvori energije (engl. *Renewable Energy Sources*),
- EV - električno vozilo (engl. *Electric Vehicle*),
- HEV - hibridno vozilo (engl. *Hybrid Vehicle*),
- ACER - Agencija Europske unije za suradnju energetske regulatora (engl. *European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators*),
- DG - distribuirana proizvodnja (engl. *Distributed Generation*),
- DRP - programi odgovora na potražnju (engl. *Demand Response Programs*),
- HEMS - sustav upravljanja energijom kućanstva (engl. *Home Energy Management Systems*),
- SM - pametna kuća (engl. *Smart Home*),
- EMC - kontroler za upravljanje energijom (engl. *Energy Management Controller*)
- PSPSH - problem upravljanja energijom kućanstva (engl. *Power Scheduling Problem in Smart Home*),
- CROPEX - Hrvatska burza električne energije,

- SVM - metoda potpornih vektora (engl. *Support Vector Regression*),
- ANN - umjetne neuronske mreže (engl. *Artificial Neural Network*),
- BESS - baterijski sustav za pohranu energije (engl. *Battery Energy Storage System*),
- SOE - stanje napunjenosti baterije (engl. *State of Energy*),
- DOD - dubina pražnjenja baterije (engl. *Depth of Discharge*),
- CV - konstantni napon (engl. *Constant-Voltage*),
- CC - konstantna struja (engl. *Constant-Current*),
- ECM - energetska model punjenja (engl. *Energy Charging Model*),
- CC/CV- konstantna struja/konstantni napon (engl. *Constant Current/Constant Voltage*),
- MILP - mješovito cijelobrojno linearno programiranje (engl. *Mixed-Integer Linear Programming*),
- MINLP- mješovito cijelobrojno nelinearno programiranje (engl. *Mixed Integer Nonlinear Programming*),
- EMP - prošireno matematičko programiranje (engl. *Extended Mathematical Programming*),
- SRI - društveno odgovorno ulaganje (engl. *Socially Responsible Investing*),
- ESG - okolišno, društveno i korporativno upravljanje (engl. *Environmental, Social, and Corporate Governance*),
- HVAC - sustavi grijanja, ventilacije i klimatizacije (engl. *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*),
- SOS2 - varijable odluke koje pripadaju *Special Order Sets of type 2* varijablama,
- NT - niska tarifa,
- VT - visoka tarifa,
- OIE - obnovljivi izvori energije.

## Prilozi

Molim Vas navedite Vašu dob:

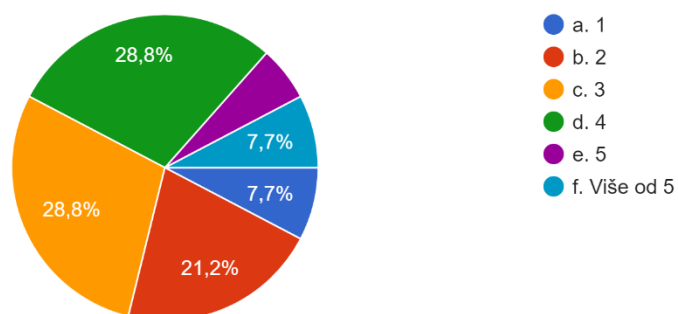
52 odgovora



**Slika P.1:** Dob korisnika električnih vozila

Molim Vas navedite broj članova Vašeg kućanstva:

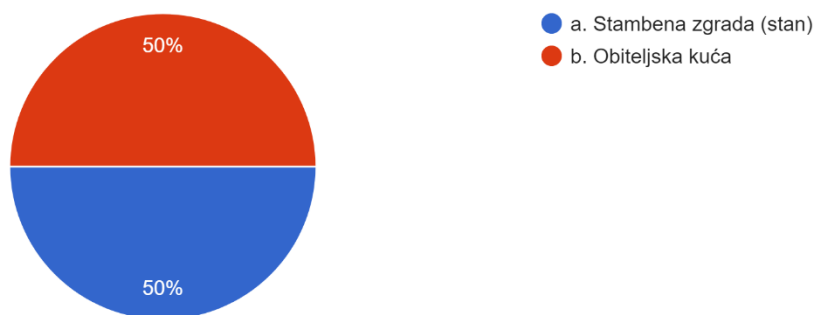
52 odgovora



**Slika P.2:** Broj članova kućanstva korisnika električnih vozila

Molim Vas navedite tip Vaše stambene jedinice:

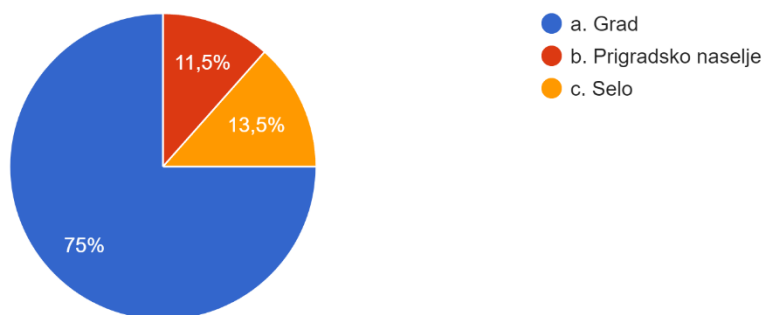
52 odgovora



**Slika P.3:** *Tip stambene jedinice korisnika električnih vozila*

Molim Vas navedite gdje se nalazi Vaše kućanstvo:

52 odgovora

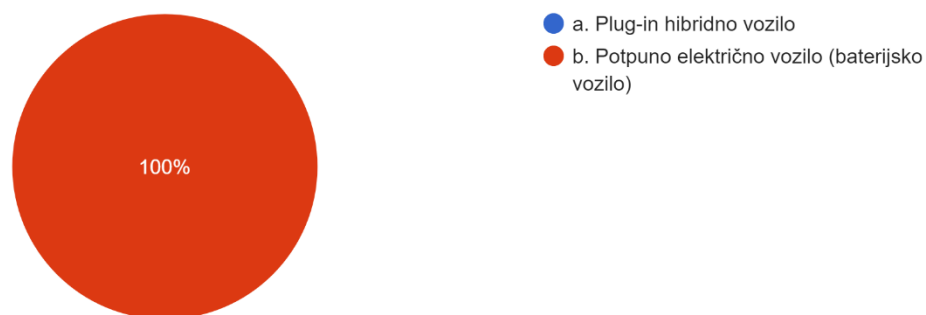


**Slika P.4:** *Tip mjesta stanovanja korisnika električnih vozila*



Molim Vas navedite tip Vašeg električnog vozila:

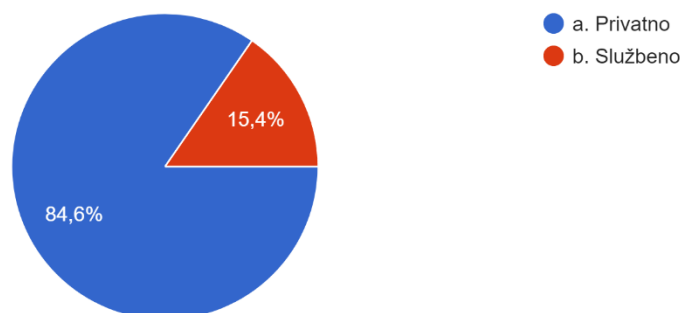
26 odgovora



**Slika P.5:** Tip električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Molim Vas navedite vlasništvo električnog vozila koje koristite:

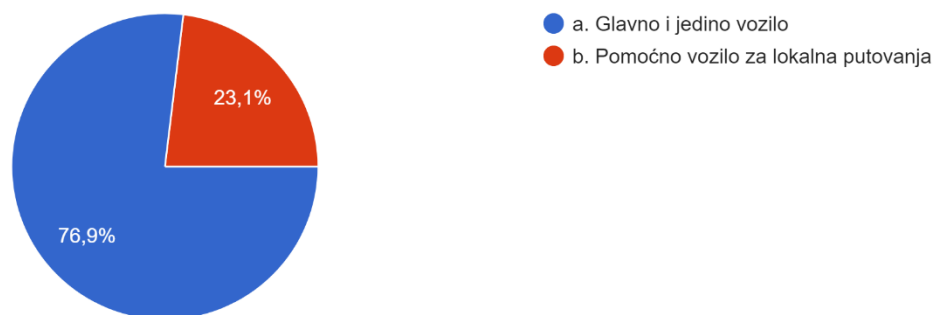
26 odgovora



**Slika P.6:** Vlasništvo električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Na koji način koristite Vaše električno vozilo?

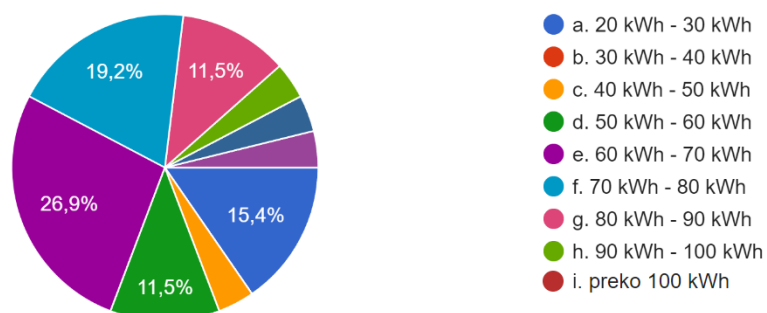
26 odgovora



**Slika P.7:** Način korištenja električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Koliki je kapacitet baterije Vašeg električnog vozila u kWh (ako Vam nije poznat kapacitet baterije unesite koji tip i marku električnog vozila koristite)?

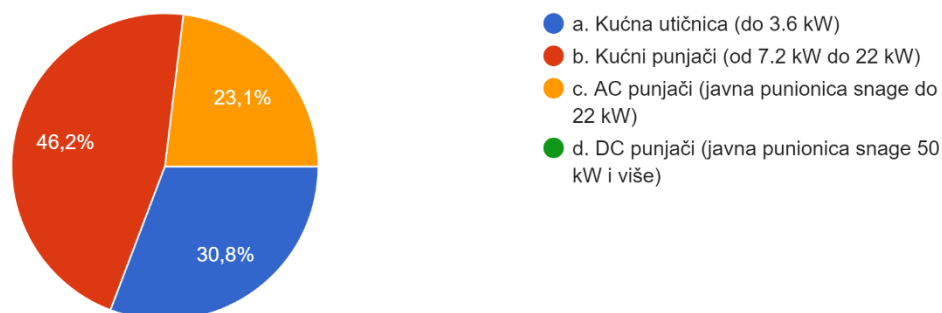
26 odgovora



**Slika P.8:** Kapacitet baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Na koji način najčešće punite Vaše električno vozilo?

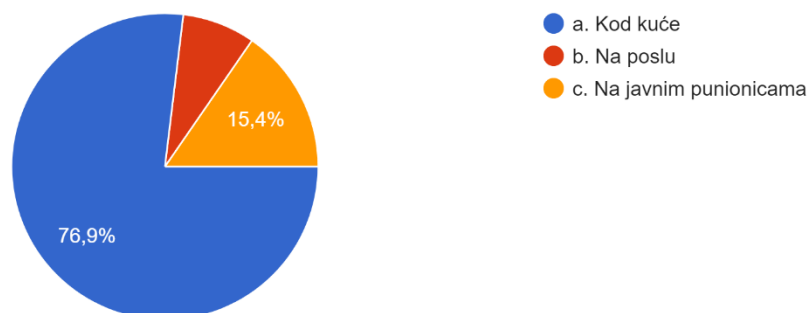
26 odgovora



**Slika P.9:** Najčešći način punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Gdje najčešće punite Vaše električno vozilo?

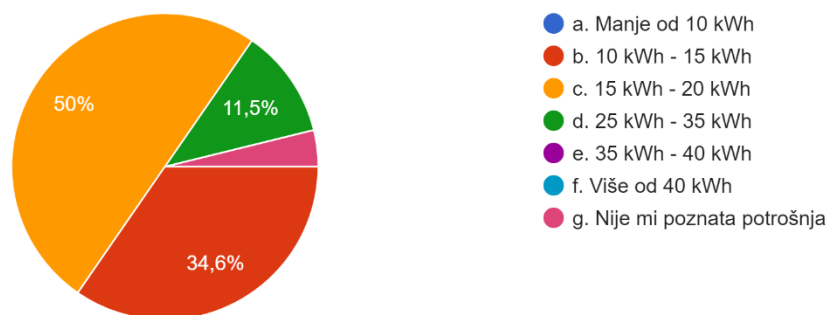
26 odgovora



**Slika P.10:** Najčešće mjesto punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

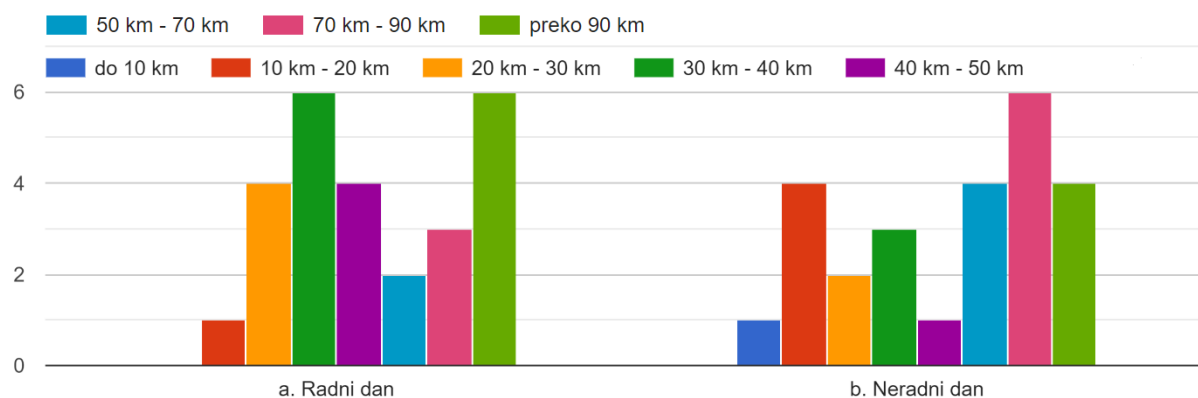
Kolika je stvarna prosječna potrošnja Vašeg električnog vozila na prijeđenih 100 km u kWh?

26 odgovora



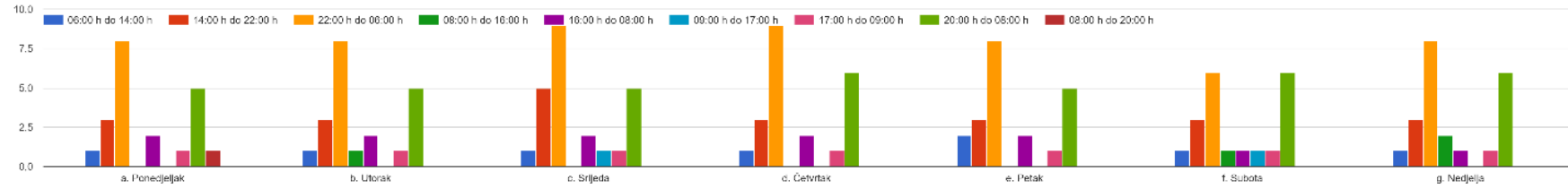
Slika P.11: Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Koliko prosječno dnevno prelazite kilometara Vašim električnim vozilom?



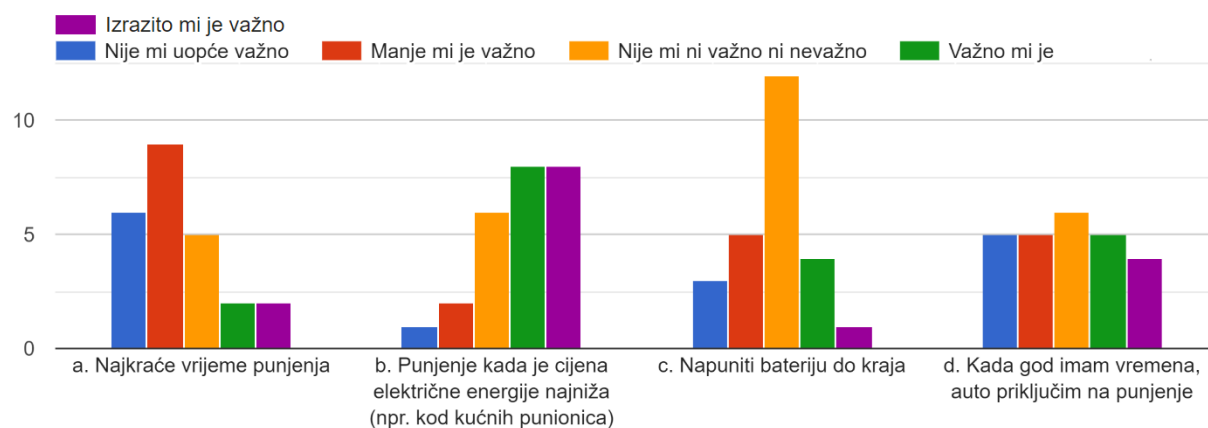
Slika P.12: Prosječno dnevno korištenje električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Kojim danima i u koje doba dana najčešće puniti Vaše električno vozilo na kućnoj punionici (moguće odabir višestrukog odgovora)?



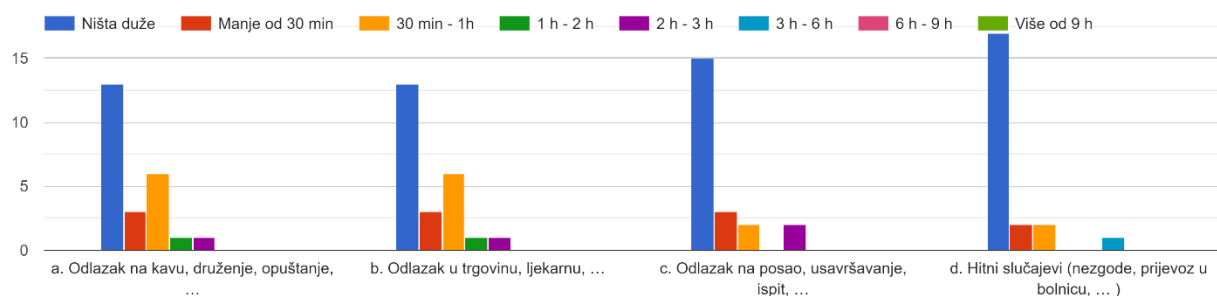
Slika P.13: Dani i doba dana najčešćeg punjenje električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Prilikom punjenja Vašeg električnog vozila na kućnoj punionici navedite koliko Vam vam je važno sljedeće:



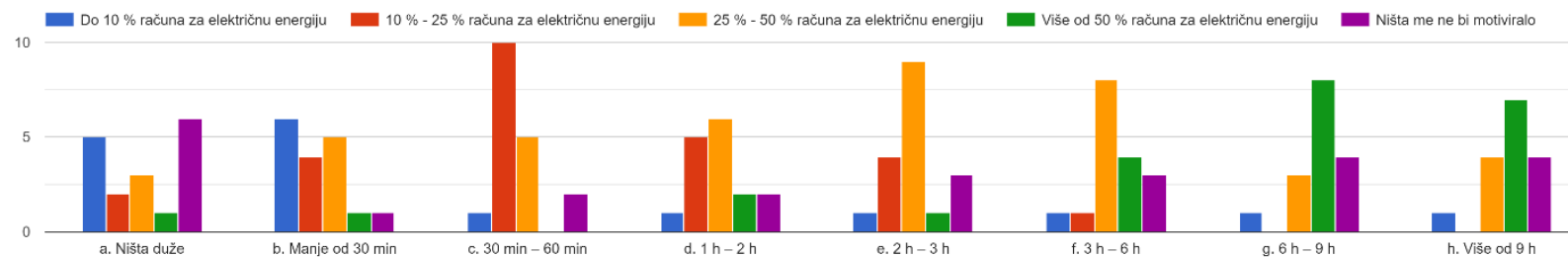
**Slika P.14:** *Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće*

Koliko ste spremni ostaviti Vaše električno vozilo duže na kućnoj punionici ako nije napunjeno do željenog iznosa u trenutku planiranog preuzimanja u specifičnim slučajevima?



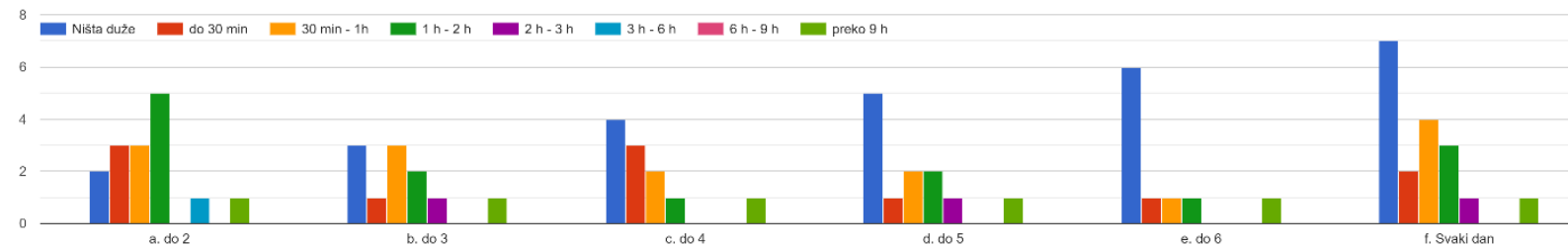
**Slika P.15:** *Prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće*

Ukoliko bi Vam se ponudila određena financijska naknada, koliko ste spremni po jednom punjenju ostaviti duže Vaše električno vozilo na kućnoj punionici od planiranoga za određenu financijsku naknadu na mjesečnoj razini?



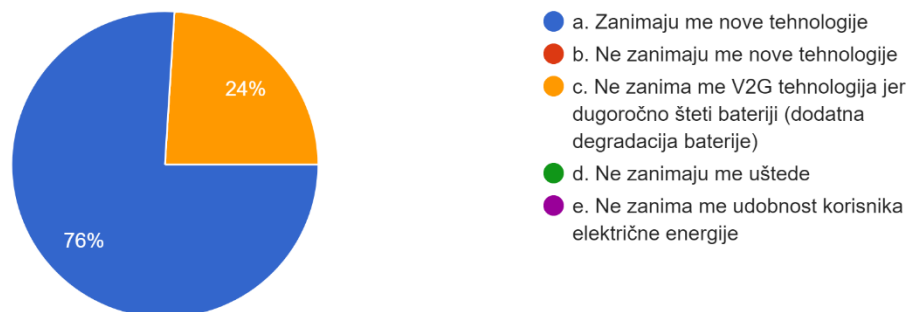
**Slika P.16:** Ovisnost financijske naknade o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila u kategoriji obiteljske kuće

Koliko puta tjedno ste spremni prihvatiti da Vam punjenje električnog vozila traje dulje od planiranoga na kućnoj punionici?



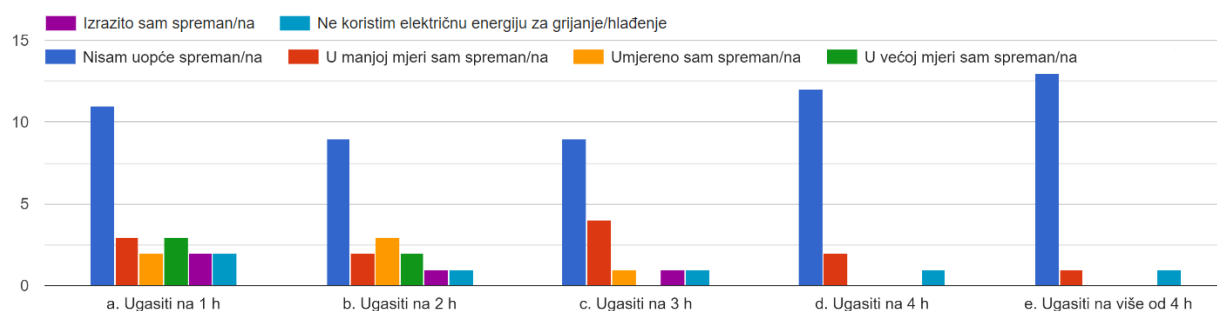
**Slika P.17:** Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini u kategoriji obiteljske kuće

Zanimaju li Vas napredne tehnologije upravljanja kapacitetom baterije električnog vozila (engl. Battery management system) kao što je V2G (V2G t...kućanstva ili pružanje pomoćnih usluga sustavu)?  
25 odgovora



Slika P.18: *Interesiranje za primjenu naprednih usluga u kategoriji obiteljske kuće*

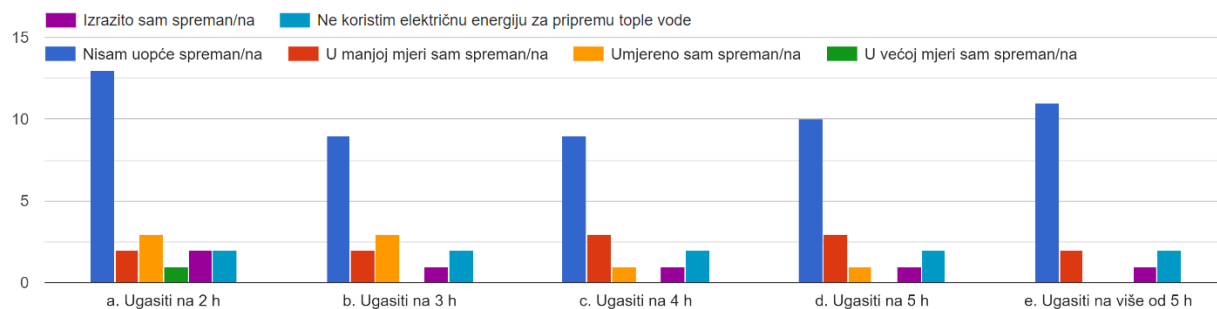
U kojoj ste mjeri spremni ugasiti grijanje/hlađenje u zimskom/ljetnom periodu u Vašem kućanstvu kako bi se Vaše električno vozilo prije napunilo na željeni iznos do željenog trenutka u danu?



Slika P.19: *Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu regulacijom unutarnje temperature prostora*

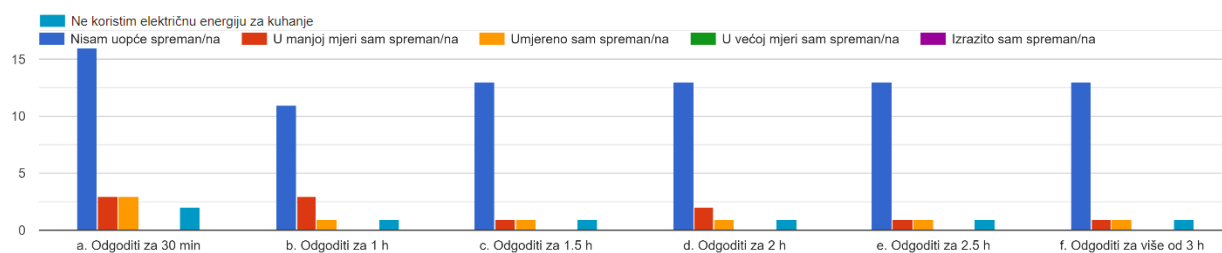


U kojoj ste mjeri spremni ugastiti bojlere za toplu vodu u Vašem kućanstvu kako bi se Vaše električno vozilo prije napunilo na željeni iznos do željenog trenutka u danu?



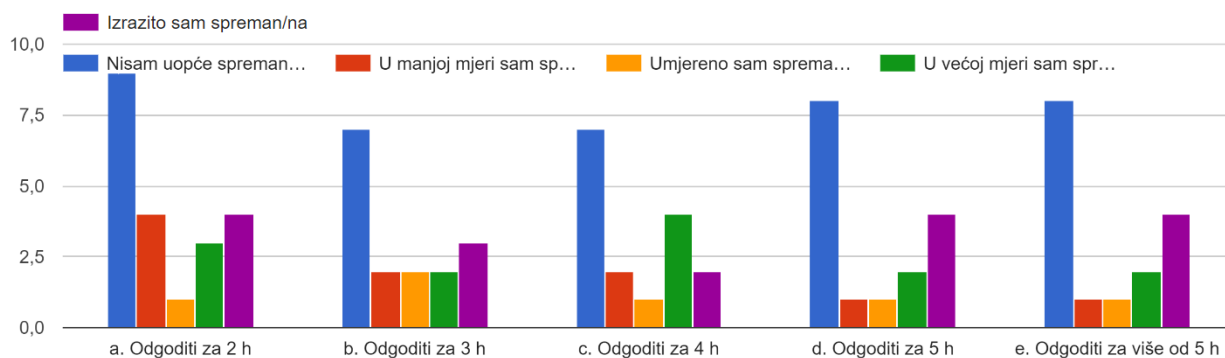
**Slika P.20:** Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu regulacijom temperature tople vode

U kojoj ste mjeri spremni odgoditi kuhanje u Vašem kućanstvu kako bi se Vaše električno vozilo prije napunilo na željeni iznos do željenog trenutka u danu?



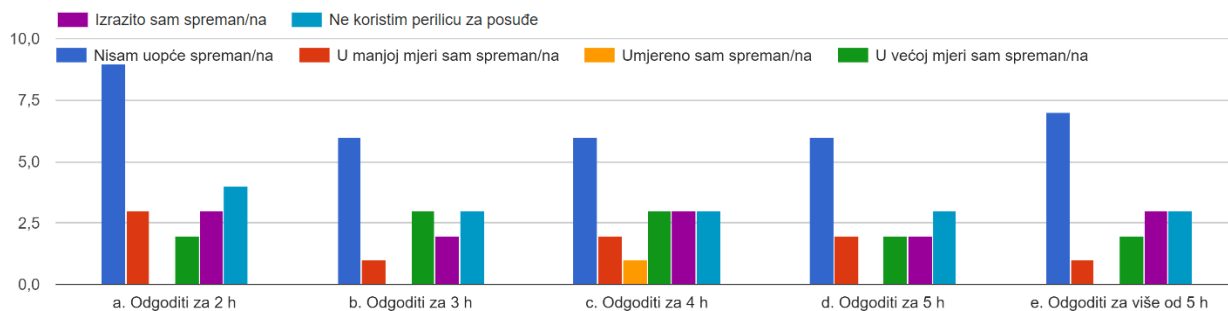
**Slika P.21:** Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom kuhanja

U kojoj ste mjeri spremni odgoditi korištenje perilice rublja u Vašem kućanstvu kako bi se Vaše električno vozilo prije napunilo na željeni iznos do željenog trenutka u danu?



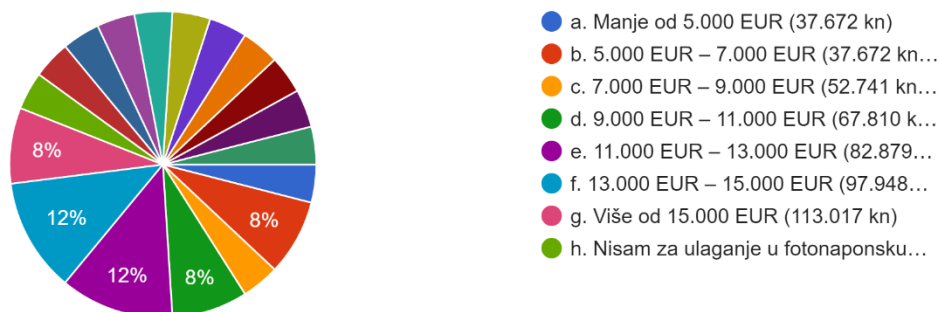
**Slika P.22:** Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom pranja rublja

U kojoj ste mjeri spremni odgoditi korištenje perilice posuđa u Vašem kućanstvu kako bi se Vaše električno vozilo prije napunilo na željeni iznos do željenog trenutka u danu?



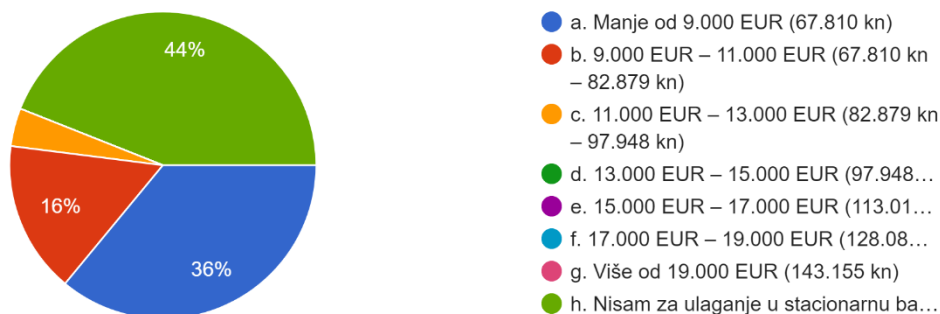
**Slika P.23:** Spremnost korisnika električnih vozila na smanjenje udobnosti u kućanstvu odgodom pranja posuđa

Jeste li spremni uložiti u fotonaponsku elektranu u cilju povećanja ušteda i osiguranja veće udobnosti u Vašem kućanstvu (slučaj da su Vam svi ...tranu, pod ostalo, upišite instaliranu snagu u kW.  
25 odgovora



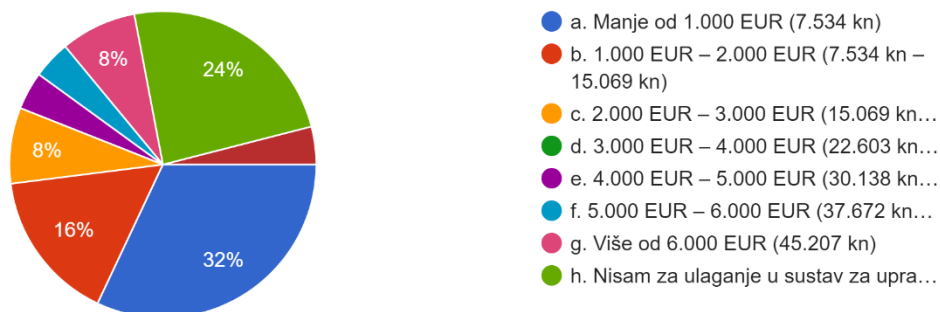
**Slika P.24:** Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u fotonaponsku elektranu

Jeste li spremni uložiti u stacionarnu bateriju u cilju povećanja ušteda i osiguranja veće udobnosti u Vašem kućanstvu (uzmite u obzir dostupnost svih ele...u, pod ostalo, upišite instaliran kapacitet u kWh.  
25 odgovora



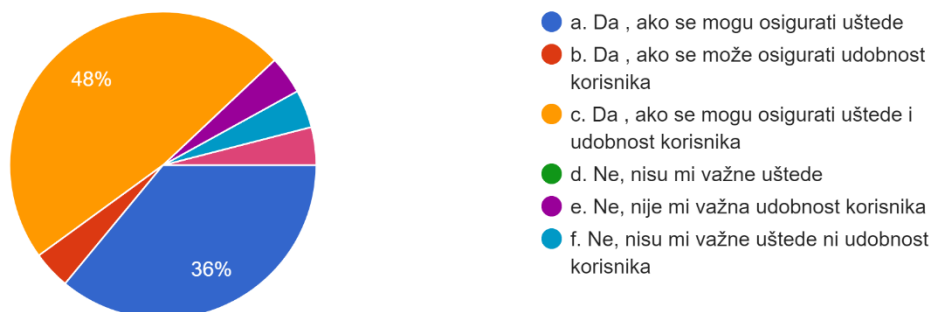
**Slika P.25:** Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u sustav pohrane energije

Jeste li spremni uložiti u sustav za upravljanje električnom energijom u cilju povećanja ušteda i osiguranja veće udobnosti u Vašem kućanstvu (uzmit...pod ostalo, upišite vrijednost investicije u EUR.  
25 odgovora



**Slika P.26:** Spremnost korisnika električnih vozila u kućanstvu na ulaganje u sustav za upravljanje električnom energijom

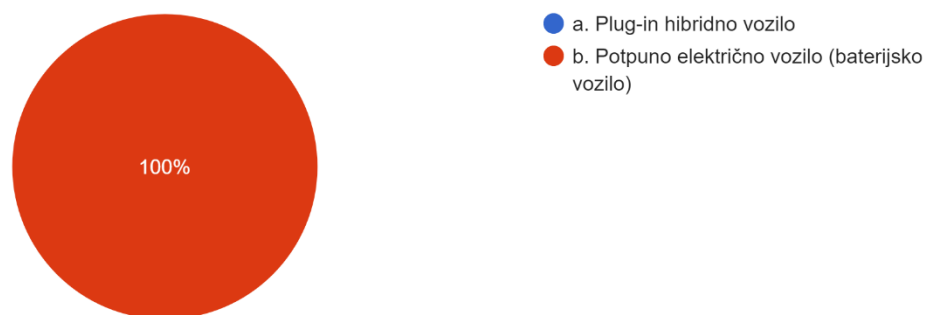
Jeste li spremni prihvatiti nove modele naplate električne energije (višetarifni sustavi - više od dvije tarife ili kontinuiranu promjenu cijene tijekom dana) u cilju racionalnijeg korištenja električne energije?  
25 odgovora



**Slika P.27:** Spremnost korisnika električnih vozila na prihvatanje novih modela naplate električne energije

Molim Vas navedite tip Vašeg električnog vozila:

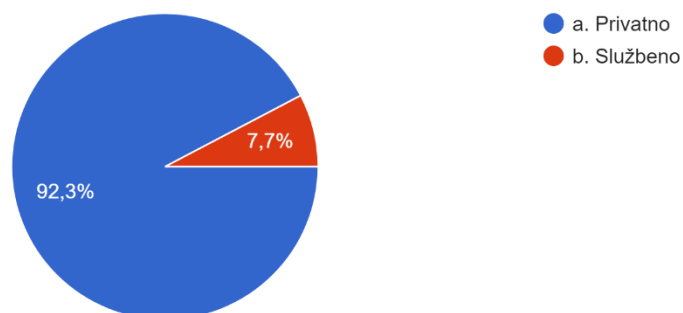
26 odgovora



**Slika P.28:** Tip električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Molim Vas navedite vlasništvo električnog vozila koje koristite:

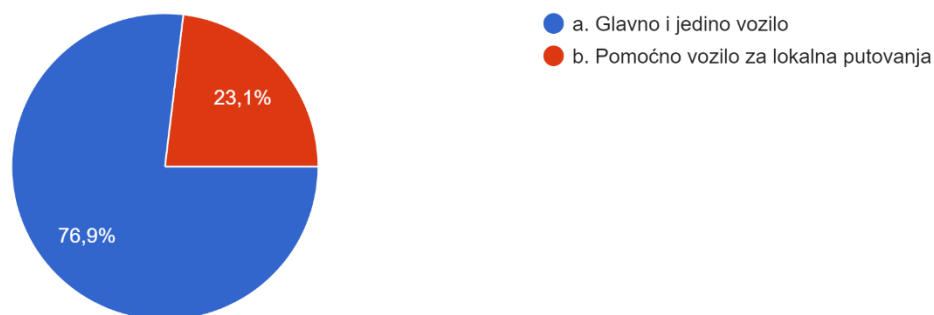
26 odgovora



**Slika P.29:** Vlasništvo električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Na koji način koristite Vaše električno vozilo?

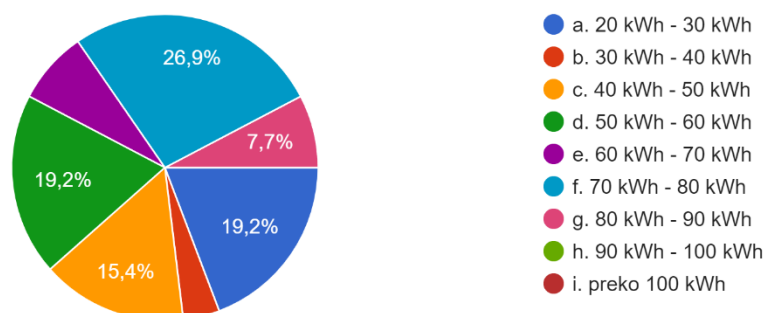
26 odgovora



**Slika P.30:** Način korištenja električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Koliki je kapacitet baterije Vašeg električnog vozila u kWh (ako Vam nije poznat kapacitet baterije unesite koji tip i marku električnog vozila koristite)?

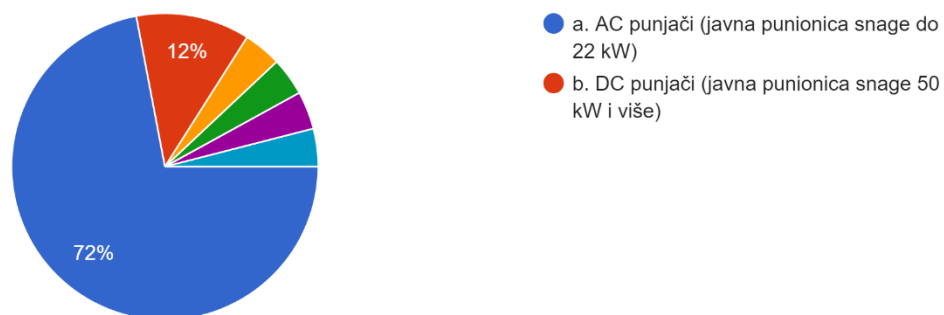
26 odgovora



**Slika P.31:** Kapacitet baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Na koji način najčešće punite Vaše električno vozilo?

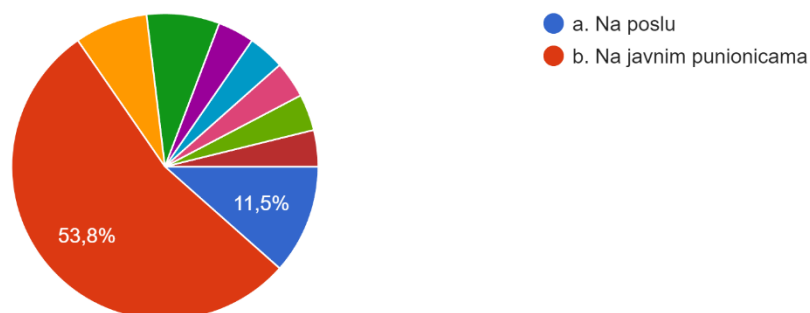
25 odgovora



Slika P.32: Najčešći način punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Gdje najčešće punite Vaše električno vozilo?

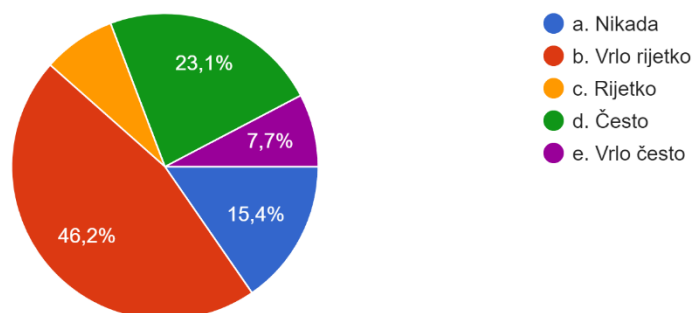
26 odgovora



Slika P.33: Najčešće mjesto punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Koliko često Vam se dogodilo da niste u mogućnosti napuniti električno vozilu na punionici?

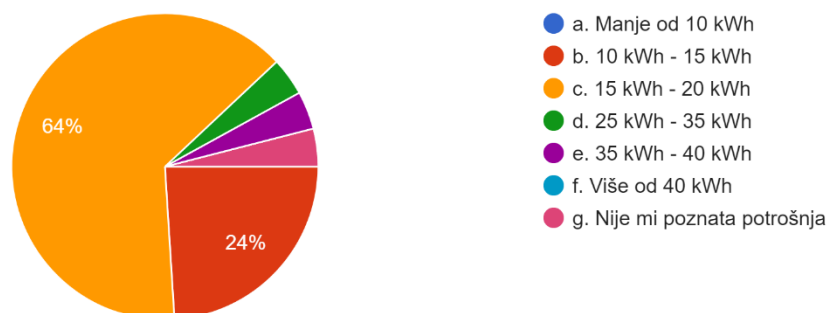
26 odgovora



Slika P.34: Problemi prilikom punjenja baterije električnog vozila na javnim punionicama

Kolika je stvarna prosječna potrošnja Vašeg električnog vozila na prijeđenih 100 km u kWh?

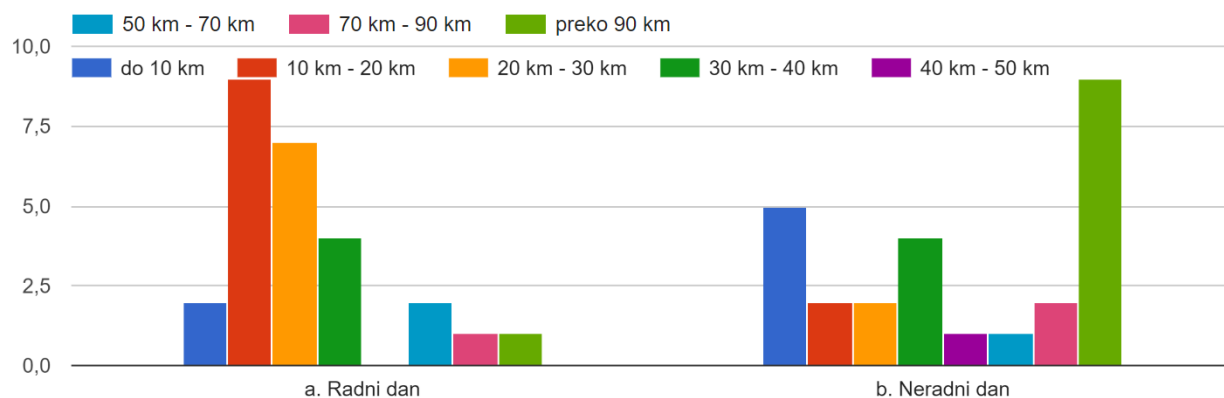
25 odgovora



Slika P.35: Stvarna prosječna potrošnja električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

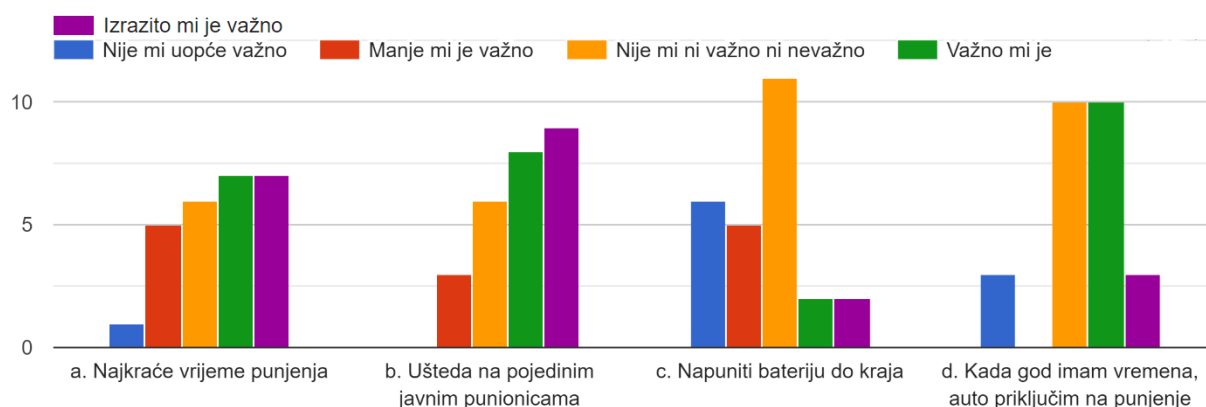


Koliko prosječno dnevno prelazite kilometara Vašim električnim vozilom?



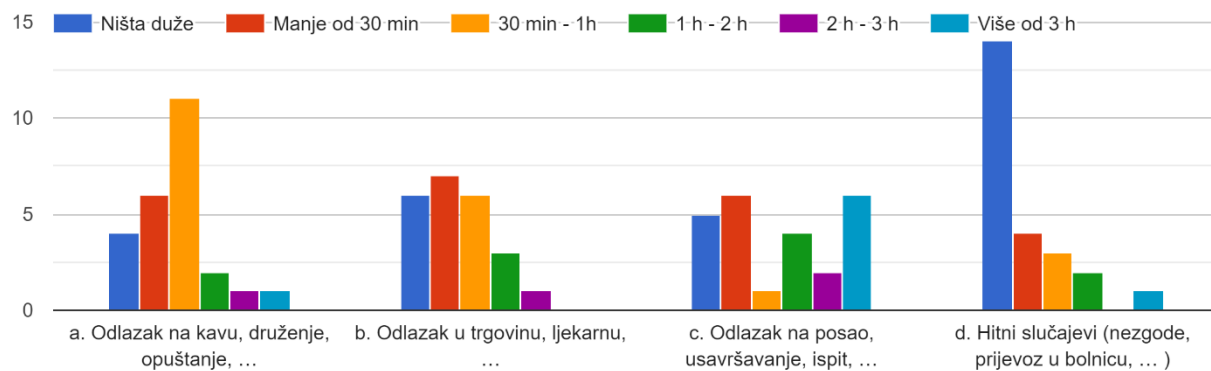
Slika P.36: Prosječno dnevno korištenje električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Prilikom punjenja Vašeg električnog vozila navedite koliko Vam vam je važno sljedeće:



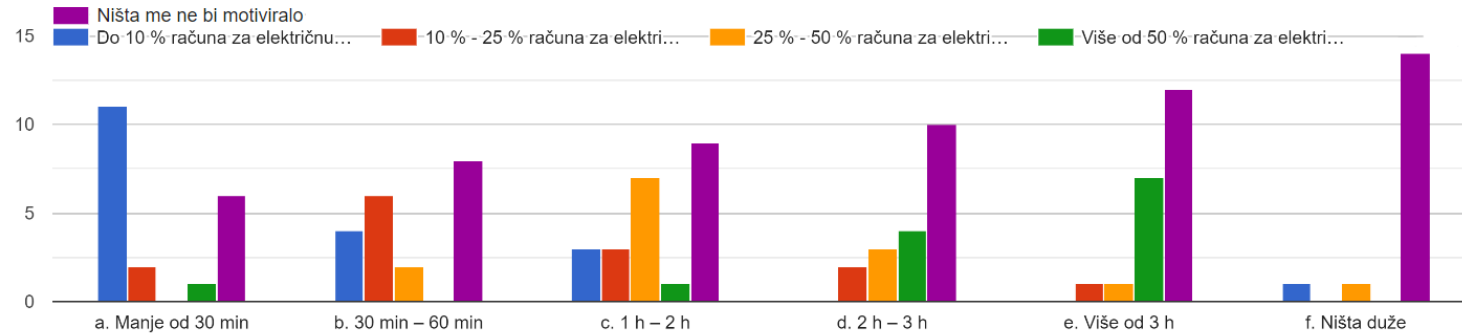
Slika P.37: Prioriteti prilikom punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Koliko ste spremni ostaviti Vaše električno vozilo duže na punionici ako nije napunjeno do željenog iznosa u trenutku planiranog preuzimanja u specifičn...čajevima (odnosi se na mjesto najčešćeg punjenja)?



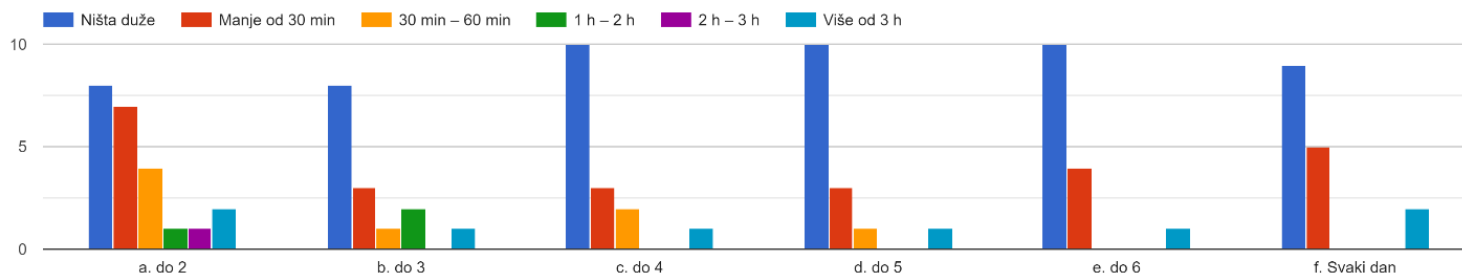
**Slika P.38:** *Prioriteti za prekidanje punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade*

Ukoliko bi Vam se ponudila određena financijska naknada, koliko ste spremni po jednom punjenju ostaviti duže Vaše električno vozilo na punionici od planiranoga za određenu financijsku naknadu na mjesečnoj razini?



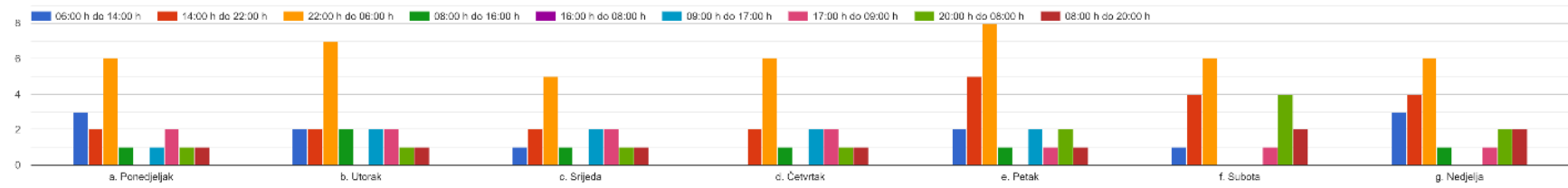
Slika P.39: Ovisnost financijske naknade o produljenju vremena punjenja baterije električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Koliko puta tjedno ste spremni prihvatiti da Vam punjenje električnog vozila traje dulje od planiranoga na punionici?



Slika P.40: Spremnost za produljenje vremena punjenja baterije električnog vozila na tjednoj razini u kategoriji stambene zgrade

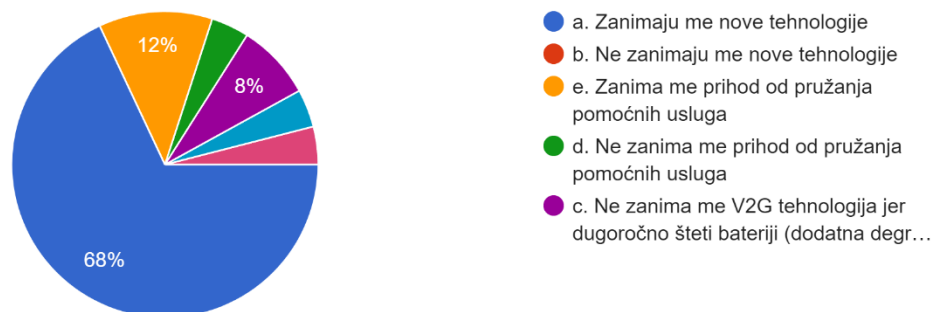
Kojim danima i u koje doba dana najčešće punite Vaše električno vozilo (moguć odabir višestrukog odgovora)?



Slika P.41: Dani i doba dana najčešćeg punjenje električnog vozila u kategoriji stambene zgrade

Zanimaju li Vas napredne tehnologije održavanja napunjenosti baterije električnog vozila kao što je V2G (V2G tehnologija omogućava pražnjenje električ...i ostvarenja prihoda vlasnika električnog vozila)?

25 odgovora



Slika P.42: Interesiranje za primjenu naprednih usluga u kategoriji stambene zgrade

Tablica P.1: Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 1. aktivnog kupca

Vrijeme [h]	$hvac_1$ [kWh]	$hvac_2$ [kWh]	$hvac_3$ [kWh]	$hvac_4$ [kWh]	$hvac_5$ [kWh]	$hvac_6$ [kWh]	$hvac_7$ [kWh]	$hvac_8$ [kWh]	$hvac_9$ [kWh]	$hvac_{10}$ [kWh]
$t_1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
$t_2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_3$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_4$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_5$	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_7$	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
$t_8$	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
$t_9$	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
$t_{10}$	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72
$t_{11}$	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95
$t_{12}$	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
$t_{13}$	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
$t_{14}$	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37
$t_{15}$	1.43	1.43	2.18	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
$t_{16}$	2.49	2.49	2.42	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
$t_{17}$	1.31	1.31	2.30	2.30	2.30	2.30	2.24	1.31	1.31	1.31
$t_{18}$	1.24	1.24	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.24	1.24	1.24
$t_{19}$	1.03	1.03	1.69	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
$t_{20}$	0.81	0.81	0.74	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
$t_{21}$	0.58	0.58	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.25
$t_{22}$	0.34	0.34	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.27
$t_{23}$	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
$t_{24}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tablica P.2:** *Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 2. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$hvac_1$ [kWh]	$hvac_2$ [kWh]	$hvac_3$ [kWh]	$hvac_4$ [kWh]	$hvac_5$ [kWh]	$hvac_6$ [kWh]	$hvac_7$ [kWh]	$hvac_8$ [kWh]	$hvac_9$ [kWh]	$hvac_{10}$ [kWh]
$t_1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_3$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_4$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_5$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_7$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_8$	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
$t_9$	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
$t_{10}$	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
$t_{11}$	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
$t_{12}$	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
$t_{13}$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
$t_{14}$	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
$t_{15}$	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
$t_{16}$	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
$t_{17}$	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
$t_{18}$	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
$t_{19}$	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
$t_{20}$	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
$t_{21}$	0.58	0.58	0.79	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
$t_{22}$	0.34	0.34	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
$t_{23}$	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
$t_{24}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tablica P.3:** *Angažirana snaga potrebna za održavanje unutarnje temperature prostora kod 3. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$hvac_1$ [kWh]	$hvac_2$ [kWh]	$hvac_3$ [kWh]	$hvac_4$ [kWh]	$hvac_5$ [kWh]	$hvac_6$ [kWh]	$hvac_7$ [kWh]	$hvac_8$ [kWh]	$hvac_9$ [kWh]	$hvac_{10}$ [kWh]
$t_1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_3$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_4$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_5$	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_7$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_8$	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
$t_9$	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
$t_{10}$	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
$t_{11}$	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
$t_{12}$	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
$t_{13}$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
$t_{14}$	1.49	1.49	2.10	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
$t_{15}$	1.53	1.53	1.47	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
$t_{16}$	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
$t_{17}$	1.41	1.41	1.88	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
$t_{18}$	1.24	1.24	2.00	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
$t_{19}$	1.03	1.03	1.36	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
$t_{20}$	0.81	0.81	1.75	1.79	1.48	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
$t_{21}$	0.58	0.58	0.48	0.48	0.51	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
$t_{22}$	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
$t_{23}$	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
$t_{24}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tablica P.4:** *Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 1. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$wh_1$ [kW]	$wh_2$ [kW]	$wh_3$ [kW]
$t_1$	0	0	0
$t_2$	0	0	0
$t_3$	4.5	0	0
$t_4$	0	4.5	4.5
$t_5$	0	0	0
$t_6$	0	0	0
$t_7$	0	0	0
$t_8$	0	0	0
$t_9$	4.5	4.5	0
$t_{10}$	0	0	4.5
$t_{11}$	0	0	0
$t_{12}$	0	0	0
$t_{13}$	0	0	0
$t_{14}$	4.5	0	0
$t_{15}$	0	4.5	4.5
$t_{16}$	0	0	0
$t_{17}$	0	0	0
$t_{18}$	0	0	0
$t_{19}$	0	0	0
$t_{20}$	4.5	4.5	0
$t_{21}$	0	0	4.5
$t_{22}$	0	0	0
$t_{23}$	0	0	0
$t_{24}$	0	0	0



**Tablica P.5:** *Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 2. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$wh_1$ [kW]	$wh_2$ [kW]	$wh_3$ [kW]
$t_1$	0	0	0
$t_2$	0	0	0
$t_3$	4.5	0	0
$t_4$	0	4.5	4.5
$t_5$	0	0	0
$t_6$	0	0	0
$t_7$	0	0	0
$t_8$	0	0	0
$t_9$	4.5	4.5	0
$t_{10}$	0	0	4.5
$t_{11}$	0	0	0
$t_{12}$	0	0	0
$t_{13}$	0	0	0
$t_{14}$	4.5	0	0
$t_{15}$	0	4.5	4.5
$t_{16}$	0	0	0
$t_{17}$	0	0	0
$t_{18}$	0	0	0
$t_{19}$	0	0	0
$t_{20}$	4.5	0	0
$t_{21}$	0	4.5	4.5
$t_{22}$	0	0	0
$t_{23}$	0	0	0
$t_{24}$	0	0	0

**Tablica P.6:** *Angažirana snaga potrebna za održavanje temperature tople vode kod 3. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$wh_1$ [kW]	$wh_2$ [kW]	$wh_3$ [kW]
$t_1$	0	0	0
$t_2$	0	0	0
$t_3$	4.5	0	0
$t_4$	0	4.5	4.5
$t_5$	0	0	0
$t_6$	0	0	0
$t_7$	0	0	0
$t_8$	0	0	0
$t_9$	4.5	4.5	0
$t_{10}$	0	0	4.5
$t_{11}$	0	0	0
$t_{12}$	0	0	0
$t_{13}$	0	0	0
$t_{14}$	4.5	0	0
$t_{15}$	0	4.5	4.5
$t_{16}$	0	0	0
$t_{17}$	0	0	0
$t_{18}$	0	0	0
$t_{19}$	0	0	0
$t_{20}$	4.5	0	0
$t_{21}$	0	4.5	4.5
$t_{22}$	0	0	0
$t_{23}$	0	0	0
$t_{24}$	0	0	0

**Tablica P.7:** *Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 1. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$b_1$ [kWh]	$b_2$ [kWh]	$b_3$ [kWh]	$b_4$ [kWh]	$b_5$ [kWh]
$t_1$	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
$t_2$	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
$t_3$	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
$t_4$	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
$t_5$	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
$t_6$	3.08	3.02	3.02	3.08	3.02
$t_7$	3.42	3.02	3.08	3.41	3.41
$t_8$	2.03	3.02	1.96	3.41	3.41
$t_9$	2.03	4.87	2.30	3.41	3.41
$t_{10}$	2.03	4.87	2.64	3.41	3.41
$t_{11}$	2.37	5.20	1.96	3.41	3.41
$t_{12}$	2.71	4.80	2.30	3.41	3.41
$t_{13}$	3.05	5.14	2.64	3.75	3.41
$t_{14}$	4.88	5.48	4.58	4.08	5.15
$t_{15}$	5.58	6.69	4.92	5.85	4.54
$t_{16}$	6.28	7.84	6.22	6.96	5.99
$t_{17}$	7.81	7.84	7.44	7.04	7.76
$t_{18}$	7.81	7.84	7.84	7.77	7.83
$t_{19}$	7.81	7.84	7.84	7.77	7.83
$t_{20}$	5.41	5.59	5.17	5.17	5.17
$t_{21}$	2.12	2.19	2.01	2.01	2.01
$t_{22}$	2.12	2.19	2.01	2.01	2.01
$t_{23}$	2.12	2.19	2.01	2.01	2.01
$t_{24}$	2.12	2.19	2.01	2.01	2.01

**Tablica P.8:** *Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 2. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$b_1$ [kWh]	$b_2$ [kWh]	$b_3$ [kWh]	$b_4$ [kWh]	$b_5$ [kWh]
$t_1$	3.02	3.02	3.02	1.96	1.96
$t_2$	3.02	3.02	3.02	1.96	1.96
$t_3$	3.02	3.02	3.02	1.96	1.96
$t_4$	2.59	3.02	3.41	1.96	1.96
$t_5$	2.59	3.08	3.44	1.96	1.96
$t_6$	2.80	3.39	3.44	1.96	1.96
$t_7$	2.80	4.11	3.62	1.96	1.96
$t_8$	2.80	4.11	3.62	1.96	1.96
$t_9$	2.80	4.11	3.62	1.96	1.96
$t_{10}$	2.80	4.11	3.62	1.96	1.96
$t_{11}$	3.14	5.67	3.62	1.96	1.96
$t_{12}$	3.14	5.67	3.62	1.96	1.96
$t_{13}$	3.14	5.67	3.21	1.96	1.96
$t_{14}$	3.14	5.67	3.21	1.96	1.96
$t_{15}$	3.83	5.67	4.96	1.96	1.96
$t_{16}$	6.30	7.84	7.72	1.96	1.96
$t_{17}$	6.81	7.84	7.82	1.96	1.96
$t_{18}$	7.53	7.84	7.82	1.96	1.96
$t_{19}$	7.84	7.84	7.82	1.96	1.96
$t_{20}$	5.33	5.59	5.89	1.96	1.96
$t_{21}$	2.08	2.19	2.33	1.96	1.96
$t_{22}$	2.08	2.19	2.33	1.96	1.96
$t_{23}$	2.08	2.19	2.33	1.96	1.96
$t_{24}$	2.08	2.19	2.33	1.96	1.96

**Tablica P.9:** *Početna stanja napunjenosti baterija baterijskih sustava pohrane energije kod 3. aktivnog kupca*

Vrijeme [h]	$b_1$ [kWh]	$b_2$ [kWh]	$b_3$ [kWh]	$b_4$ [kWh]	$b_5$ [kWh]
$t_1$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_2$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_3$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_4$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_5$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_6$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_7$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_8$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_9$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{10}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{11}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{12}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{13}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{14}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{15}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{16}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{17}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{18}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{19}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{20}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{21}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{22}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{23}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
$t_{24}$	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96

**Tablica P.10:** Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 1. aktivnog kupca

Vrijeme [h]	$ev_1$ [kWh]	$ev_2$ [kWh]	$ev_3$ [kWh]	$ev_4$ [kWh]	$ev_5$ [kWh]	$ev_6$ [kWh]	$ev_7$ [kWh]	$ev_8$ [kWh]	$ev_9$ [kWh]	$ev_{10}$ [kWh]
$t_1$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_2$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_3$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_4$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_5$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_6$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_7$	45.2	43.7	42.2	40.7	39.2	37.7	36.2	34.7	33.2	31.7
$t_8$	45.2	43.7	42.2	40.7	42.31	40.98	37.21	37.85	32.00	27.65
$t_9$	45.2	43.7	42.2	40.7	43.32	40.98	38.22	37.85	29.69	26.45
$t_{10}$	45.2	43.7	42.2	40.7	44.32	44.79	40.27	38.94	24.50	25.25
$t_{11}$	45.2	43.7	42.2	40.7	46.38	47.62	42.33	42.18	23.30	24.05
$t_{12}$	45.2	43.7	42.2	40.7	48.18	49.18	44.89	45.46	22.10	22.85
$t_{13}$	45.2	43.7	42.2	40.7	49.18	49.18	49.18	47.98	20.90	21.65
$t_{14}$	45.2	43.7	42.2	40.7	50.19	50.19	50.19	50.19	19.70	20.45
$t_{15}$	45.2	43.7	42.2	40.7	51.2	51.2	51.2	51.2	16.30	16.30
$t_{16}$	45.2	43.7	42.2	40.7	51.2	51.2	51.2	51.2	12.8	12.8
$t_{17}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{18}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{19}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{20}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{21}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{22}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{23}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{24}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8

**Tablica P.11:** Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca

Vrijeme [h]	$ev_1$ [kWh]	$ev_2$ [kWh]	$ev_3$ [kWh]	$ev_4$ [kWh]	$ev_5$ [kWh]	$ev_6$ [kWh]	$ev_7$ [kWh]	$ev_8$ [kWh]	$ev_9$ [kWh]	$ev_{10}$ [kWh]
$t_1$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_2$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_3$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_4$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_5$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_6$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_7$	45.2	43.7	42.2	40.7	39.2	37.7	36.2	12.8	12.8	12.8
$t_8$	44.00	42.50	42.20	39.50	40.76	38.82	41.45	12.8	12.8	12.8
$t_9$	44.00	41.30	39.65	37.15	40.76	38.82	42.45	12.8	12.8	12.8
$t_{10}$	42.80	38.76	39.65	35.95	45.25	39.82	44.31	12.8	12.8	12.8
$t_{11}$	42.80	38.76	39.65	34.75	48.18	45.07	44.31	12.8	12.8	12.8
$t_{12}$	42.80	38.76	37.19	34.75	48.18	48.18	49.68	12.8	12.8	12.8
$t_{13}$	42.80	38.76	37.19	32.53	48.18	49.18	50.69	12.8	12.8	12.8
$t_{14}$	41.60	35.37	35.99	32.53	49.18	50.19	50.69	12.8	12.8	12.8
$t_{15}$	40.40	29.55	31.69	27.02	50.19	51.2	50.69	12.8	12.8	12.8
$t_{16}$	39.20	18.97	30.49	24.67	51.2	51.2	51.2	12.8	12.8	12.8
$t_{17}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{18}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{19}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{20}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{21}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{22}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{23}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{24}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8

**Tablica P.12:** Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 3. aktivnog kupca

Vrijeme [h]	$ev_1$ [kWh]	$ev_2$ [kWh]	$ev_3$ [kWh]	$ev_4$ [kWh]	$ev_5$ [kWh]	$ev_6$ [kWh]	$ev_7$ [kWh]	$ev_8$ [kWh]	$ev_9$ [kWh]	$ev_{10}$ [kWh]
$t_1$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_2$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_3$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_4$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_5$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_6$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_7$	45.2	43.7	42.2	40.7	39.2	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_8$	45.2	43.7	42.2	40.7	44.55	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_9$	45.2	43.7	42.2	40.7	46.66	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{10}$	45.2	43.7	42.2	40.7	48.58	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{11}$	45.2	43.7	42.2	40.7	49.59	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{12}$	45.2	43.7	42.2	40.7	49.59	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{13}$	45.2	43.7	42.2	40.7	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{14}$	45.2	42.50	41.00	39.50	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{15}$	44.00	41.30	39.80	32.43	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{16}$	42.80	40.30	38.60	31.23	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{17}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{18}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{19}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{20}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{21}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{22}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{23}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{24}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8



**Tablica P.13:** Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 8 električnih vozila spojenih na punionice

Vrijeme [h]	$ev_1$ [kWh]	$ev_2$ [kWh]	$ev_3$ [kWh]	$ev_4$ [kWh]	$ev_5$ [kWh]	$ev_6$ [kWh]	$ev_7$ [kWh]	$ev_8$ [kWh]	$ev_9$ [kWh]	$ev_{10}$ [kWh]
$t_1$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_2$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_3$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_4$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_5$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_6$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_7$	45.2	43.7	42.2	40.7	39.2	37.7	36.2	34.7	12.8	12.8
$t_8$	44.00	42.50	42.2	39.50	40.76	38.82	41.45	41.45	12.8	12.8
$t_9$	44.00	41.30	39.65	37.15	40.76	38.82	42.45	42.45	12.8	12.8
$t_{10}$	42.80	38.76	39.65	35.95	45.25	39.82	44.31	44.31	12.8	12.8
$t_{11}$	42.80	38.76	39.65	34.75	48.18	45.07	44.31	44.31	12.8	12.8
$t_{12}$	42.80	38.76	37.19	34.75	48.18	48.18	49.68	49.68	12.8	12.8
$t_{13}$	42.80	38.76	37.19	32.53	48.18	49.18	50.69	50.69	12.8	12.8
$t_{14}$	41.60	35.37	35.99	32.53	49.18	50.19	50.69	50.69	12.8	12.8
$t_{15}$	40.40	29.55	31.69	27.02	50.19	51.2	50.69	50.69	12.8	12.8
$t_{16}$	39.20	18.97	30.49	24.67	51.2	51.2	51.2	51.2	12.8	12.8
$t_{17}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{18}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{19}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{20}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{21}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{22}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{23}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{24}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8

**Tablica P.14:** Početna stanja napunjenosti baterija električnih vozila kod 2. aktivnog kupca za slučaj 6 električnih vozila spojenih na punionice

Vrijeme [h]	$ev_1$ [kWh]	$ev_2$ [kWh]	$ev_3$ [kWh]	$ev_4$ [kWh]	$ev_5$ [kWh]	$ev_6$ [kWh]	$ev_7$ [kWh]	$ev_8$ [kWh]	$ev_9$ [kWh]	$ev_{10}$ [kWh]
$t_1$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_2$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_3$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_4$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_5$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_6$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_7$	45.2	43.7	42.2	40.7	39.2	37.7	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_8$	44.00	42.50	42.2	39.50	40.76	38.82	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_9$	44.00	41.30	39.65	37.15	40.76	38.82	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{10}$	42.80	38.76	39.65	35.95	45.25	39.82	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{11}$	42.80	38.76	39.65	34.75	48.18	45.07	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{12}$	42.80	38.76	37.19	34.75	48.18	48.18	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{13}$	42.80	38.76	37.19	32.53	48.18	49.18	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{14}$	41.60	35.37	35.99	32.53	49.18	50.19	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{15}$	40.40	29.55	31.69	27.02	50.19	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{16}$	39.20	18.97	30.49	24.67	51.2	51.2	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{17}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{18}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{19}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{20}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{21}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{22}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{23}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
$t_{24}$	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8

## Sažetak

U ovoj disertaciji razvijeni su optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjenu *vehicle-to-building* (V2B) usluge, odnosno cijene razmjene električne energije između električnih vozila i komercijalnih zgrada te unaprijeđen model dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice. Predložen model sustava upravljanja energijom razvijen je u GAMS-u te realiziran u višem sloju stohastičkim pristupom, a u nižem sloju determinističkim pristupom pomoću mješovito cjelobrojnog nelinearnog programiranja (engl. Mixed Integer Nonlinear Programming - MINLP) i proširenog matematičkog programiranja (engl. Extended Mathematical Programming - EMP), uzimajući u obzir varijable odluke višeg sloja, s ciljem minimizacije društvenog troška nižeg sloja u gotovo stvarnom vremenu. Niži sloj sustava upravljanja temelji se na strategiji pomičnog horizonta implementiranoj kombinacijom algoritma u MATLAB-a i optimizacijskog modela u GAMS-a. Optimizacijski algoritam za određivanje cijena električne energije za primjene V2B usluge razvijen je u MATLAB-u dok se zahtjevi za izvođenjem optimizacije prosljeđuju GAMS-u. Predložen model sustav upravljanja energijom integrira model baterijskog sustava pohrane energije koji obuhvaća učinkovitosti ovisne o opterećenju za dvosmjerni energetski pretvarač, energetski model punjenja baterije te modeliranje cikličkog i kalendarskog starenja baterije. Model baterijskog sustava pohrane energije primijenjen je na baterijski sustav pohrane energije i električna vozila te je unaprijeđen s energetskim modelom pražnjenja baterije i učinkovitostima ovisnim o opterećenju za bateriju.

Primjenom modela dvoslojnog adaptivnog sustava za kratkoročno upravljanje energijom unutar energetske zajednice u kombinaciji s optimizacijskim algoritmom za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge može se doći do novih i dopunjavanja postojećih saznanja. Saznanja koja proizlaze iz disertacije su utjecaj cijena električne energije za primjenu V2B usluge i virtualnih troškova degradacije baterije na vrijednost funkcije cilja, osiguranje fleksibilnosti u radu energetske zajednice i potencijal primjene, osiguranje povećanja integracije obnovljivih izvora energije i električnih vozila u mreži, izvedivost opti-

mizacijskog modela u nižem sloju s obzirom na novonastale scenarije te osiguranje smanjenja emisija stakleničkih plinova. Prikupljanjem novih saznanja prilikom primjene predloženog modela sustava upravljanja energijom i optimizacijskog algoritma za određivanje cijena električne energije za primjenu V2B usluge doprinosi se dostizanju postavljenih globalnih ciljeva.

**Ključne riječi:** aktivni kupac, baterijski sustav pohrane energije, električno vozilo, energetska zajednica, lokalno tržište električne energije, optimizacija

## Abstract

In this thesis, the optimization algorithm for determining electricity prices for the application of the *vehicle-to-building* (V2B) service, i.e. the price of electricity exchange between electric vehicles and commercial buildings and the enhanced model of a two-layer adaptive system for short-term energy management within the energy community were developed. The proposed model of the energy management system was developed in GAMS and realized in the upper layer with the stochastic approach and in the lower layer with the deterministic approach using mixed integer nonlinear programming (MINLP) and extended mathematical programming (EMP), taking into account the variable decisions of the upper layer, with the objective of minimizing the social welfare of the lower layer in near real-time. The lower layer of the management system is based on the rolling horizon strategy implemented by combining the algorithm in MATLAB and the optimization model in GAMS. The optimization algorithm for determining electricity prices for applying the V2B service is developed in MATLAB, while the optimization requests are forwarded to GAMS. The proposed energy management system model integrates the battery energy storage system (BESS) model that includes load-dependent efficiency for a bidirectional power converter, the charging energy model, and cyclic and calendar ageing of the battery. The BESS model is applied to stationary battery systems and electric vehicles (EV) and is enhanced with the discharging energy model and load-dependent efficiencies for the battery.

Applying the enhanced model of a two-layer adaptive system for short-term energy management within the energy community combined with the optimization algorithm for determining electricity prices for applying the V2B service can lead to new and supplementing existing knowledge. The knowledge derived from the thesis is the influence of electricity prices for the application of the V2B service and the virtual costs of battery degradation on the value of the objective function, ensuring flexibility in the operating of the energy community and the application potential, ensuring an increase in the integration of renewable energy sources (RES) and EVs in the grid, the feasibility solution of the optimization model in the

lower layer concerning newly created scenarios and ensuring the reduction of greenhouse gas emissions. Gathering new knowledge when applying the proposed energy management system model and optimization algorithm for determining electricity prices for the application of the V2B service contributes to the achievement of the set global objectives.

**Keywords:** prosumer, battery energy storage system, electric vehicle, energy community, local electricity market, optimization

## Životopis

Nemanja Mišljenović je rođen 26. srpnja 1993. godine u Vukovaru. Nakon završene osnovne škole upisuje Tehničku školu Nikole Tesle u Vukovaru, smjer elektrotehničar, te s odličnim uspjehom 2012. godine završava. Nakon završene srednje škole upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku te se odlučuje za smjer elektroenergetike. Po završetku preddiplomskog studija upisuje diplomski studij na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer industrijska elektroenergetika, te s odličnim uspjehom 2018. godine završava studij.

Tijekom diplomskog studija radi u području industrijske informatike te se upoznaje s automatizacijom procesa i izradom SCADA-e. Nakon završenog fakulteta počinje raditi u području industrijske informatike, projektiranja sustava automatizacije i programiranja. Na navedenim poslovima stekao je vještine rada u timu kao i terenskog rada. 2021. godine zapošljava se kao doktorand na HRZZ projekt na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek te upisuje poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika.

Uže područje istraživanja su mu tržište električne energije, kratkoročno planiranje pogona aktivnog kupca i integracija električnih vozila u elektroenergetski sustav. Objavio je više znanstvenih radova u znanstvenim časopisima indeksiranim u WoSCC te na međunarodnim znanstvenim skupovima indeksiranim u IEEE Xplore i Springer bazama. Održava nastavu na prijediplomskim i diplomskim studijskim programima iz kolegija Elektroenergetika, strojeva, Ekonomika i tržište električne energije te Sklopni aparati i visokonaponska tehnika.