

Optimalno održavanje razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila unutar energetske zajednice građana

Dijaković, Dominik

Master's thesis / Diplomski 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:200:514719>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-29**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

**OPTIMALNO ODRŽAVANJE RAZINE NAPUNJENOSTI
BATERIJSKOG SPREMNIKA ELEKTRIČNOG VOZILA
UNUTAR ENERGETSKE ZAJEDNICE GRAĐANA**

Diplomski rad

Dominik Dijaković

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Dominik Dijaković
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1440, 07.10.2022.
JMBAG:	0165077176
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Sumentor:	Nemanja Mišljenović, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Optimalno održavanje razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila unutar energetske zajednice građana
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je dati pregled tehničkih karakteristika na tržištu dostupnih električnih vozila, punionica za električna vozila i objasniti pojam energetske zajednice građana. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model za izradu plana održavanja napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila za primjer energetske zajednice građana. Sumentor: Nemanja Mišljenović, mag. ing. el.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	18.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	04.10.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	04.10.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 04.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Dominik Dijaković
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1440, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimalno održavanje razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila unutar energetske zajednice građana**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora Nemanja Mišljenović, univ. mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME RADA	3
3. ELEKTRIČNA VOZILA	5
3.1. Hibridno električno vozilo (HEV)	5
3.2. Električno vozilo produljenog dometa (E-REV)	6
3.3. Električno vozilo s pogonom na gorive ćelije (FCEV)	7
3.4. Električno vozilo na bateriju (EV)	8
4. PUNIONICE ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA	11
4.1. Tipovi konektora punjača električnih vozila	12
4.1.1. Tip 1 – SAE J1772.....	13
4.1.2. Tip 2 – Mennekes	13
4.1.3. Tip 3 – Kombinirani sustav (COMBO 1 i COMBO 2).....	14
4.1.4. Tip 4 – CHAdeMO	15
4.2. Načini punjenja električnih automobila.....	16
4.3. Pregled karakteristika na tržištu punjača	17
5. ENERGETSKA ZAJEDNICA GRAĐANA	21
5.1. Postupak osnivanja energetske zajednice građanina.....	23
5.2. Proizvodnja i potrošnja električne energije u EZG	23
5.3. Cijena električne energije.....	25
5.4. Pohrana električne energije pomoću baterijskih sustava.....	26
5.5. Pohrana električne energije pomoću baterijskih sustava električnih automobila	27
6. MATEMATIČKI MODEL	28
6.1. Funkcija cilja za minimizaciju troška rada energetske zajednice	28
7. REZULTATI SIMULACIJE	32
7.1. Scenarij 1., niska razina integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građana	36

7.2. Scenarij 2. visoka razina integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građana	40
8. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA	49
SAŽETAK.....	53
ABSTRACT	54

1. UVOD

Razvoj tehnologije i sve veća svijest o potrebi za očuvanjem okoliša potaknuli su brzi rast tržišta električnih vozila (engl. *Electric Vehicle*) u posljednjih nekoliko godina. Električna vozila, kao održiva alternativa vozilima koja imaju motor s unutarnjim izgaranjem, sve više postaju dio svakodnevnog života. Paralelno s time, infrastruktura za punjenje električnih vozila također doživljava značajan napredak, a pojmovi poput energetske zajednice građana sve češće se spominju kao ključni element u transformaciji elektroenergetskog sustava prema održivosti.

Prvi dio rada bazira se na pregledu tehničkih karakteristika električnih vozila i njihove podjele s naglaskom na njihove specifičnosti. Kroz detaljnu analizu električnih vozila, cilj je pružiti sveobuhvatan uvid u trenutnu situaciju na tržištu te identificirati ključne faktore koji utječu na izbor i korištenje električnih vozila i pripadajuće infrastrukture.

Nakon toga u radu definirane su punionice električnih vozila. Zatim su objašnjene vrste konektora s njihovim specifičnostima te načini punjenja električnih vozila. Analizom podataka cilj je pružiti uvid u trenutnu situaciju na tržištu punionica.

Posebna pažnja posvećena je pojmu energetske zajednice građana odnosno inicijativi koja postaje sve važnija u kontekstu decentralizirane proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije. Energetske zajednice građana predstavljaju inovativan model organizacije u kojem građani aktivno sudjeluju u proizvodnji, distribuciji i potrošnji električne energije, čime se potiče održivost i energetska neovisnost lokalnih zajednica.

U daljnjem dijelu rada, primjenjujući teorijski dio u praktičnom smislu, razvijen je optimizacijski model za planiranje održavanja razine napunjenosti baterijskih spremnika električnih vozila unutar energetske zajednice građana. Predloženi model omogućit će ispitivanje utjecaja razine integracije obnovljivih izvora energije na trošak članova energetske zajednice te će osigurati optimalno korištenje proizvedene električne energije, uzimajući u obzir promjenjivost u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora i potrebe za mobilnošću unutar zajednice.

Posljednji dio rada posvećen je analizi dobivenih rezultata predloženog modela kojemu je cilj minimizirati troškove članovima energetske zajednice građana optimalnim održavanjem razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je dati pregled tehničkih karakteristika na tržištu dostupnih električnih vozila, punionica za električna vozila i objasniti pojam energetske zajednice građana. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model za izradu plana održavanja napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila za primjer energetske zajednice građana.

2. PREGLED PODRUČJA TEME RADA

Sve većom elektrifikacijom transportnog sektora se teži ka što manjem zagađivanju okoliša. U proteklih 20 godina automobilska industrija doživjela je značajne promjene u području električnih vozila. Najznačajniji napredak se primjećuje kod tehnologija napajanja i pogona električnih vozila. U navedene tehnologije spadaju baterijski sustavi, hibridni pogoni, vodikove gorive ćelije i elektromotori. Razvojem učinkovitijih baterijskih sustava, baziranih na litij-ionskim i *solid-state* baterijama, zajedno s tehnologijama brzog punjenja, značajno su se poboljšale performanse i praktičnost električnih vozila. Istodobno, implementacija naprednih sustava autonomne vožnje te uspostava mreža punionica za punjenje omogućili su bolje uklapanje električnih vozila u suvremenu infrastrukturu.

Prema [1], električna vozila su se pojavila oko 1880. godine dok njihov razvoj i proizvodnja nisu bili prekinuti zbog masovne proizvodnje automobila koji koriste motor s unutarnjim izgaranjem. Rad [2] daje uvid u tehnologije baterijskih spremnika koje su razvijane na litij-ionskoj tehnologiji i koriste se za ugradnju u električna vozila. Rad [3] daje širi uvid u tehnologije hibridnih i potpuno električnih vozila koje se koriste. U radu [4] detaljno su opisane različite vrste električnih motora koji su se koristili ranije i koji se koriste danas. Spomenuti električni motori su permanentno magnetski sinkroni motori, indukcijski motori, preklopni reluktantni motor i istosmjerni motori bez četkica. U radu [5] navode se različite vrste konektora i metode punjenja električnih vozila. Konektori su podijeljeni po tipovima, odnosno tip 1 (SAE J1772/2009), tip 2 (VDE-AR-E 2623-2-2), tip 3 ili kombinirani sustav punjenja (engl. *Combined Charging System*) i tip 4 (CHAdeMO). Dok postoje 4 metode punjenja i podijeljene su prema vrsti električne energije i snazi punjenja.

Prema [6], energetske zajednice građana definirane se kao pravna osoba čiji je osnovni cilj omogućiti svojim članovima ili dioničarima sudjelovanje u proizvodnji, potrošnji, distribuciji, skladištenju i opskrbi električnom energijom iz obnovljivih izvora. Zakon o tržištu električne energije detaljnije definira osnivanje, ulogu i prava energetske zajednice građana [7]. Proizvodnja električne energije unutar energetske zajednice građana je iz obnovljivih izvora električne energije, a najzastupljeniji i najprihvatljiviji izvor električne energije su fotonaponski sustavi.

Rad [8] navodi da fotonaponski sustavi se mogu u principu podijeliti na autonomne sustave, koji nisu priključeni na ostatak elektroenergetskog sustava te na sustave vođene elektroenergetskim sustavom, odnosno mrežom. Takvi sustavi su povezani s elektroenergetskim sustavom pomoću dvosmjernog brojila. Ostali dijelovi fotonaponskog sustava koji je povezan s elektroenergetskim

sustavom su fotonaponski paneli, izmjenjivač te istosmjerni pretvarač. Nadalje rad [9] daje teorijsku pozadinu fotonaponskih sustava, njihovo međusobno povezivanje i proračune za dimenzioniranje fotonaponskih elektrana. U radu [10] autori se bave problemom održavanja razine napunjenosti baterijskih sustava unutar energetske zajednice građana te prikazuju algoritam koji je korišten za optimizaciju. Algoritam se sastoji od dvodijelnog planiranja u kojem se planira potrošnja za dan unaprijed (engl. *Day Ahead*) i planiranje u realnom vremenu (engl. *Work Point Control*). Isto tako u radu [11], autori se bave s problematikom održavanja razine napunjenosti baterijskih spremnika električnih automobila unutar energetske zajednice građanina. Prikazuju drugačiji pristup rješavanju ove problematike, algoritam koji je korišten u ovom slučaju za optimizaciju razine napunjenosti baterije je baziran na mješovito cjelobrojnom linearnom programiranju (engl. *Mixed Integer Linear Programming*). Autori rada [12] opisuju benefite povezivanja električnih vozila s elektroenergetskim sustavom pomoću tehnologije *vehicle to grid* (V2G) koja dozvoljava pametno punjenje i pražnjenje baterija kako bi se poboljšala sigurnost i stabilnost elektroenergetskog sustava. Spajanjem elektroenergetskog sustava i električnog vozila pomoću tehnologije V2G ostvaruju se financijski benefiti za korisnike električnih vozila te se smanjenje opterećenje elektroenergetskog sustava zbog punjenja baterijskog spremnika tokom niske potrošnje i pražnjenja baterijskog spremnika tokom visoke potrošnje u elektroenergetskom sustavu. Dodatna prednost je povećanje efikasnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava jer tako spojeni električni automobili se ponašaju kao skladišta električne energije i omogućavaju bolju regulaciju opterećenja.

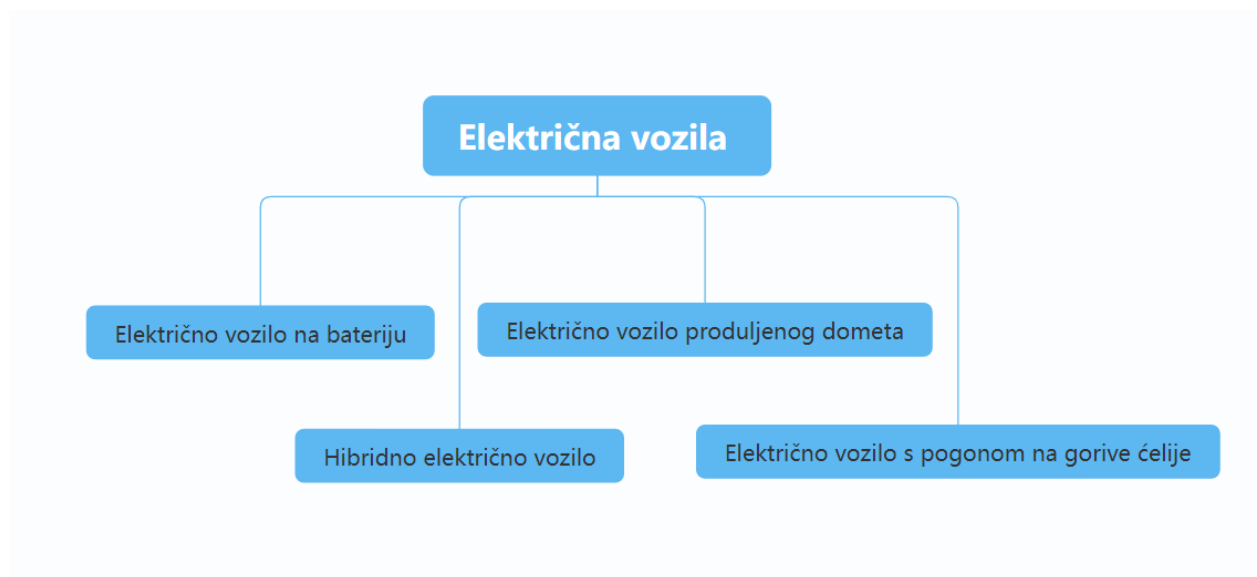
Baza podataka [13] pruža uvid u sve specifikacije električnih vozila kao što je njihova dimenzija, veličina baterije, snaga punjenja ovisno o vrsti punjača te prikazuje i procijenjene domete ovisno o vremenskom dobu. Daje informacije o vrsti tehnologije baterijskih spremnika električnih vozila, tipu baterijske ćelije te kako su one povezane u baterijskom spremniku. Kalkulator cijena električne energije [14] napravljen je od strane Hrvatske Elektroprivrede i koristi se za izračun cijena električne energije u odnosu na odabrani tarifni model.

3. ELEKTRIČNA VOZILA

Električna vozila su sva vozila koja za pogon koriste električnu energiju koja je pohranjena u bateriji. Prema [15], električna vozila se mogu podijeliti na 4 skupine:

- električno vozilo na bateriju (engl. *Battery Electric Vehicle - BEV*),
- hibridno električno vozilo (engl. *Hybrid Electric Vehicle - HEV*),
- električno vozilo produljenog dometa (engl. *Extended Range Electric Vehicle - E-REV*),
- električno vozilo s pogonom na gorive ćelije (engl. *Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV*).

Slika 3.1. vizualno prikazuje podjelu električnih vozila.



Slika 3.1. Kategorizacija električnih vozila

3.1. Hibridno električno vozilo (HEV)

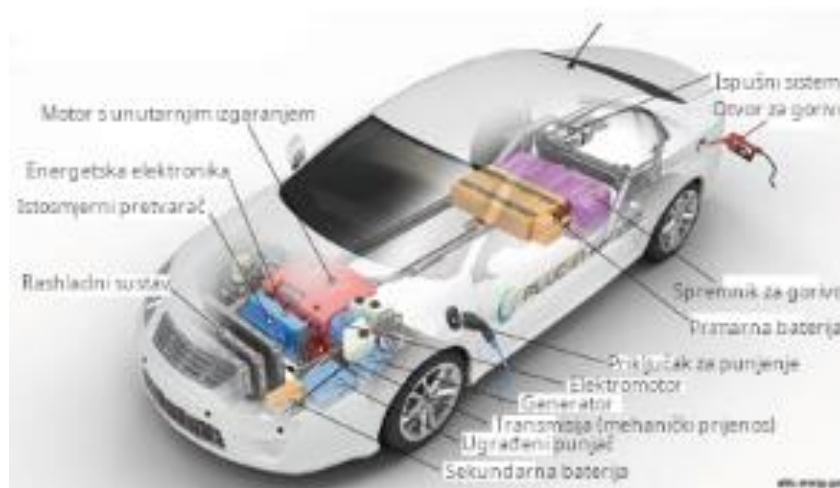
Prema [15], hibridna električna vozila se mogu još podijeliti na nekoliko skupina, a to su:

- Blago hibridno električno vozilo (engl. *Mild Hybrid Electric Vehicle*) – pokreće ga motor s unutarnjim izgaranjem koji je uparen s električnim motorom te on pomaže motoru s unutarnjim izgaranjem kako bi se smanjila potrošnja goriva i poboljšale performanse samog vozila.
- Potpuno hibridno električno vozilo (engl. *Full Hybrid Electric Vehicle*) – isto tako vozilo koje ima motor s unutarnjim izgaranjem, ali električni motor u ovom slučaju može

pokretati vozilo na manjim udaljenostima, dok električna energija je dobivena pri radu motora s unutarnjim izgaranjem.

- Priključno hibridno električno vozilo (engl. *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) – uz motor s unutarnjim izgaranjem postoji električni motor koji energiju troši iz baterije. Navedeno hibridno vozilo može voziti autonomno na električnoj energiji pri većim brzinama i većim udaljenostima. Baterija se može puniti prilikom rada motora s unutarnjim izgaranjem i pomoću spajanja na elektroenergetski sustav.

Hibridna električna vozila su prvi korak u evoluciji električnih vozila na način da pored motora s unutarnjim izgaranjem koriste električni motor napajan iz baterijskih spremnika za pogon.



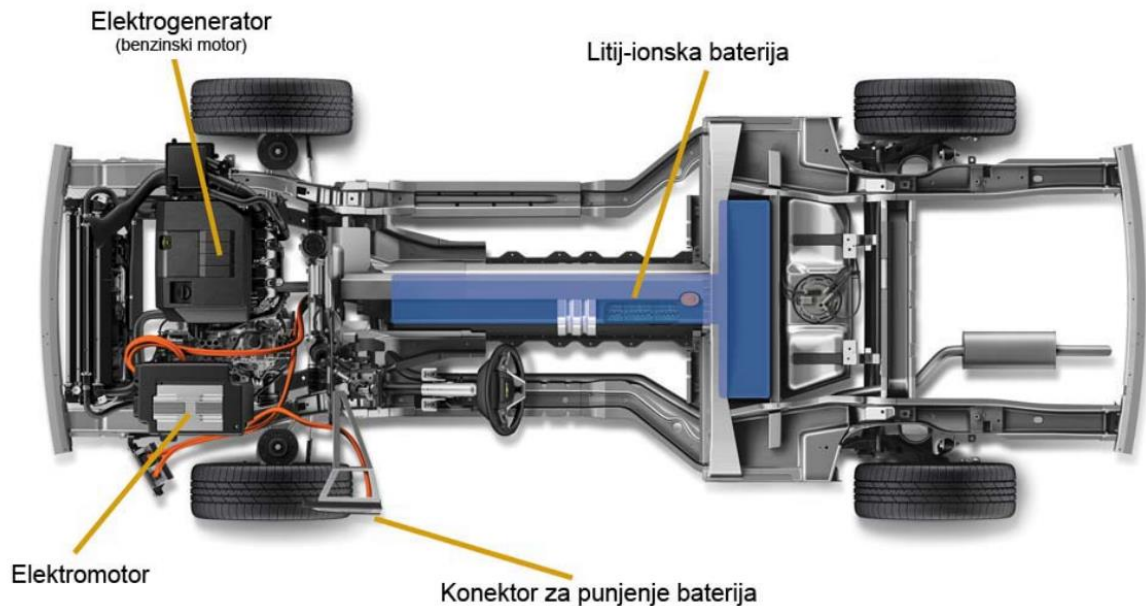
Slika 3.2. Dijelovi *plug-in* hibridnog električnog vozila [16]

Prema trendovima na tržištu najprodavaniji hibrid na području Europe u 2023. godini je Ford Kuga s početnom cijenom od 37700 € te s baterijom veličine 14,4 kWh, dok je Toyota Prius najprodavaniji *plug-in* na svijetu s početnom cijenom od 43830 € i baterijom veličine 13,6 kWh.

3.2. Električno vozilo produljenog dometa (E-REV)

Kako autori u [15] navode, definicija električnih vozila produljenog dometa je sljedeća: "Električno vozilo na bateriju koje ima mali pomoćni motor s unutarnjim izgaranjem koji isključivo radi kao generator za ponovno punjenje baterije." Dakle, električno vozilo produljenog dometa je vozilo koje za pogon koristi električni motor koji je napajan preko baterije, no ta ista baterija se ne mora puniti samo preko vanjskog napajanja nego može i pomoću motora s

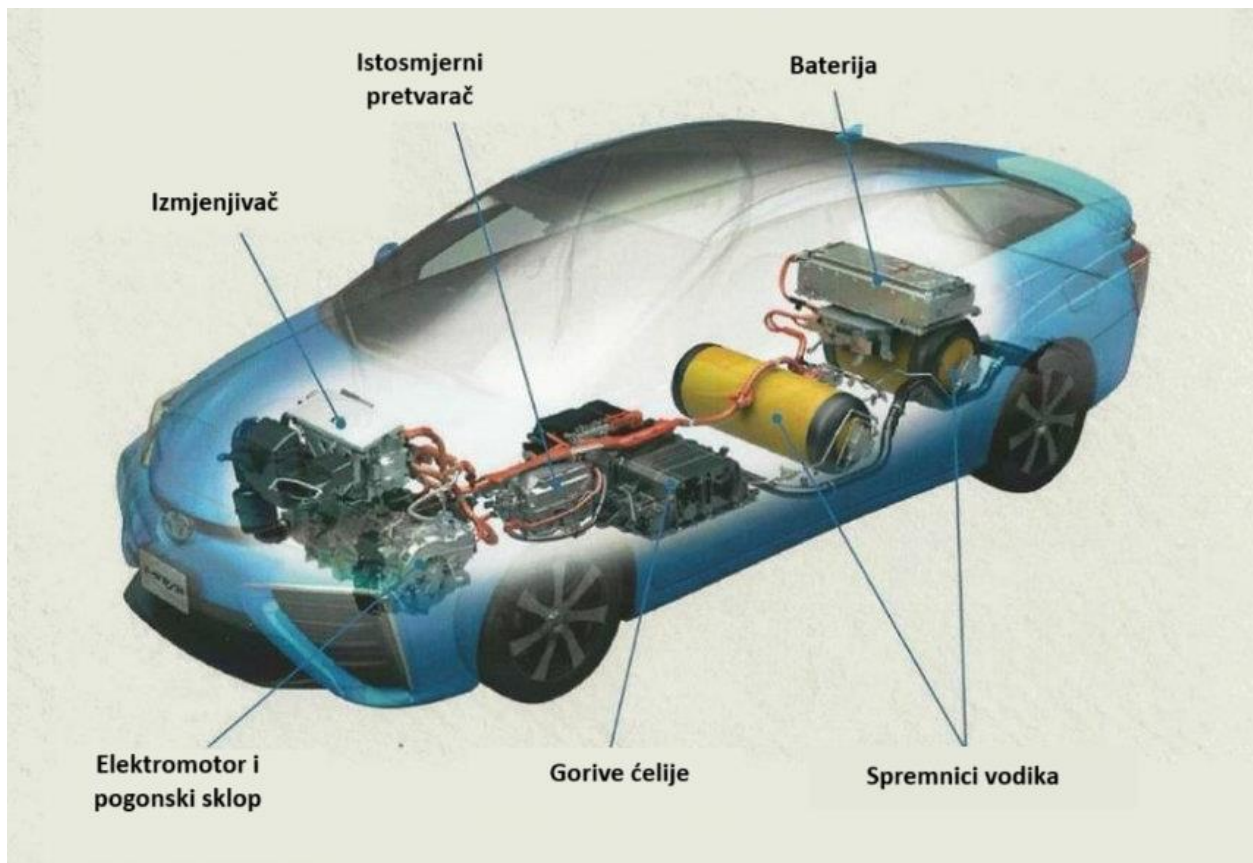
unutarnjim izgaranjem koji je povezan s generatorom. Ovako napravljeno vozilo, s obzirom na vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem, efikasnije je zbog same činjenice da motor s unutarnjim izgaranjem radi u najpovoljnijim uvjetima rada, kao što su broj okretaja, temperatura i opterećenje. Samim time, motori se onda mogu prilagoditi zahtjevima opterećenja i tako biti manji u odnosu na isti auto koji ima samo motor s unutarnjim izgaranjem. Na slici 3.3. mogu se vidjeti dijelovi E-REV vozila [17].



Slika 3.3. Dijelovi električnog vozila produljenog dometa [17]

3.3. Električno vozilo s pogonom na gorive ćelije (FCEV)

Razvitkom tehnologije dolazi se do različitih pristupa rješavanja istog problema, tako pored baterijskih spremnika i takvog načina elektrifikacije vozila postoji i način koji za proizvodnju električne energije koristi gorive ćelije. Goriva ćelija crpi vodik iz spremnika u kojem se nalazi pod tlakom nakon čega se on kemijski spaja s kisikom kako bi pored vode proizveo električnu energiju za pogon elektromotora [18]. Proces se odvija u polimerno elektrolitskoj membrani gorive ćelije koja je sastavljena od niza tankih ploča odvojenih membranama [18]. Na slici 3.4. vidljivi su dijelovi FCEV-a.

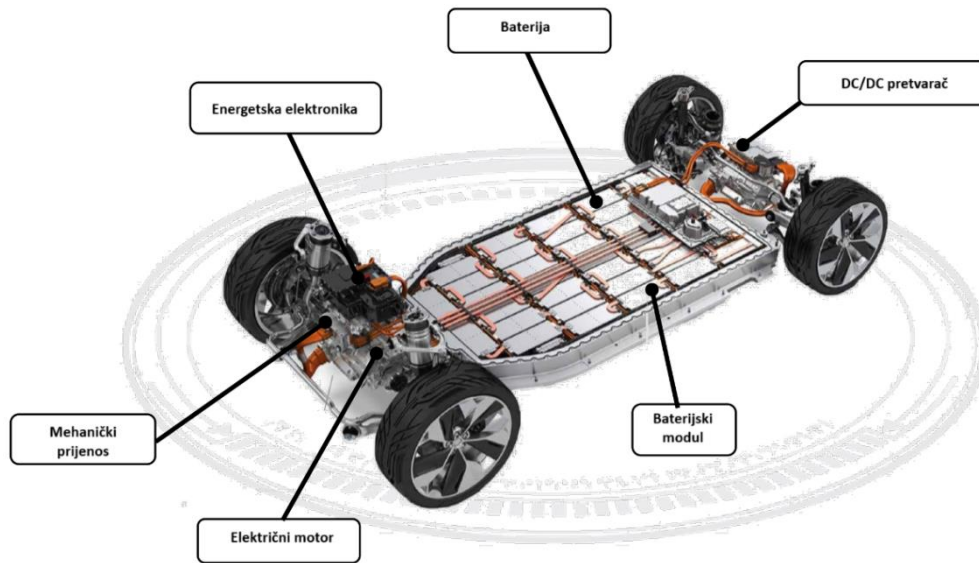


Slika 3.4. Dijelovi električnog vozila s pogonom na gorive ćelije [19].

Na globalnom tržištu, postoji nekolicina vozila koji rade na principu pretvorbe energije pomoću gorivih ćelija. Najprodavanija takva vozila u 2023. godini su marke Hyundai NEXO FCEV koji je prodan u 4709 primjeraka i Toyota Mirai koja je prodana u 3737 primjeraka [20].

3.4. Električno vozilo na bateriju (EV)

Potpuno električno vozilo dobiva se izbacivanjem motora s unutarnjim izgaranjem i ostalih potrebnih dijelova za njegovu funkciju te postavljanjem elektromotora i baterijskih sustava za pohranu električne energije. Takvo vozilo radi na principu pretvorbe, prvo istosmjerne električne energije pohranjene u baterijama u izmjeničnu električnu energiju te iste te izmjenične električne energije putem elektromotora u mehaničku energiju potrebnu za pokretanje vozila. Slika 3.5. prikazuje najbitnije dijelove potpuno električnog vozila [21].



Slika 3.5. Dijelovi potpuno električnog vozila [21].

Trendovi na tržištu pokazuju kako je Tesla Model Y najprodavaniji električni automobil u Europi u 2023. godini s više od 254 tisuća prodanih primjeraka [22]. Za njim slijede Tesla Model 3 s 101 tisuća prodanih primjeraka, Volkswagen ID.4 s 83 tisuće prodanih primjeraka te Škoda Enyaq sa 78 tisuća prodanih primjeraka. Prosječne cijene električnih vozila se kreću oko 45000 €. Stranica za naručivanje Teslinih vozila tako navodi da je početna cijena za Model 3 41990 €, a za Model Y 44990 €. Prema stranici Volkswagena, početna cijena ID.4 je 43104 €, a Škodin Enyaq ima početnu cijenu od 45950 €.



Slika 3.6. Tesla Model Y [23]

Neke od bitnih specifikacija Tesle Model Y nalaze se u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Specifikacije Tesla Model Y [24]

Tip automobila	SUV
Pogon	Pogon na stražnje kotače, pogon na sva četiri kotača (ovisno o izvedbi)
Snaga	220 kW
Okretni moment	420 Nm
Najveća brzina	217 km/h
Domet	250-510 km (ovisno o vanjskoj temperaturi i načinu vožnje)
Nominalni kapacitet baterije	60,0 kWh
Korisni kapacitet baterije	57,5 kWh
Tip baterije	Litij-ion
Nominalni napon baterije	340 V
Masa	1984 kg

4. PUNIONICE ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Kako su današnji baterijski sustavi kompleksni, punjači za iste te baterijske sustave su pomno optimizirani kako bi se ostvarilo najučinkovitije punjenje baterije uz održavanje što duljeg životnog vijeka baterijskog sustava. Danas postoje razne punionice, odnosno punjači za električna vozila. Punionica za električna vozila opskrbljuje električno vozilo s električnom energijom koja se potom pohranjuje u baterijski spremnik.



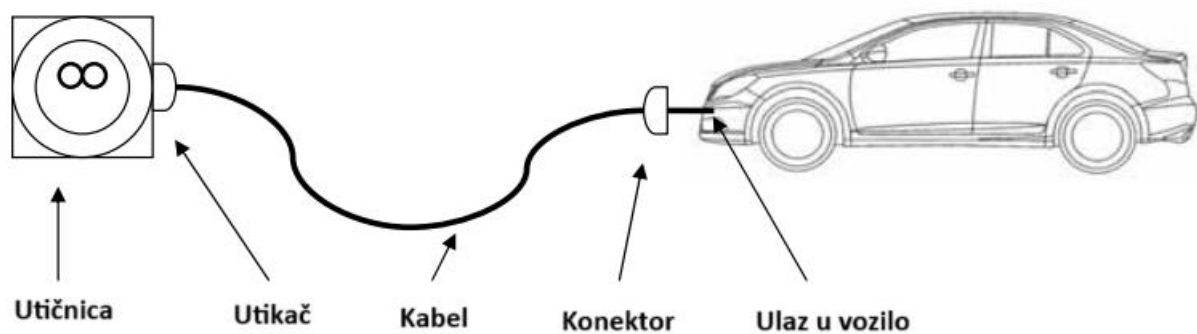
Slika 4.1. ELEN - HEP-ova mreža javnih punionica [25]

Prema vrsti električne energije, punionice se mogu podijeliti na izmjenične i istosmjerne. Izmjenične su više prisutne u kućnim punionicama manjih snaga, dok su istosmjerne punionice za brzo punjenje visokih snaga. Prilikom punjenja električnog automobila pomoću izmjenične električne energije, automobil putem već ugrađenog punjača (engl. *On Board Charger*) ispravlja izmjeničnu struju koja se zatim pohranjuje u baterijski spremnik. Sve više punionica danas je

opremljeno sa sustavima za pametna mjerenja, povezivanja sa sustavom, pametnim načinom punjenja automobila ovisno o cijeni električne energije [26].

Prema [27], godine 2011. Europsko udruženje proizvođača automobila (engl. *European Automotive Manufacturers' Association - ACEA*) definiralo je sljedeće pojmove:

- Utičnica: priključak na opremi za napajanje električnih vozila (engl. *Electric Vehicle Supply Equipment - EVSE*) koji opskrbljuje vozilo električnom energijom za punjenje
- Utikač: kraj fleksibilnog kabela koji se povezuje s izlaznom utičnicom na EVSE. U Sjevernoj Americi, izlazna utičnica i utikač se ne koriste jer je kabel trajno pričvršćen.
- Kabel: fleksibilni snop vodiča koji povezuje EVSE s električnim vozilom.
- Konektor: kraj fleksibilnog kabela koji se povezuje s ulazom vozila.
- Ulaz vozila: priključak na električnom vozilu koji prima električnu energiju za punjenje.



Slika 4.2. Prikaz pojmova punionice prema ACEA [28]

4.1. Tipovi konektora punjača električnih vozila

Konektori koji su korišteni za punjenje električnih automobila razlikuju se po svojoj funkciji i po vrsti električne energiju koju prenose. Kako bi se olakšalo korištenje punionica, konektori su standardizirani prema međunarodnom standardu Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 62196. Prema [29], postoje četiri vrste konektora:

- Tip 1 – SAE J1772,
- Tip 2 – Mennekes,
- Tip 3 – Kombinirani sustav (COMBO 1 i COMBO 2),
- Tip 4 – CHAdeMO.

4.1.1. Tip 1 – SAE J1772

Društvo inženjera za automobilsku industriju (engl. *Society of Automotive Engineers - SAE*) je prvi put J1772 objavila 2001. godine u Americi i standard utvrđuje specifikacije za punjenje električnih vozila, pokrivajući sve sigurnosne zahtjeve, izgled konektora i ostale specifikacije [30]. Dizajn konektora i ulaza J1772 uključuje 5 pinova, od kojih su 2 namijenjena za izmjeničnu električnu energiju punjenja, 1 za otkrivanje blizine, 1 za uzemljenje i 1 za komunikaciju [30]. Revizija konektora po standardu SAE J1772-2017 definira četiri razine punjenja što se može vidjeti u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Tablica razina punjenja [31]

Način punjenja	Napon (V)	Faza	Maksimalna struja (A)	Snaga (kW)
AC razina 1	120	1	12 ili 16	1,44 ili 1,92
AC razina 2	208 ili 240	1	24 - 80	5,0 – 19,2
DC razina 1	50 – 1000	-	80	80
DC razina 2	50 – 1000	-	400	400



Slika 4.3. Konektor Tip 1 - SAE J1772 [32]

4.1.2. Tip 2 – Mennekes

Konektor je predstavljen 2003. godine od strane tvrtke Mennekes po kojoj je i dobio naziv. Prema standardu IEC 62196 tip 2, konektor 2013. godine postaje službeni konektor Europske unije. Konektor može za punjenje koristiti jednofazno ili trofazno napajanje, maksimalnog napona do

500 V i struje do 300 A [5]. S konektorom tipa 1 dijeli signalni protokol za komunikaciju tako da ne postoje problemi prilikom proizvodnje vozila za različita tržišta.



Slika 4.4. Tip 2 - Mennekes konektor [33]

4.1.3. Tip 3 – Kombinirani sustav (COMBO 1 i COMBO 2)

Ovi konektori su napravljeni kao preinake tipa 1 i tipa 2 konektora. COMBO 1 konektor se koristi u Sjevernoj Americi i podnosi napone do 500 V i struje do 200 A. Najjača snaga punjenja konektora je 80 kW. COMBO 2 konektor se koristi u Europi i podnosi napone do 1000 V i struje do 500 A, a najjača snaga punjenja je 350 kW. Oba konektora za punjenje mogu koristiti izmjenično ili istosmjerno napajanje [5].



Slika 4.5. COMBO 1 konektor [34]



Slika 4.6. COMBO 2 konektor [35]

4.1.4. Tip 4 – CHAdeMO

Konektor tip 4 dizajnirali su japanski proizvođači automobila i namijenjen je samo za istosmjernu punionice. CHAdeMO 1.0, prva verzija konektora koji podržava napon do 500 V i struje do 125 A, dok je maksimalna snaga 62.5 kW. CHAdeMO 2.0 je druga verzija konektora koja omogućava spajanje na napon razine 1000 V, struje 400 A i maksimalne snage punjenja od 400 kW [5]. U razvoju je i treća verzija koja će omogućiti spajanje na napon razine od 1.5 kV, struje 600 A i maksimalne snage punjenja od 900 kW [36].



Slika 4.7. CHAdeMO konektor [37]

4.2. Načini punjenja električnih automobila

Postoje četiri načina punjenja električnih automobila, koji se razlikuju po snazi i brzini punjenja, vrsti električne energije kojom se puni vozilo i mjestu punjenja. Po mjestu punjenja razlikujemo kućne, javne i polujavne punionice.

Kako autori u radu [5] navode, prvi način punjenja je punjenje pomoću izmjenične struje putem kućne utičnice i najčešće se koristi za punjenje lakih električnih vozila. Automobili koji se pune putem kućne utičnice moraju imati ugrađeni punjač kako bi se baterija mogla puniti. Jedan od najvećih problema prvog načina punjenja je nedostatak zaštitnog uređaja, pa zbog toga može doći do pregrijavanja kabela. Iz tog razloga je ovaj način punjenja zabranjen u većini europskih zemalja. Snaga punjenja se kreće od 2 kW do 3.7 kW.

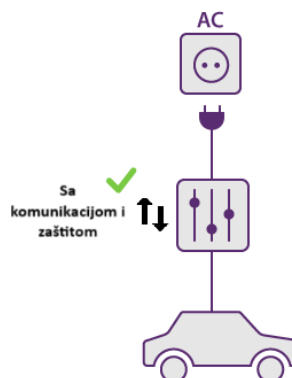
Drugi način punjenja je pomoću jednofazne ili trofazne kućne utičnice, dakle slično kao i prvi način, samo što u ovom slučaju postoji zaštitni uređaj. Komunikacija se uspostavlja između vozila i zaštitnog uređaja, kako bi se mogla prilagoditi snaga punjenja te kako ne bi došlo do preopterećenja kabela. Kod ovog načina punjenja snaga kod jednofazne utičnice može biti do 7 kW i do 22 kW na trofaznoj utičnici.

Treći način punjenja je pomoću trofazne punionice, koje mogu biti kuće ili javne. Ovaj način je najbrži način punjenja na izmjeničnoj struji, a snage punjenja su u rasponu od 22 kW do 43 kW, gdje se za kućne punionice koriste slabije varijante, a za javne jače.

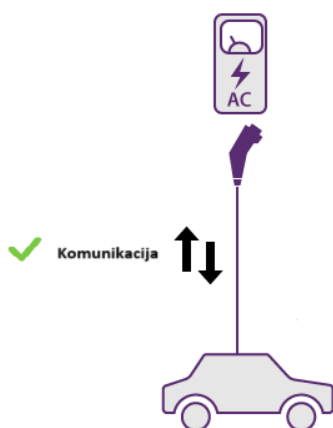
Četvrti način punjenja je pomoću istosmjerne struje i predstavlja najbržu varijantu punjenja vozila. Koristi se u javnim punionicama velikih snaga kako bi se smanjilo vrijeme čekanja punjenja baterije prilikom dužih putovanja. Slike 4.8. – 4.11. prikazuju različite načine punjenja.



Slika 4.8. Način 1 - punjenje pomoću kućne utičnice bez zaštitnog uređaja [38]



Slika 4.9. Način 2 - punjenje pomoću kućne utičnice sa zaštitnim uređajem [38]



Slika 4.10. Način 3 - punjenje pomoću kućne ili javne punionice, izmjenična struja [38]



Slika 4.11. Način 4 - punjenje pomoću javne punionice, istosmjerna struja [38]

4.3. Pregled karakteristika na tržištu punjača

Kako je već u prethodnom poglavlju navedeno postoje razni načini punjenja električnog vozila te je najčešći način punjenja pomoću kućnih punionica jer one predstavljaju najbolje rješenje punjenja za svakodnevno korištenje vozila. Sporija varijanta punjenja kod kuće je pomoću punjača koji se priključuje na kućnu utičnicu tzv. mobilnog punjača.



Slika 4.12. Teslin mobilni punjač [39]

Tablica 4.2. Karakteristike Teslinog mobilnog punjača [40]

Napon:	230 V 1f ili 400 V 3f
Maksimalna struja:	16 A
Frekvencija:	50 Hz
Dužina kabela:	6 m
Radna temperatura:	-30°C do 50°C

Tablica 4.3. Snage punjenja mobilnog punjača [40]

Napon: 230 V	
Struja:	Snaga:
16 A	3.6 kW
Napon: 400 V	
Struja:	Snaga:
16 A	11 kW

Brzina punjenja, odnosno vrijeme za koje će se vozilo napuniti ovisi o snazi punjenja baterije i njezinoj veličini.

Pored mobilnog punjača, Tesla u svojoj ponudi ima i kućni punjač pod nazivom *Tesla Wall Connector*. Punjač se postavlja na za njega predviđeno mjesto te se povezuje na električnu instalaciju objekta. Punjač se mora nalaziti na zasebnom strujnom krugu i mora koristiti propisane zaštitne uređaje. *Tesla Wall Connector* se isto tako može koristiti kao javna punionica, npr. postavljanjem više punjača na parkiralište zgrada ili tržnih centara gdje se do četiri punjača mogu povezati na jedan krug instalacije. Prilikom takvog povezivanja punjači komuniciraju zajedno i smanjuju snagu punjenja ovisno o broju priključenih vozila [41]. Cijena punjenja električnog vozila ovisi o tarifi koju korisnik ima kod opskrbljivača električne energije. Cijena *Tesla Wall Connector-a* je 549 €, a karakteristike se nalaze u tablici 4.4. [41].

Tablica 4.4. Karakteristike punjača

Napon:	400 V
Maksimalna struja:	32 A
Snaga:	22 kW
Frekvencija:	50 Hz
Radna temperatura:	-30°C – 50°C
Duljina kabela:	7,3 m

Kako je kompanija Tesla doživjela globalan uspjeh i uspjela pokazati kako električna vozila mogu biti budućnost, tako su pored kućnih punionica morali razviti i brze punionice velikih snaga. Danas su Tesline brze punionice prisutne u cijelom svijetu, no u Hrvatskoj je broj Teslinih brzih punjača još uvijek malen i postoje na svega 9 lokacija. Pored Teslinih brzih punionica, Hrvatska Elektroprivreda (HEP) ima svoju mrežu brzih DC punionica pod nazivom ELEN, raspoređenih po cijeloj Hrvatskoj. Cijene na ELEN punionicama određuje sam HEP i kako je navedeno u cjeniku [42].

Tablica 4.5. Cijene električne energije na ELEN punionicama [42]

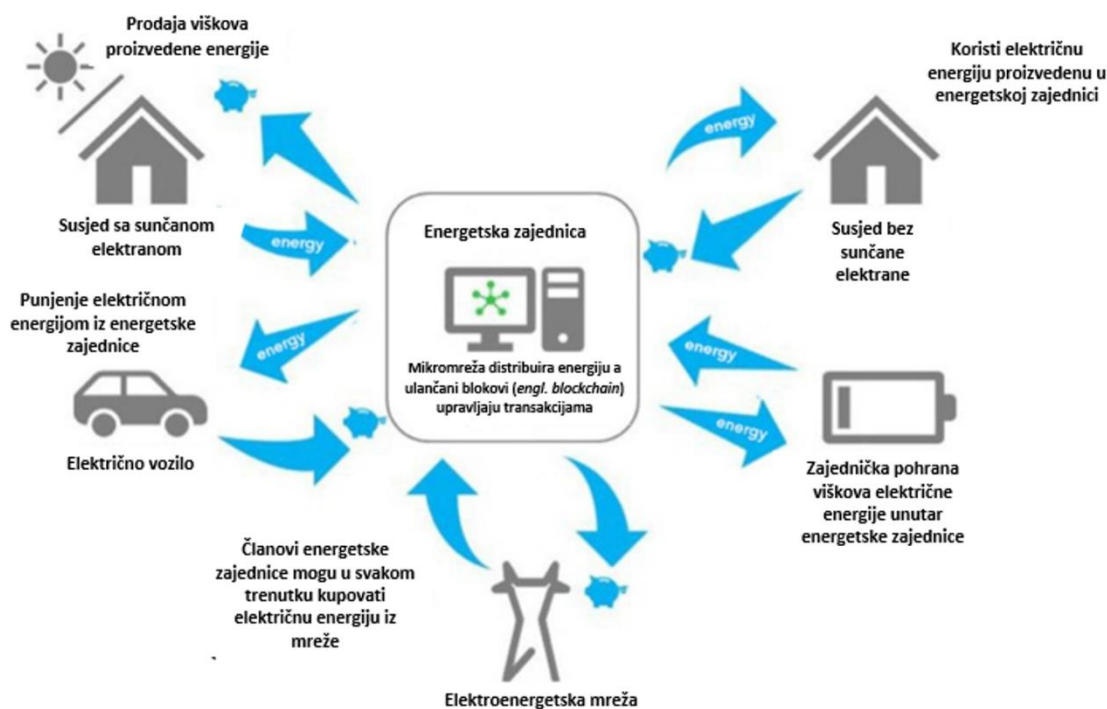
	Punjenje na priključcima nazivne snage do 22,1 kW	Punjenje na priključcima nazivne snage od 22,2 kW do 50 kW.	Punjenje na priključcima nazivne snage iznad 50 kW
Punjenje električnog vozila izvan autocesta	0,29 €/kWh	0,40 €/kWh	
Punjenje električnog vozila na autocesti (od 1.10. do 31.5.)	0,36 €/kWh	0,46 €/kWh	0,66 €/kWh
Punjenje električnog vozila na autocesti (od 1.6. do 30.9.)	0,45 €/kWh	0,62 €/kWh	0,85 €/kWh

5. ENERGETSKA ZAJEDNICA GRAĐANA

Definicija energetske zajednice građanina glasi: "Energetska zajednica građana u zakonu Republike Hrvatske je pravna osoba koja se temelji na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju te je pod stvarnom kontrolom članova ili vlasnika udjela koji su fizičke osobe, lokalna tijela, uključujući općine, ili mala poduzeća, 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 koji mogu sudjelovati u gotovo svim aktivnostima vezanim uz proizvodnju i korištenje električne energije." Pored energetske zajednice građana postoje i zajednice obnovljivih izvora energije gdje je razlika u odnosu na energetske zajednice građana ta da se one usredotočuju na širenje i lokalno korištenje svih oblika obnovljivih izvora energije. [6]

Energetske zajednice građana su nastale 2019. godine na inicijativu Europske unije kao jedan od ciljeva paketa pod nazivom "Čista energija za sve Europljane" [43]. Usluge koje mogu pružiti energetske zajednice građana su: proizvodnja, opskrba, potrošnja, dijeljenje, distribucija, elektromobilnost. Trenutno u Hrvatskoj postoji samo jedna energetska zajednica građanina sa sjedištem u Rugvici, Zagrebačka županija. Članovi zajednice su 4 obiteljske kuće u ulici s ukupnom instaliranom snagom od 3,6 kW. Radi se i na osnivanju druge energetske zajednice u Ivanić-Gradu [44].

Glavni ciljevi energetske zajednice su lokalna proizvodnja i potrošnja energije iz obnovljivih izvora energije kao što je energija sunčevog zračenja, energija vjetra, energija vode i drugo, a sve u cilju smanjenja ovisnosti o tradicionalnim izvorima energije. Pored toga, cilj je i integracija pametnih sustava, kao što su pametni punjači električnih automobila, pametna brojila, pametni kućanski uređaji, kako bi se postigla što bolja regulacija i iskoristivost proizvedene energije. Kako bi se to ostvarilo same energetske zajednice građanina moraju imati mogućnost investiranja i razvoja projekata na pojedinačnim objektima svojih članova, kao i na objektima javnih tijela i površinama u privatnom i javnom vlasništvu [6].



Slika 5.1. Koncept energetske zajednice građanina [45]

Uvođenje energetske zajednice građana omogućit će formiranje zajednica u područjima s većom gustoćom naseljenosti, gdje postoje korisnici zainteresirani za korištenje električne energije iz obnovljivih izvora, ali koji nemaju dovoljno prostora ili mogućnosti za instalaciju vlastitih proizvodnih sistema. Navedeno će omogućiti povezivanje s korisnicima koji imaju dovoljno prostora za instalaciju proizvodnih postrojenja i adekvatan kapacitet priključka, ali čija je vlastita potrošnja električne energije niža, odnosno mogu osigurati energiju članovima energetske zajednice [6].

Formiranjem ovakvih zajednica, potrošači bez prostora za vlastita postrojenja moći će koristiti viškove energije proizvedene od drugih članova zajednice. Ovo će osigurati optimalno iskorištavanje viška proizvedene energije, čime će se potaknuti učinkovitije korištenje obnovljivih izvora energije i smanjiti ovisnost o konvencionalnim izvorima energije.

Prema [46], energetska zajednica građanina ima pravo na:

- proizvodnju, potrošnju i pohranu električne energije, kao i sudjelovanje na tržištu električnom energijom,

- pristup svim tržištima energije, direktno ili preko agregatora,
- dijeljenje energije među svojim članovima prema unaprijed definiranom ključu, odnosno shemi dijeljenja energije.

5.1. Postupak osnivanja energetske zajednice građanina

Preliminarni korak pri osnivanju energetske zajednice građana (EZG) je početna ideja o osnivanju. Unutar toga koraka je određivanje lokacije i analiza fizičkih, odnosno pravnih osoba kao i javni poziv. Radi što većeg odaziva ljudi, organiziraju se prezentacije kako bi se oni upoznali s ciljem osnivanja. Nakon odluke o osnivanju EZG slijedi definiranje oblika i modela EZG, kao i definiranje obavljanja djelatnosti u EZG. Kad se to sve učini slijedi izrada projekta, financijska analiza i financiranje EZG. Financiranje je moguće uz pomoć bankarskih kredita, *leasinga*, *crowdfundinga* te subvencija [46].

U Hrvatskoj je najpristupačnija instalacija solarnih elektrana te njihovo povezivanje u energetske zajednice građanina. Instalacijom solarne elektrane, članovi energetske zajednice građanina ili pojedinci s instaliranom elektranom mogu postati kupci s vlastitom proizvodnjom (engl. *Prosumer*), neovisno o tome jesu li formalno povezani u okviru energetske zajednice ili su samo spojeni na mrežu kao potrošači s vlastitom proizvodnjom. Kupac s vlastitom proizvodnjom, drugog naziva aktivni kupac, krajnji je kupac električne energije na čiju je instalaciju priključeno proizvodno postrojenje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije ili visokoučinkovite kogeneracije kojom se podmiruju potrebe krajnjeg kupca i s mogućnošću isporuke viška proizvedene električne energije u prijenosnu ili distribucijsku mrežu [47].

5.2. Proizvodnja i potrošnja električne energije u EZG

Proizvodnja električne energije u EZG se temelji na korištenju obnovljivih izvora energije (OIE). U Hrvatskoj su najzastupljenije fotonaponske elektrane zbog svoje velike dostupnosti kako sunčeve energije tako i komponenti za izradu istih, no postoje još OIE kao što su vjetroelektrane, bioplinska postrojenja ovisno o visini ulaganja članova i zahtjevima EZG [48].

Proces instalacije fotonaponske elektrane i njezinog priključenja na elektroenergetsku mrežu prvenstveno ovisi o snazi same elektrane. Za postrojenja do 500 kW nazivne snage koristi se jednostavniji priključak, dok je za postrojenja iznad 500 kW potreban složeniji priključak. Većini energetskih zajednica građanina bit će dovoljna postrojenja snage do 500 kW. Prema [46], postupak priključenja na mrežu je sljedeći:

- izdavanje elektroenergetske suglasnosti,
- izdavanje potvrde glavnog projekta,
- uplata naknade za priključenje,
- izgradnja priključka,
- sklapanje ugovora o korištenju mreže,
- stavljanje priključka pod napon,
- izdavanje potvrde o početku korištenja mreže,
- pokusni rad i izdavanje potvrde za trajni rad.

Sustavi za proizvodnju električne energije unutar energetske zajednice građana najčešće se spajaju na najnižu naponsku razinu elektroenergetske mreže i u većini slučajeva na istu transformatorsku stanicu [6].

Potrošnja električne energije unutar EZG, održava raznolikost potreba i aktivnosti članova zajednice i kako je bit EZG da se što više proizvedene energije potroši u samoj zajednici, koriste se pametni sustavi koji pomažu u optimizaciji, praćenju i predviđanju potrošnje. Ključne komponente pametnog sustava su: pametna brojila, pametni uređaji, uređaji za komunikaciju, sustavu za praćenje i analizu te električna vozila [49].

Pametna brojila služe za dvosmjerno mjerenje i prijenos podataka o potrošnji i proizvodnji električne energije u stvarnom vremenu. U sustavima koji su povezani kao što su EZG, brojila moraju biti precizna, imati mogućnost daljinskog očitavanja i mogućnost analize podataka.

Kako bi se što bolje iskoristio potencijal koji pružaju EZG, njihovi članovi bi trebali imati pametne uređaje, kao što su pametne punionice za automobile koje prate stanje na tržištu električne energije kao i proizvodnju iz OIE i tako pune automobil na najefikasniji način. Pored toga pametni uređaji bi se trebali najviše koristiti kod većih potrošača, bilo to u kućanstvu ili industriji, koja isto tako može biti dio EZG (manja i srednja poduzeća). Pod to spadaju dizalice topline, perilice posuđa, perilice rublja, sušilice rublja i slično, odnosno uređaji koji se u toku dana mogu isključiti i ponovno uključiti bez gubitka komfora korisnika.

Jedna od bitnijih stavaka koje EZG moraju imati je komunikacijska infrastruktura. Stalna povezanost i razmjena podataka o potrošnji i proizvodnji su ključna kako bi EZG bile što efikasnije. Još jedna od stavaka su i sustavi za praćenje i analizu pojedinih članova i cijelog sustava kako bi se mogli predvidjeti neki problemi ili otkriti neefikasnosti u sustavu [49].

5.3. Cijena električne energije

Cijena električne energije može se vidjeti na stranicama Hrvatske elektroprivrede. Za kućanstvo na dan 20.8.2024. godine, prema dvotarifnom modelu "Bijeli", cijene električne energije zajedno s naknadom za prijenos i distribuciju iznose 0.05926 €/kWh za nižu tarifu (NT) te 0.127 €/kWh za višu tarifu (VT) [50]. Ovim cijenama električne energije dodaje se još „Naknadna za obnovljive izvore i visokoučinkovite kogeneracije“ u iznosu od 0.013239 €/kWh i PDV od 13%. Iz toga cijena za višu tarifu iznosi:

$$C_{VT} = (0.127 + 0.013239) \cdot 1.13 = 0,158 \text{ €/kWh} \quad (5-1)$$

Dok cijena za nižu tarifu iznosi:

$$C_{NT} = (0.05926 + 0.013239) \cdot 1.13 = 0,08 \text{ €/kWh} \quad (5-2)$$

Za poduzetnike na dan 20.8.2024. godine cijene iznose 0,201 €/kWh za višu tarifu i 0,120 €/kWh za nižu tarifu [51]. U ove cijene su uračunate naknade za prijenos i distribuciju te za obnovljive izvore energije i visokoučinkovite kogeneracije kao i PDV od 13%. Prikazane tarife još imaju i sezonske promjene prema zimskom i ljetnom računanju vremena, dakle u ljetnom računanju vremena VT je od 08-22 sata, a NT od 22-08 sati. Kod zimskog računanja vremena VT je od 07-21 sati, a NT od 21-07 sati. No kako se ovdje radi o aktivnom kupcu, cijena električne energije koju oni predaju u elektroenergetski sustav iznosi 90% prosječne cijene ukupne električne energije kupljene iz sustava u obračunskom razdoblju bez uključenih naknada i poreza uz uvjet da iznos predane električna energija ne prelazi iznos kupljene električne energije [11]. Radi jednostavnosti pretpostavlja se kako je ista količina energije potrošena u obje tarife, iz toga slijedi kako je cijena prodane energije 0,050 €/kWh, što je prikazano u jednadžbi 5-3.

$$C_P = 0.9 \cdot \frac{0.074789 + 0.036697}{2} = 0.050 \text{ €/kWh} \quad (5-3)$$

Cijena prodane električne energije za poduzetnike iznosi 50% jedinstvene dnevne tarife za kućanstva, što u ovom slučaju iznosi:

$$C_{PP} = 0.070276 \cdot 0.5 = 0.035 \text{ €/kWh} \quad (5-4)$$

Formiranje cijene električne energije na lokalnom tržištu nije striktno zadano i ovisi o samim sudionicima i njihovom dogovoru. U ovom diplomskom radu cijena na lokalnom tržištu će se formirati iz cijena investicije i dogovora pojedinih sudionika. Uz to, nadodat će se naknada za distribuciju električne energije koja će se plaćati HEP-u. Snage instaliranih fotonaponskih elektrana pojedinih članova energetske zajednice prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Snage instaliranih fotonaponskih elektrana pojedinih članova korišten u diplomskom radu

Član energetske zajednice	Snaga instalirane PV elektrane
Korisnik 1. (Kućanstvo)	5 kW
Korisnik 2. (Poduzetnik)	100 kW
Korisnik 3. (Kućanstvo)	5 kW
Korisnik 4. (Kućanstvo)	4 kW
Korisnik 5. (Kućanstvo)	6 kW
Korisnik 6. (Kućanstvo)	3,4 kW

Kako navode autori [52], prosječna cijena za instalaciju 1 kW solarne elektrane je od 1200 € do 1500 € plus dodatni troškovi zamjene brojila od 400 €, izrada glavnog projekta oko 500 € i odobrenje HEP-a za mrežni priključak od 400 €. Formirana cijena bi trebala poticati ljude na učlanjivanje u energetska zajednicu i samim time smanjivati se s brojem članova. U ovom slučaju cijena električne energije bi iznosila 0,06318 €/kWh kako bih se djelomično pokrili troškovi održavanja fotonaponske elektrane članova i distribucija električne energije. Izračun te cijene prikazan je u jednadžbi 5-5.

$$C_{LK} = 0.050 + 0.01318 = 0.06318 \text{ €/kWh}, \quad (5-5)$$

gdje je 0,050 € iznos koji predstavlja trošak za pokrivanje distribucije električne energije, a 0,01318 € iznos koji predstavlja trošak koji bi služio za pomoć članovima energetske zajednice prilikom održavanja fotonaponskih elektrana.

5.4. Pohrana električne energije pomoću baterijskih sustava

Kako je proizvodnja iz fotonaponskih elektrana nepredvidiva, a nastoji se je što više iskoristiti, potrebno je instalirati baterijske sustave za pohranu električne energije. Postoje dvije vrste baterijskih sustava, ovisno o njihovoj namjeni – primarne i sekundarne. U slučaju energetske zajednice građana i električnih automobila koriste se sekundarne baterije iz razloga što se mogu puniti i prazniti u ciklusima. Litij-ionske baterije predstavljaju najčešće korištenu tehnologiju u

baterijskim sustavima. One imaju visoku energetska gustoću, što omogućava da su za velike kapacitete potrebni manji volumeni. Dugog su vijeka trajanja i imaju brzu reakciju, odnosno mogu se puniti i prazniti brže od npr. olovno-kiselinskih baterija. Također, one imaju i svoje nedostatke, najveći nedostatak je visoka cijena baterija. S druge strane, olovno-kiselinske baterije su jeftinije i samim time pristupačnije, pouzdanije su od litij-ionskih baterija, no nemaju karakteristike koje imaju litij-ionske. Kao pohranu u energetske zajednice građana pored samostalnih stacionarnih baterijskih sustava mogu se koristiti i električni automobili koji mogu prazniti svoju bateriju i tako električnu energiju po potrebi prodavati u elektroenergetski sustav.

5.5. Pohrana električne energije pomoću baterijskih sustava električnih automobila

V2G je tehnologija koja pruža više fleksibilnosti i ekonomičnosti prilikom pohrane električne energije, ne samo u energetske zajednice građana, nego i kod samostalnih korisnika elektroenergetskog sustava. V2G tehnologija pruža mogućnost pražnjenja i punjenja baterijskog spremnika električnog automobila ovisno o potrebama i situacijama unutar elektroenergetskog sustava [53]. Ovo se naravno može primijeniti i na ekonomskoj razini tako da se električna energija kupljena po jeftinijoj cijeni na tržištu pohranjuje u bateriju i potom se prodaje u elektroenergetski sustav po većoj cijeni. To može biti korisno u slučaju energetske zajednice građana pošto bi se električna energija kupljena po jeftinoj cijeni na tržištu, koristila unutar energetske zajednice građana kako bi članovima energetske zajednice građana smanjili troškovi. Kako bi ova tehnologija bila učinkovita, električni automobil kada je parkiran mora biti priključen na elektroenergetski sustav preko punjača, što i nije problem jer kako prikazuju istraživanja električni automobili 90% vremena stoje parkirani [53].

Ono što omogućuje dvosmjerni prijenos energije između energetske zajednice građana i baterijskog sustava električnog automobila je dvosmjerni pretvarač koji se sastoji od dvosmjernog izmjenično-istosmjernog pretvarača i dvosmjernog istosmjernog pretvarača [53].

6. MATEMATIČKI MODEL

Optimizacijski model u diplomskom radu razvijen je u programskom paketu GAMS (engl. *General Algebraic Modeling System*). GAMS je napredni sustav za matematičko modeliranje i optimizaciju, specijaliziran za rješavanje linearnih, nelinearnih kao i mješovito cjelobrojnih linearnih i nelinearnih problema. GAMS programski paket se sastoji od jezičnog prevoditelja i niza povezanih prevoditelja (engl. *Compiler*). Za rješavanje optimizacijskog problema koriste se razni *solver-i* koji imaju različite funkcije ovisno o tipu modela. U okviru ovog rada, GAMS je korišten za minimizaciju ukupnog troška energetske zajednice građana. Optimizacijski model razvijen je pomoću mješovito cjelobrojnog linearnog programiranja [54] (engl. *Mixed Integer Linear Programming*, MILP) u kombinaciji s CBC (engl. *Coin-or Branch and Cut*) *solver-om*. CBC *solver* je otvoreni kod i dostupan je svim korisnicima GAMS programskog paketa. Za rješavanje problema koristi *Branch and Cut* algoritam, koji kombinira tehniku *Branch and Bound* s metodama generiranja reznih ravnina [55]. To omogućuje učinkovito istraživanje prostora rješenja kako bi se pronašlo optimalno rješenje. Proces optimizacije obuhvaća definiranje funkcije cilja i potrebnih ograničenja, koja su ključna za precizno modeliranje stvarnih uvjeta rada elektroenergetskog sustava i lokalnog elektroenergetskog sustava.

6.1. Funkcija cilja za minimizaciju troška rada energetske zajednice

Funkcija cilja, prikazana jednadžbom 6-1, osmišljena je tako da minimizira ukupne troškove električne energije energetske zajednice.

$$\min \left\{ \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (P_k(p, t) \cdot C_{kt}(p, t) - P_p(p, t) \cdot C_{pt}(p, t) + P_{lk}(p, t) \cdot C_c(p, t) - P_{lp}(p, t) \cdot C_c(p, t)) \right\} \quad (6-1)$$

gdje je:

- $P_k(p, t)$ – električna energija koju član energetske zajednice p kupuje iz mreže u trenutku t ,
- $P_p(p, t)$ – električna energija koju član energetske zajednice p prodaje u mrežu u trenutku t ,
- $P_{lk}(p, t)$ – lokalna električna energija koju član energetske zajednice p kupuje u trenutku t ,

- $P_{lp}(p, t)$ – lokalna električna energija koju član energetske zajednice p prodaje u trenutku t ,
- $C_{kt}(p, t)$ – cijena kupovine električne energije iz mreže u trenutku t za člana energetske zajednice p ,
- $C_{pt}(p, t)$ – cijena prodane električne energije u mrežu u trenutku t za člana energetske zajednice p ,
- $C_c(p, t)$ – cijena električne energije unutar energetske zajednice građana za člana energetske zajednice p u trenutku t .

Ograničenje koje osigurava ravnotežu između potrošnje i proizvodnje električne energije zadano je jednadžbom 6-2.

$$\begin{aligned}
 Pd_{p,t} - Ppv_{p,t} + \sum_{ev=1}^{EV} Pchev_{p,ev,t} - \sum_{ev=1}^{EV} Pdchev_{p,ev,t} \\
 = Pimp_{p,t} - Pexp_{p,t} + Plimp_{p,t} - Plexp_{p,t}
 \end{aligned} \tag{6-2}$$

gdje je:

- $Pd_{p,t}$ – iznos snage potražnje za električnom energijom,
- $Ppv_{p,t}$ – iznos snage proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije,
- $Pchev_{p,ev,t}$ – iznos snage ukupne električne energije punjenja baterijskog sustava električnog automobila,
- $Pdchev_{p,ev,t}$ – iznos snage ukupne električne energije pražnjenja baterijskog sustava električnog automobila,
- $Pimp_{p,t}$ – iznos snage električne energije preuzete iz elektroenergetskog sustava,
- $Pexp_{p,t}$ – iznos snage električne energije predane u elektroenergetski sustav,
- $Plimp_{p,t}$ – iznos snage električne energije preuzete iz energetske zajednice
- $Plexp_{p,t}$ – iznos snage električne energije predane u energetska zajednicu.

Razina napunjenosti (engl. *State of Charge - SOC*) baterije električnog automobila se izračunava pomoću izraza (6-3) za prvi korak, a za svaki sljedeći korak koristi se izraz (6-4).

$$SOC_{ev,p,ev,t} = SOC_{ev,p,ev,start} + \eta_{chev} \cdot E_{chev,p,ev,t} - \frac{1}{\eta_{dchev}} \cdot Ed_{chev,p,ev,t} \quad (6-3)$$

$$SOC_{ev,p,ev,t} = SOC_{ev,p,ev,t-1} + \eta_{chev} \cdot E_{chev,p,ev,t} - \frac{1}{\eta_{dchev}} \cdot Ed_{chev,p,ev,t} \quad (6-4)$$

gdje je:

- $SOC_{ev,p,ev,t}$ – razina napunjenosti baterije u trenutku t ,
- $SOC_{ev,p,ev,start}$ – početna razina napunjenosti baterije,
- $E_{chev,p,ev,t}$ – električna energija potrebna za punjenje baterije u trenutku t ,
- $Ed_{chev,p,ev,t}$ – električna energija dobivena pražnjenjem baterije u trenutku t ,
- η_{chev} – efikasnost punjenja baterije,
- η_{dchev} – efikasnost pražnjenja baterije.

Za rad modela potrebno je postaviti ograničenja za kupovinu energije iz mreže i prodaju energije u mrežu, kao i za kupovinu i prodaju energije unutar energetske zajednice. Ta ograničenja su prikazana sljedećim izrazima:

$$0 \leq P_{imp,p,t} \leq P_{imp,p,max} \cdot P_{bimp,p,t} \quad (6-5)$$

$$0 \leq P_{exp,p,t} \leq P_{exp,p,max} \cdot P_{bexp,p,t} \quad (6-6)$$

$$0 \leq P_{limp,p,t} \leq P_{limp,p,max} \cdot P_{bimp,p,t} \quad (6-7)$$

$$0 \leq P_{lexp,p,t} \leq P_{lexp,p,max} \cdot P_{bexp,p,t} \quad (6-8)$$

gdje je:

- $P_{imp,p,max}$ – maksimalna snaga koja se može preuzeti iz mreže,
- $P_{exp,p,max}$ – maksimalna snaga koja se može predati u mrežu,
- $P_{limp,p,max}$ – maksimalna snaga koja se može preuzet iz energetske zajednice građana,
- $P_{lexp,p,max}$ – maksimalna snaga koja se može predati u energetska zajednicu građana,
- $P_{bimp,p,t}$ – binarna varijabla odluke za preuzimanje električne energije iz mreže u trenutku t ,
- $P_{bexp,p,t}$ – binarna varijabla odluke za predaju električne energije u mrežu u trenutku t .

Ograničenja za punjenje i pražnjenje baterije električnog automobila iskazane su sljedećim izrazima:

$$0 \leq P_{chev,p,ev,t} \leq P_{chev,p,ev,max} \quad (6-9)$$

$$0 \leq P_{dchev,p,ev,t} \leq P_{dchev,p,ev,max} \quad (6-10)$$

gdje je:

- $P_{chev,p,ev,max}$ – maksimalna snaga punjenja baterije električnog automobila,
- $P_{dchev,p,ev,max}$ – maksimalna snaga pražnjenja baterije električnog automobila.

Kako bi punjenje i pražnjenje funkcioniralo potrebno je postaviti i ograničenje za razinu napunjenosti baterije što je prikazano sljedećim izrazom:

$$SOC_{ev_{min}} \leq SOC_{ev_{p,ev,t}} \leq SOC_{ev_{max}} \quad (6-11)$$

gdje je:

- $SOC_{ev_{min}}$ – minimalna razina napunjenosti baterije,
- $SOC_{ev_{max}}$ – maksimalna razina napunjenosti baterije.

Ograničenje koje osigurava da sva količina prodane električne energije unutar energetske zajednice bude jednaka kupljenoj električnoj energiji unutar energetske zajednice prikazano je jednadžbom 6-12

$$\sum_{p=1}^P Plimp_{p,t} = \sum_{p=1}^P Plexp_{p,t} \quad (6-12)$$

Kako ne bi došlo do istovremene kupovine i prodaje električne energije, kako iz mreže tako i iz energetske zajednice, postavljeno je ograničenje koje glasi:

$$Pbimp_{p,t} + Pbexp_{p,t} \leq 1 \quad (6-13)$$

7. REZULTATI SIMULACIJE

U ovom dijelu diplomskog rada predstavljeni su rezultati simulacija optimalnog održavanja razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila u okviru dvaju različitih scenarija. Scenariji će analizirati utjecaj različite razine integracije obnovljivih izvora energije na način održavanja razine napunjenosti baterijskih spremnika električnih vozila i troškove za članove energetske zajednice građana.

Prvi scenarij fokusira se na situaciju s niskom integracijom obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice. U ovom scenariju nije u potpunosti iskorišten potencijal energetske zajednice pa se zbog toga veći dio električne energije uvozi iz mreže. Simulacija u ovom scenariju omogućava uvid u učinkovitost baterijskog spremnika električnog automobila kada je smanjena dostupnost električne energije iz obnovljivih izvora. Analizom rezultata, cilj je identificirati razdoblja punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika, kao i troškove za članove energetske zajednice građana.

Drugi scenarij razmatra visoku razinu integracije unutar energetske zajednice građana. Ovdje je iskorišten potencijal energetske zajednice povećanjem proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije. Analiza rezultata za cilj ima pokazati da povećanje integracije obnovljivih izvora energije poboljšava iskorištavanje baterijskog spremnika električnog automobila, uz smanjenje troškova za članove zajednice.

Oba scenarija pružaju važne uvide u način na koji različite razine integracije obnovljivih izvora energije utječu na optimalno korištenje baterijskog spremnika električnog automobila. U ovom dijelu rada prikazani su rezultati simulacije provedene pomoću GAMS-a.

Odabrano vozilo za simulaciju je Volkswagen ID.5 GTX te će u simulacijama svih 5 kućanstava imati isti automobil. Specifikacije automobila su prikazane u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Specifikacije Volkswagen ID.5 GTX [56]

Snaga:	220 kW
Pogon:	AWD
Domet po WLTP:	405 km
Nominalni kapacitet baterije:	82 kWh
Korisni kapacitet baterije:	77 kWh
Baterijska tehnologija:	Litij-ion

Broj ćelija u baterijskom spremniku:	288
Napon:	352 V
Snaga kućnog punjača:	11 kW
Brzina punjenja:	49 km/h
Snaga brzog punjača:	175 kW
Brzina punjenja:	560 km/h
Snaga pražnjenja V2G:	10 kW (DC)



Slika 7.1. Volkswagen ID.5 GTX [56]

Iz istog razloga odabrani kućni punjač je jednak za sve članove energetske zajednice. Odabrani punjač mora imati funkciju povezivanja automobila pomoću V2G tehnologije, jedan takav punjač proizvodi *Highbury*.

Tablica 7.2. Specifikacije *Highbury DC Bi-directional* kućnog punjača [57]

Napon napajanja:	230 V AC
Izlazni napon:	120-500 V DC
Izlazna struja:	30 A
Snaga punjenja:	7 kW DC
Snaga pražnjenja:	7 kW DC



Slika 7.2. *Highbury DC Bi-directional* kućni punjač [58]

Odabrani podaci koji se unose u model su prikazani tablicom 7.3.

Tablica 7.3. Podaci korišteni u modelu

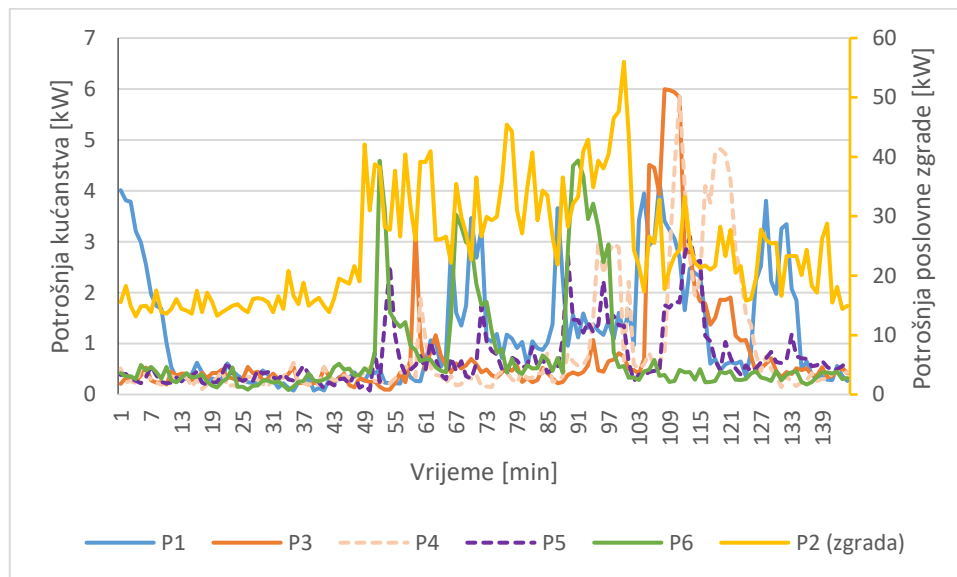
$P_{imp,p,max}$	17,25 kW/120 kW
$P_{exp,p,max}$	6 kW/100 kW
$P_{limp,p,max}$	17,25 kW/120 kW
$P_{lexp,p,max}$	6 kW/100 kW
$P_{chev,p,ev,max}$	7 kW
$P_{dchev,p,ev,max}$	7 kW
η_{chev}	0,96
η_{dchev}	0,95
Kapacitet baterije automobila	77 kWh
$SO_{Cev,max}$	61,6 kWh (80 %)
$SO_{Cev,min}$	7,7 kWh (10 %)
Potrošnja EV automobila	0,190 kWh/km

Dodatni podaci koji se koriste u scenarijima se odnose na količinu prijeđenih kilometra za svakog korisnika, kao i vrijeme koje je potrebno za putovanja. Energetska zajednica sastoji se od 6 članova, od kojih je jedan poduzetnik, a ostali su kućanstva u kojima u svakome ima po jedan 5 električni automobil. Članovi kućanstva rade kod poduzetnika, koji je dio energetske zajednice. Na taj način može se odrediti njihovo dnevno kretanje i vrijeme provedeno u automobilu. Prema istraživanjima većina vlasnika električnih automobila prijelaze u prosjeku između 30 i 40 km dnevno [11]. U obzir se uzima i radno vrijeme od 08:00 – 16:00 h.

Tablica 7.4. Podaci o ukupnom dnevnom putovanju

Član energetske zajednice	Dužina dnevnog putovanja	Vrijeme dnevnog putovanja
Korisnik 1. (Kućanstvo)	40 km	60 minuta
Korisnik 3. (Kućanstvo)	15 km	20 minuta
Korisnik 4. (Kućanstvo)	57 km	80 minuta
Korisnik 5. (Kućanstvo)	33 km	40 minuta
Korisnik 6. (Kućanstvo)	27 km	40 minuta

Sljedeća slika (slika 7.3.) prikazuje potrošnje kućanstava i poslovne zgrade u toku jednog dana.



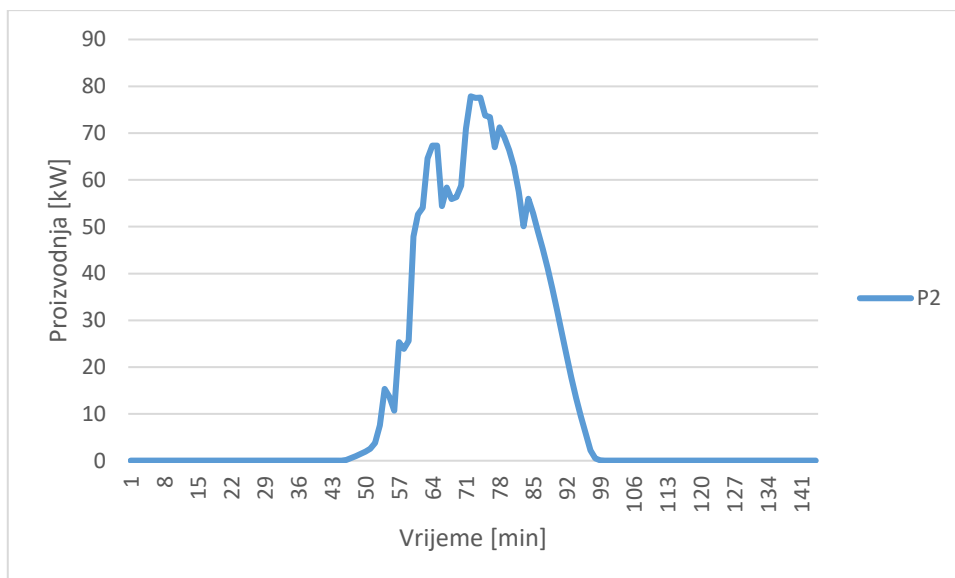
Slika 7.3. Potrošnja električne energije članova energetske zajednice

7.1. Scenarij 1., niska razina integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građana

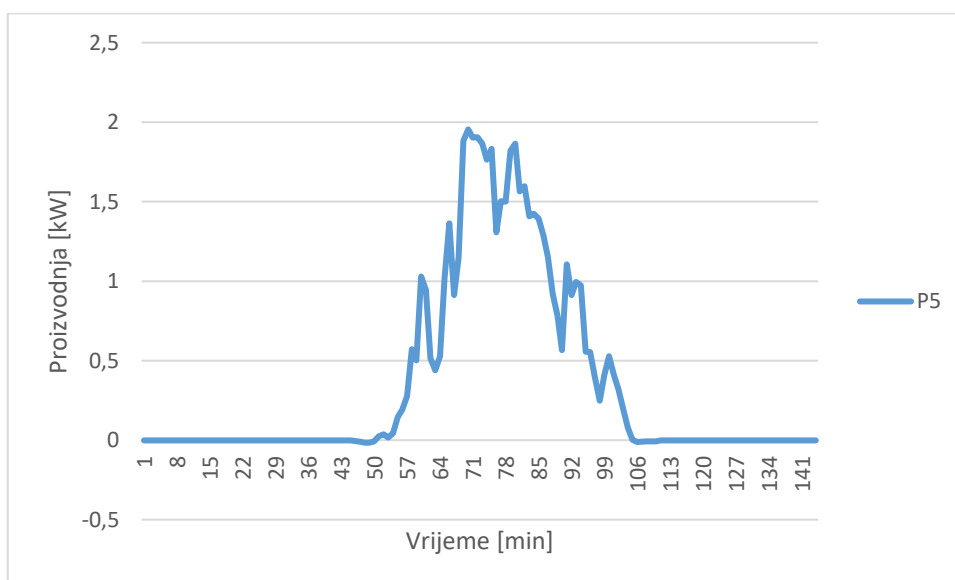
U ovom scenariju promatran je utjecaj niske razine integracije obnovljivih izvora energije na vrijednost funkcije cilja, odnosno iznos troška rada energetske zajednice. Pored električnih automobila i kućnih punjača su i dvije fotonaponske elektrane, jedna na poslovnoj zgradi, a druga kod jednog člana energetske zajednice. Snage tih elektrana prikazane su u tablici 7.5.

Tablica 7.5. Snage instalirane fotonaponske elektrane scenarij 1.

Član energetske zajednice	Snaga instalirane PV elektrane
Korisnik 2. (Poduzetnik)	100 kW
Korisnik 5. (Kućanstvo)	6 kW



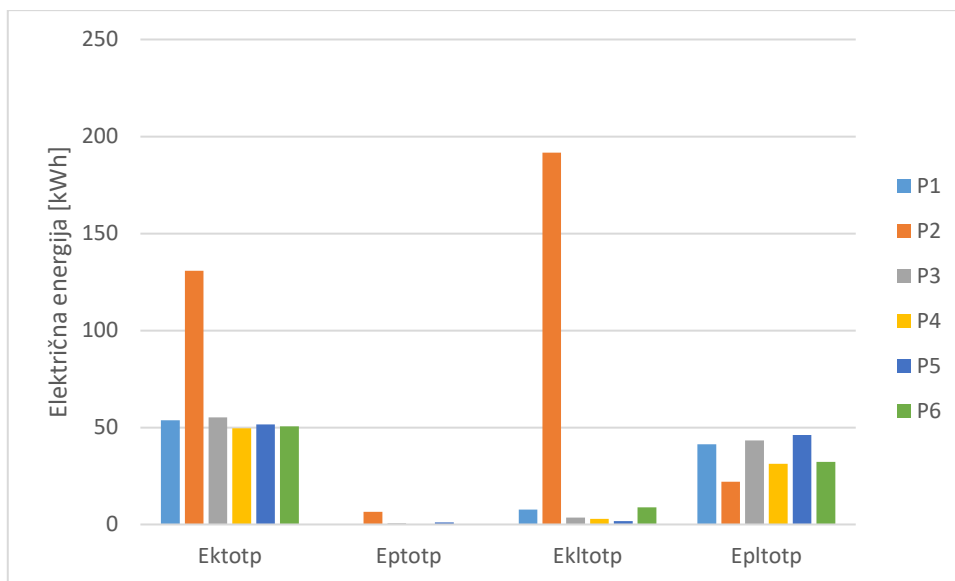
Slika 7.4. Proizvodnja električne energije poslovne zgrade



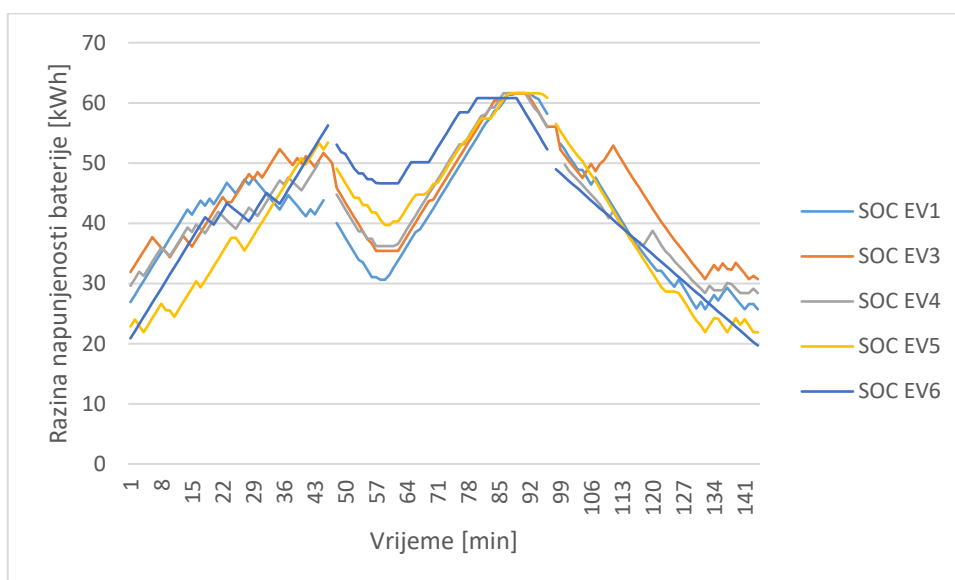
Slika 7.5. Proizvodnja električne energije kućanstva s instaliranom fotonaponskom elektranom

Ograničenje za razine napunjenosti baterije (SOC) postavljeno je na 80% kapaciteta baterije automobila radi smanjenja degradacije.

U nastavku slika 7.6. i slika 7.7. predstavljaju rezultate koji su dobiveni primjenom optimizacijskog modela na scenarij niske razine integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građanina.



Slika 7.6. Razmjena električne energije



Slika 7.7. Razine napunjenosti baterijskih spremnika u električnim vozilima

Analizom grafa na slici 7.6. u kontekstu niske integracije obnovljivih izvora energije unutar zajednice građana, primjećuje se izrazita ovisnost poslovne zgrade (P2) o elektroenergetskom sustavu, odnosno mreži. P2 uvozi daleko veću količinu električne energije iz mreže (*Ektotp*) i lokalnog tržišta (*Ekltotp*) u odnosu na kućanstva (P1, P3, P4, P5, P6), dok je prodaja električne energije u mrežu (*Eptotp*) gotovo zanemariva. Zanemariva je iz razloga što se teži k tome da se

sva električna energija proizvedena od strane članova energetske zajednice proda i kupi ponovno na lokalnom tržištu zbog nižih cijena u odnosu na cijene električne energije iz mreže.

Ovaj obrazac razmijene električne energije ukazuje na nisku razinu proizvodnje iz obnovljivih izvora energije unutar ove energetske zajednice građana, što se posebno očituje kod poslovnog subjekta P2. Ovisnost P2 o elektroenergetskom sustavu implicira da trenutna razina integracije OIE nije dovoljna da bi se značajnije smanjila potrošnja električne energije iz elektroenergetskog sustava i povećala lokalna razmjena električne energije unutar zajednice. S druge strane, kućanstva pokazuju relativno ujednačenu kupnju električne energije iz mreže, ali isto tako i popriličan doprinos prodaji električne energije na lokalnom tržištu. Električna energija od kućanstava na lokalnom tržištu dolazi iz prodaje električne energije iz baterijskih spremnika električnih vozila i proizvedene električne energije iz fotonaponskih elektrana.

Drugi graf (slika 7.7.) prikazuje razine napunjenosti baterijskih spremnika električnih vozila. Jasno se vidi poveznica promjene cijene električne energije i razine napunjenosti baterijskog spremnika. Vozila se pune tijekom noći, kada je jeftinija tarifa, čime se smanjuju troškovi punjenja iz mreže. Maksimalna razina napunjenosti postiže se prije početka skuplje tarife, što ukazuje na učinkovito korištenje jeftinije energije. Nakon što vozila dosegnu određenu razinu napunjenosti dolazi do postupnog opadanja razine napunjenosti zbog korištenja električne energije za putovanje na posao, ali i zbog prodaje električne energije iz baterijskog spremnika automobila na lokalnom tržištu, gdje kao najveći potrošač poslovna zgrada koristi električnu energiju. S time se smanjuju troškovi poslovne zgrade. U toku dana povećanjem proizvodnje iz obnovljivih izvora energije dolazi do punjenja baterija električnih vozila. Kao i prilikom punjenja baterija električnih vozila tijekom jeftinije tarife radi smanjenja troškova, tako i ovdje dolazi do optimalnog korištenja električne energije iz obnovljivih izvora energije. Električna energija kojom su se napunili baterijski spremnici električnih vozila putem punjača na poslovnoj zgradi, koristi za putovanje s posla i nakon toga za napajanje kućanstava u energetske zajednici građana.

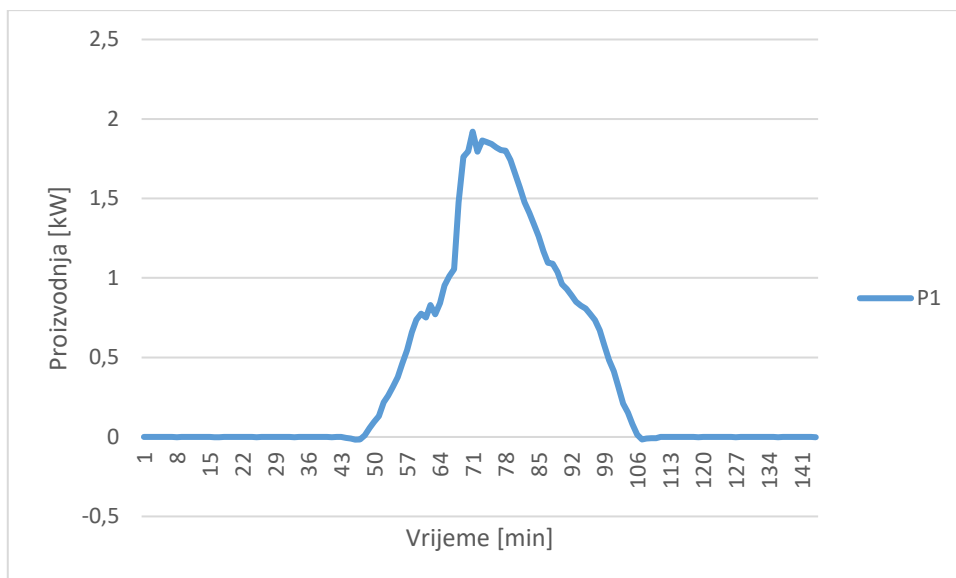
Tablica 7.6. Dnevni trošak rada energetske zajednice

Član energetske zajednice	Trošak
Korisnik 1 (Kućanstvo)	2,93 €
Korisnik 2 (Poduzetnik)	29,80 €
Korisnik 3 (Kućanstvo)	3,02 €
Korisnik 4 (Kućanstvo)	3,12 €
Korisnik 5 (Kućanstvo)	1,49 €
Korisnik 6 (Kućanstvo)	3,10 €

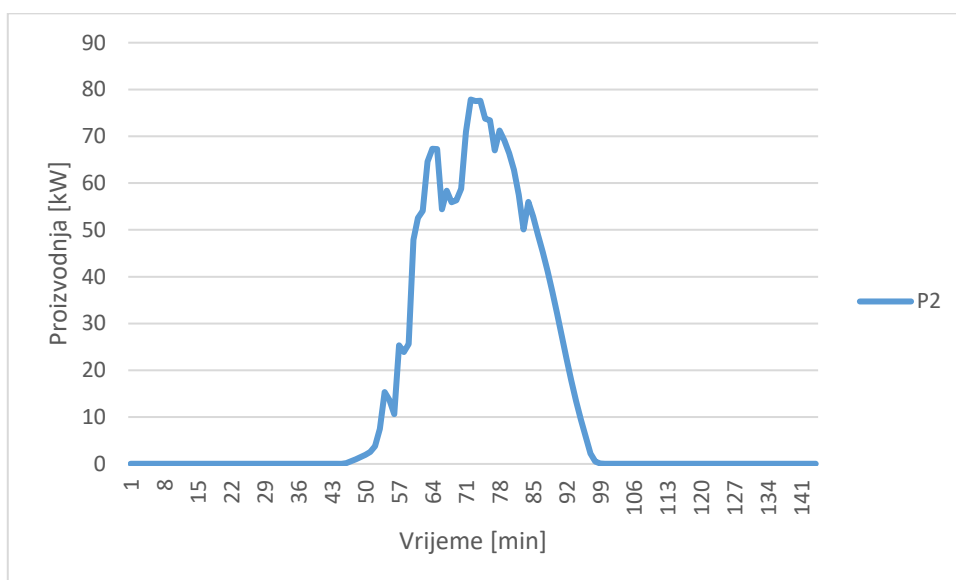
U ovom scenariju, kako je navedeno, promatra se niska integracija obnovljivih izvora energije i to se može vidjeti i u troškovima koji su navedeni u tablici 7.6. gdje je prikazano kako korisnik 5, koji ima fotonaponsku elektranu, ima za oko 50% manje troškove od ostalih kućanstava. Podaci o troškovima dodatno potvrđuju potrebu za boljim iskorištavanjem električne energije iz obnovljivih izvora energije i baterijskih spremnika električnih automobila. Integracija obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice, zajedno s pametnim upravljanjem napunjenosti baterijskih sustava, mogla bi značajno smanjiti ove troškove.

7.2. Scenarij 2. visoka razina integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građana

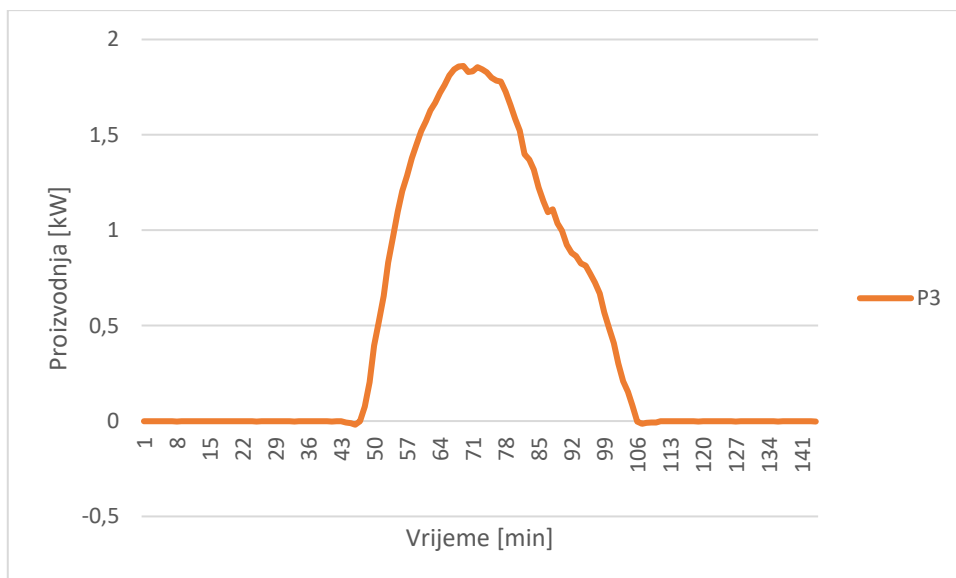
U ovom scenariju promatran je utjecaj visoke integracije OIE na iznos troška rada energetske zajednice građana. Cilj je prikazati kako povećanje proizvodnje iz OIE može minimizirati troškove članovima energetske zajednice. Podaci koji se koriste nalaze se u tablici 5.1. Proizvodnja pojedinih članova energetske zajednice prikazana je sljedećim slikama (7.8. – 7.13.).



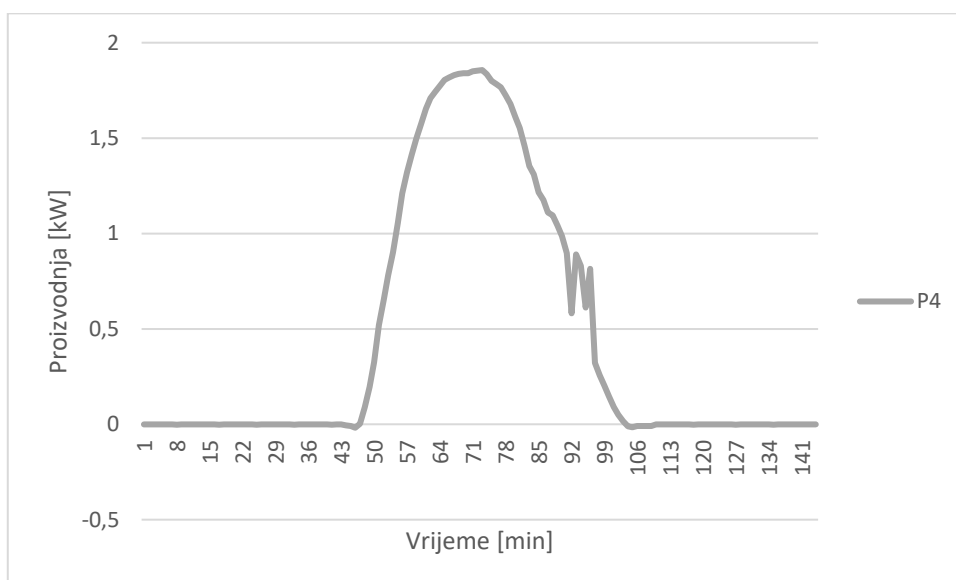
Slika 7.8. Proizvodnja električne energije 1. člana zajednice



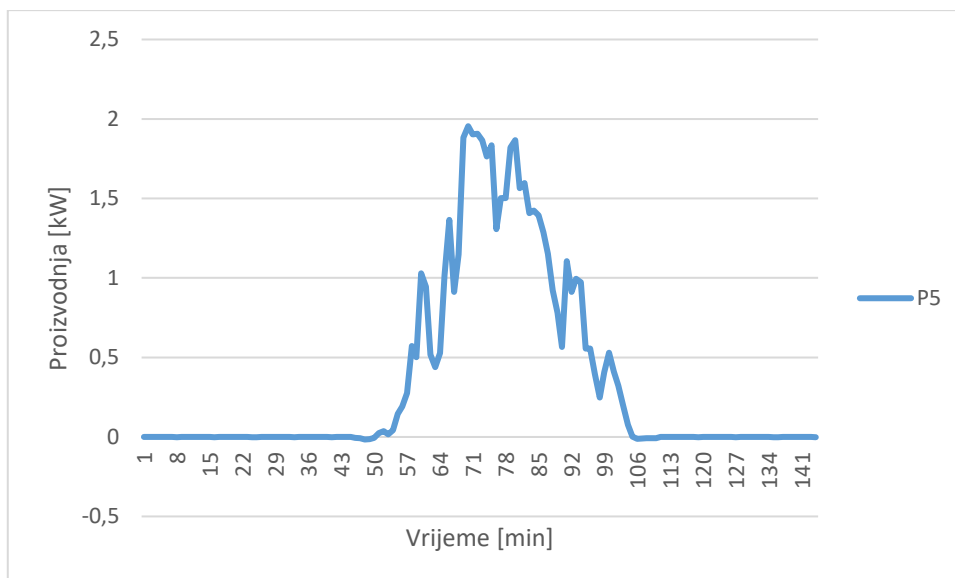
Slika 7.9. Proizvodnja električne energije 2. člana zajednice (poslovna zgrada)



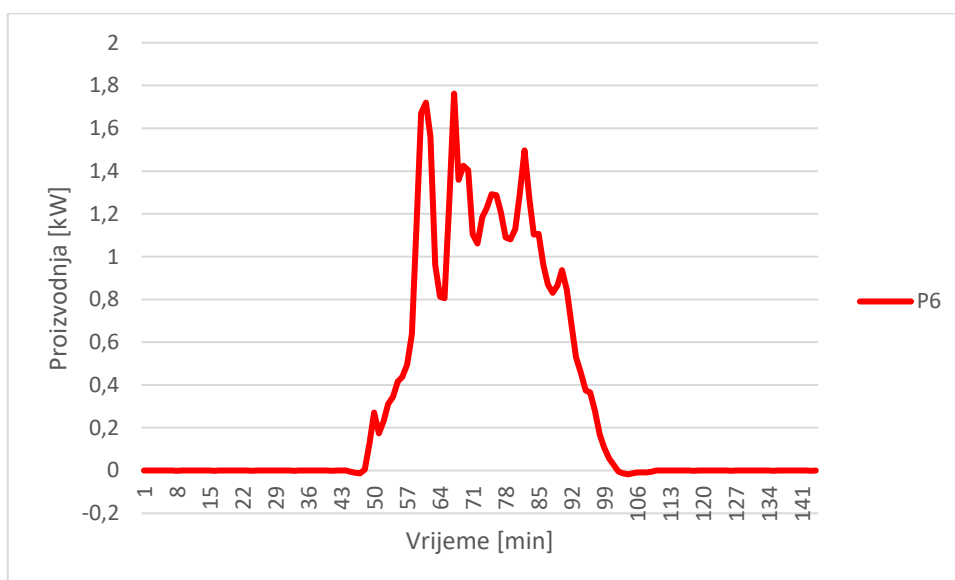
Slika 7.10. Proizvodnja električne energije 3. člana zajednice



Slika 7.11. Proizvodnja električne energije 4. člana zajednice

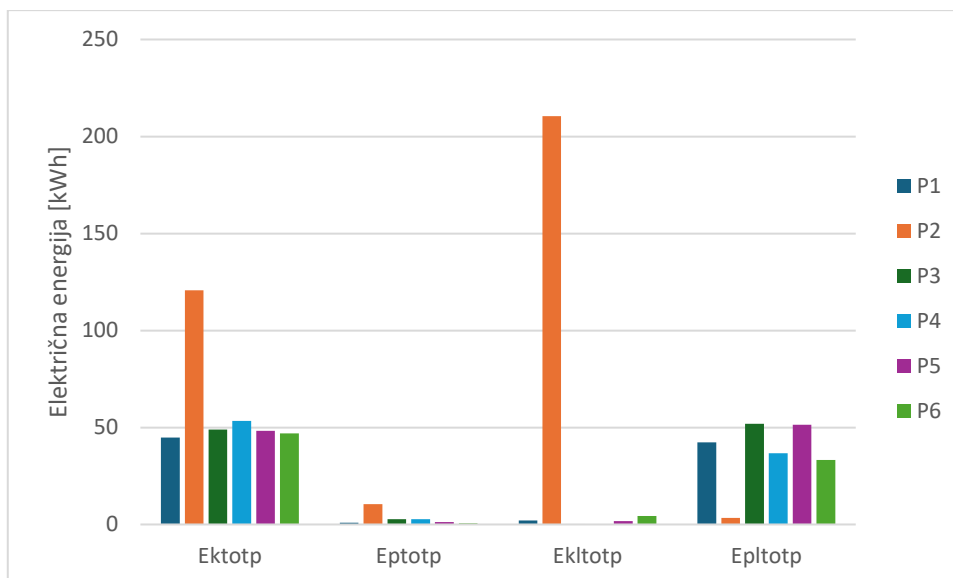


Slika 7.12. Proizvodnja električne energije 5. člana zajednice

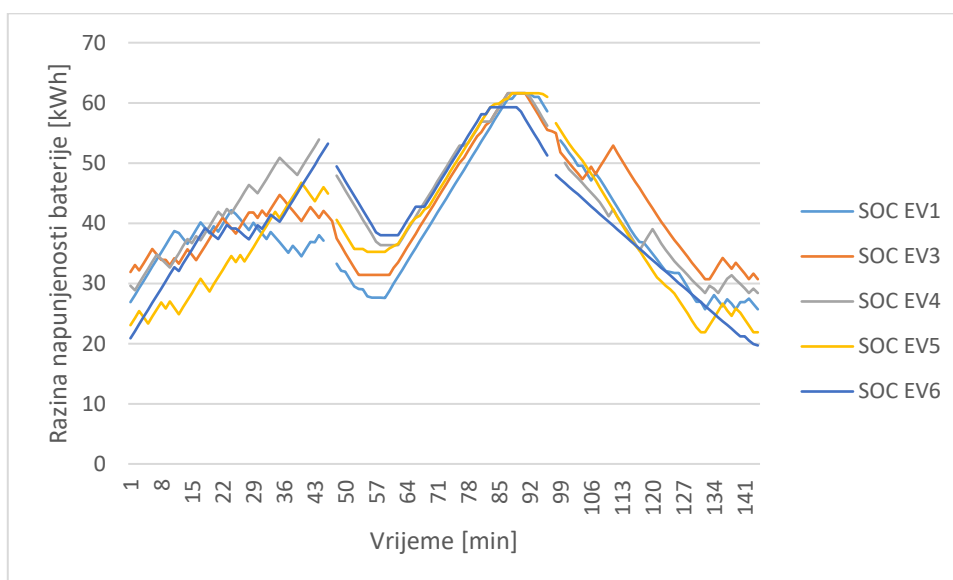


Slika 7.13. Proizvodnja električne energije 6. člana zajednice

Sljedeće slike 7.14. i 7.15. predstavljaju rezultate koji su dobiveni primjenom optimizacijskog modela na scenarij visoke integracije obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice građanina.



Slika 7.14. Razmjena električne energije



Slika 7.15. Razina napunjenosti baterijskih spremnika u električnim vozilima

Kao i prvom scenariju slika 7.14. prikazuje graf razmijene električne energije između članova zajednice s elektroenergetskim sustavom, odnosno mrežom i energetska zajednicom građana. Svi korisnici su značajno promijenili potrošnju električne energije iz mreže u usporedbi s prethodnim scenarijem. Razlike u kupovini električne energije iz mreže za pojedine članove u odnosu na prvi scenarij prikazane su u tablici 7.7.

Tablica 7.7. Razlika u kupovini električne energije iz mreže

Član energetske zajednice građana	Postotak
Korisnik 1 (Kućanstvo)	-16,61 %
Korisnik 2 (Poduzetnik)	-7,61%
Korisnik 3 (Kućanstvo)	-11,32%
Korisnik 4 (Kućanstvo)	+7,81%
Korisnik 5 (Kućanstvo)	-6,31%
Korisnik 6 (Kućanstvo)	-7,09%

Iz usporedbe rezultata vidi se kako u ovom slučaju svi, osim jednog korisnika imaju smanjenju potrošnju električne energije iz mreže. Ova smanjenja su posljedica pametnog korištenja električne energije iz baterijskih spremnika električnih vozila. Povećanje potrošnje jednog korisnika može se objasniti pogledom na graf prikazan na slici 7.3., gdje se jasno vidi kako u večernjim satima dolazi do povećane potrošnje električne energije koju prema optimizacijskom modelu je bolje preuzeti iz mreže. Korisnik P2 i dalje ima najveću potrošnju iz mreže, iako je smanjena u odnosu na prvi scenarij. Prodaja električne energije u mrežu je ostala minimalna kao i u prvom scenariju, no prodaja električne energije, proizvedene od kućanstva na lokalnom tržištu, je znatno povećana. Razlike u prodaji električne energije na lokalnom tržištu u odnosu na prvi scenarij prikazane su u tablici 7.8.

Tablica 7.8. Razlika u prodaji električne energije na lokalnu tržištu

Član energetske zajednice građana	Razlika
Korisnik 1 (Kućanstvo)	+2,45%
Korisnik 2 (Poduzetnik)	-84,87%
Korisnik 3 (Kućanstvo)	+16,62%
Korisnik 4 (Kućanstvo)	+14,96%
Korisnik 5 (Kućanstvo)	+10,08%
Korisnik 6 (Kućanstvo)	+3,30%

Smanjenje prodaje na lokalnom tržištu od strane poslovne zgrade je rezultat povećanja fotonaponskih elektrana u ovom slučaju. Zbog toga kućanstva u energetske zajednici građana manje ovise o proizvodnji iz fotonaponske elektrane koja se nalazi na poslovnoj zgradi, pa tako

većinu električne energije koju proizvede fotonaponska elektrana na zgradi, ona sama ju i može potrošiti. Na taj način smanjuje kupovinu električne energije iz mreže.

Slika 7.15. prikazuje razine napunjenosti baterijskih spremnika električnih automobila, gdje je kao i u prvom scenariju maksimalna dopuštena razina napunjenosti postavljena na 80% zbog smanjenja degradacije baterije automobila. Kada usporedimo graf na slici 7.7. i na slici 7.15. može se vidjeti kako je obrazac punjenja automobila sličan, prvobitan rast napunjenosti u ranim jutarnjim satima sve do odlaska korisnika na posao, zatim smanjenje razine napunjenosti prilikom spajanja na punjač poslovne zgrade kako bi se smanjili troškovi. Troškovi se smanjuju zbog prodaje električne energije, koja je kupljena po jeftinoj tarifi iz mreže. Do smanjenja troškova dolazi iz razloga što poslovna zgrada kupuje električnu energiju na lokalnom tržištu po nižoj cijeni, nego što bi u to isto vrijeme kupovala iz mreže. Prodaju energije na lokalnom tržištu za vrijeme jutarnjih sati omogućuju električni automobili tj. pražnjenje baterijskih spremnika električnih vozila putem dvosmjernih punjača. Nakon nekoliko sati, porastom proizvodnje dolazi do punjenja baterijskih spremnika. Dolaskom korisnika svojim domovima i priključenjem na kućne punjače dolazi do smanjenja razine napunjenosti baterijskih spremnika, kako bi se na što bolji način iskoristila električna energija koja je pohranjena unutar baterijskih spremnika automobila.

No, pored tih sličnosti postoje razlike koje se očituju u boljoj stabilnosti napunjenosti unutar popodnevnih i večernjih sati. Pored toga jasno se vidi kako su promjene razine napunjenosti na grafu 7.15. blaže nego na grafu 7.7. što kako dolazi do optimalnog korištenja električne energije.

Tablica 7.9. Dnevni trošak rada energetske zajednice

Član energetske zajednice	Trošak
Korisnik 1 (Kućanstvo)	1,44 €
Korisnik 2 (Poduzetnik)	30,88 €
Korisnik 3 (Kućanstvo)	1,61 €
Korisnik 4 (Kućanstvo)	2,76 €
Korisnik 5 (Kućanstvo)	0,88 €
Korisnik 6 (Kućanstvo)	2,34 €

Kako se može vidjeti iz tablice 7.14. većom integracijom OIE dolazi do značajnog smanjenja troškova za sve članove energetske zajednice. Smanjenje troškova za sve članove se može vidjeti iz ukupnih troškova koji su za prvi slučaj iznosili 43,469 €, dok za drugi slučaj iznose 39,916 €

što je smanjenje troškova za 8.17%. Troškovi se još mogu smanjiti povećanjem maksimalne granice napunjenosti na veći postotak, no time dolazi do neželjene degradacije baterijskog spremnika električnog vozila.

8. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad dao je sveobuhvatan pregled tehničkih karakteristika električnih vozila i punionica dostupnih na tržištu, kao i analizu inicijative energetske zajednice građana. U okviru analize, naglašena je važnost razvoja infrastrukture za punjenje električnih vozila te su istaknuti izazovi i mogućnosti koje takva infrastruktura donosi, posebno u kontekstu rastuće potrebe za održivim energetske rješenjima.

Inicijativa energetske zajednice građana predstavlja ključan korak prema transformaciji elektroenergetskog sustava s ciljem većeg uključivanja građana u proizvodnju i distribuciju električne energije. Kroz detaljno razmatranje, istaknute su prednosti ovog modela, uključujući poticanje energetske neovisnosti te jačanje društvene kohezije.

Izrada optimizacijskog modela za planiranje održavanja razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila unutar energetske zajednice građana omogućila je primjenu teoretskih znanja u praktičnom kontekstu. Model je pokazao kako se, uz pravilno upravljanje resursima i optimizaciju procesa, može osigurati učinkovita uporaba električnih vozila u sklopu energetske zajednice.

Rezultati ovog rada potvrđuju da su električna vozila i energetske zajednice građana komplementarne komponente u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja. Uvođenjem naprednih tehnoloških rješenja i promoviranjem sudjelovanja građana u energetske zajednicama građana može se značajno doprinijeti smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i unapređenju ekološke svijesti.

U konačnici, ovaj diplomski rad doprinosi boljem razumijevanju kompleksnosti i potencijala električnih vozila i energetske zajednice građana, otvarajući put za nove inovacije i implementaciju održivih tehnologija u svakodnevni život.

LITERATURA

- [1] Encyclopedia Britannica, Electric Car [online], Encyclopedia Britannica, SAD, 2024. Dostupno na: <https://www.britannica.com/technology/electric-car>. [Pristupljeno: 28.3.2024.].
- [2] B. Frieske, M. Kloetzke, F. Mauser, Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles, *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, str. 1–12, Barcelona, Spain, 2013.
- [3] I. Husain, *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, Second Edition. CRC Press, SAD, 2010.
- [4] A. M. Lulhe, T. N. Date, A technology review paper for drives used in electrical vehicle (EV) & hybrid electrical vehicles (HEV), *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, str. 632–636, Kumaracoil, India, 2015.
- [5] R., Raff, V., Golub, D., Pelin, D., Topic, Overview of charging modes and connectors for the electric vehicles, *7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, str. 1–6, Bled, Slovenia, 2019.
- [6] Na sunčanoj strani, Što su energetske zajednice građana i zajednice OIE? [online], Na sunčanoj strani, Zagreb, 2024. Dostupno na: <https://nasuncanostrani.hr/gradanska-energija/energetske-zajednice/>. [Pristupljeno: 15.4.2024.].
- [7] Zakon o tržištu električne energije (2013) (NN br. 22/13., 95/15., 102/15., 68/18., 52/19., 111/21.) [online]. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_10_111_1940.html. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [8] Encyclopedia Britannica, „Solar Cell“ [online], Encyclopedia Britannica, SAD, 2024. Dostupno na: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell/Solar-panel-design>. [Pristupljeno: 16.4.2024.].
- [9] R. D. Prasad, R. C. Bansal, Photovoltaic Systems, *Handbook of Renewable Energy Technology*, str. 205-223, WORLD SCIENTIFIC, Singapur, 2011.
- [10] I. Aranzabal *i ostali*, Optimal Management of an Energy Community with PV and Battery-Energy-Storage Systems, *Energies*, str. 789, Švicarska, 2023.
- [11] N., Mišljenović, G., Knežević, M., Žnidarec, D., Topić, Optimal State of Charge Control of EV Batteries within Energy Community Considering Cost Minimization and Environmental Impact, *20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, str. 1–6, Istanbul, Turkiye, 2024.
- [12] Q. Cui, X. Bai, S. Zhu, B. Huang, Cost-benefit calculation and analysis of V2G system, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, str. 1–5, Xi'an, China, 2016.
- [13] EV Database, „EV Database“ [online], EV Database, SAD, 2024., Dostupno na: <https://ev-database.org/>. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [14] HEP Elektra, Kalkulator [online], HEP Elektra, Zagreb, 2017. Dostupno na: <https://mojracun.hep.hr/kalkulator/>. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [15] Opel Hrvatska, Krenite - BEV, PHEV, E-REV | Jednostavno električan [online], Opel Hrvatska, Zagreb, 2024. Dostupno na: <https://www.opel.hr/simply-electric/jednostavno-elektrican/get-started-bev-phev-e-rev.html>. [Pristupljeno: 16.4.2024.].
- [16] Korak u prostor, „Dijelovi hibridnog automobila“ [online], Korak u prostor, Zagreb, 2019. Dostupno na: <https://korak.com.hr/dijelovi-hibridnog-automobila/>. [Pristupljeno: 19.4.2024.].
- [17] T. Čurković, T. Fabijanić, M. Grošelj, J. Hadrović, R. Heljić, B. Kolbić, M. Komerički Košarić, S. Kovač, T. Kučina, S. Tiainen, S. Tirić, J. A. Tirone, R. Tuđa, L. Vidić, F. Zdelar, LEMO, nastavni materijal., Škola za cestovni promet, Zagreb, Trg J. F. Kennedyja 8, 2017.

- [18] Toyota Europe, „Toyota Fuel Cell Electric Vehicles“ [online], Toyota Europe, Belgija, 2024. Dostupno na: <https://www.toyota-europe.com/electrification/fcev>. [Pristupljeno: 20.5.2024.].
- [19] N. Khac Tuan, Toyota Mirai layout flowchart. [online], Research Gate, 2018. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Figure-3-Toyota-Mirai-layout-flowchart_fig3_324818553. [Pristupljeno: 20.5.2024.].
- [20] L. Collins, Global sales of hydrogen vehicles fell by more than 30% last year, with China becoming world’s largest market [online], Hydrogen In Sight, 2024. Dostupno na: <https://www.hydrogeninsight.com/transport/global-sales-of-hydrogen-vehicles-fell-by-more-than-30-last-year-with-china-becoming-world-s-largest-market/2-1-1599764>. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [21] Jendemark, Electric Vehicle Power Assembly Systems [online], Jendemark, 2024. Dostupno na: <https://www.jendemark.co.za/electric-vehicle-power-assembly-systems/>. [Pristupljeno: 31.5.2024.].
- [22] Autovista 24, Record breaking drop for European EV market in December [online], Autovista 24, 2024. Dostupno na: <https://autovista24.autovistagroup.com/news/record-breaking-drop-for-european-ev-market-december/>. [Pristupljeno: 3.6.2024.].
- [23] Tesla, Model Y Owner’s Manual [online], Tesla, SAD, 2024. Dostupno na: https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/hr_hr/. [Pristupljeno: 1.6.2024.].
- [24] EV Database, Tesla Model Y [online], EV Database, SAD, 2024. Dostupno na: <https://ev-database.org/car/1743/Tesla-Model-Y>. [Pristupljeno: 1.6.2024.].
- [25] Večernji list, „HEP u trajni rad pustio ELEN punionicu za električna vozila u Pitomači“ [online], Večernji list, Zagreb, 2020. Dostupno na: <https://www.vecernji.hr/barkod/hep-u-trajni-rad-pustio-elen-punionicu-za-elektricna-vozila-u-pitomaci-1438656>. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [26] G., Glanzer, T., Sivaraman, J. I., Buffalo, M., Kohl, H., Berger, Cost-efficient integration of electric vehicles with the power grid by means of smart charging strategies and integrated on-board chargers, *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, str. 1–4, Rome, Italy, 2011.
- [27] Wikipedia, Charging station [online], Wikipedia, SAD, 2024. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charging_station&oldid=1226957322. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [28] ACEA, Position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles [online], ACEA, Belgija, 2011. Dostupno na: https://www.acea.auto/files/charging_20110511.pdf. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [29] Wikipedia, IEC 62196 [online], Wikipedia, SAD, 2024. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IEC_62196&oldid=1241515691. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [30] ZDWL, Što je SAE J1772 [online], ZDWL, Kina, 2024. Dostupno na: <https://zdwl-tec.com/hr/news/what-is-sae-j1772/>. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [31] Wikipedia, SAE J1772 [online], Wikipedia, SAD, 2024. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SAE_J1772&oldid=1224582272. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [32] Besen, EVP001-L [online], Besen Group, Kina, 2024., Dostupno na: <https://www.besen-group.com/hr/products/ev-charging-accessories/evp001-l/>. [Pristupljeno: 4.6.2024.].
- [33] Circutor, The Type 2 or Mennekes connector for electric vehicle charging [online], Circutor, Španjolska, 2018. Dostupno na: <https://circutor.com/en/uncategorized/the-type-2-or-mennekes-connector-for-electric-vehicle-charging/>. [Pristupljeno: 5.6.2024.].

- [34] K. Zajkowski, Fig. 5. Type 1 combo / Combo1 / CCS combo 1 / Type 1 CCS (DC) [18] [online], Research Gate, 2018. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Type-1-combo-Combo1-CCS-combo-1-Type-1-CCS-DC-18_fig5_325917189. [Pristupljeno: 5.6.2024.].
- [35] Wikipedia, Combined Charging System [online], Wikipedia, SAD, 2024. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Combined_Charging_System&oldid=1226956543. [Pristupljeno: 5.6.2024.].
- [36] CHAdeMO, Protocol Development [online], CHAdeMO, Japan, 2022. Dostupno na: <https://www.chademo.com/technology/protocol-development>. [Pristupljeno: 5.6.2024.].
- [37] Wikipedia, CHAdeMO [online], Wikipedia, SAD, 2024. Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CHAdeMO&oldid=1225613016>. [Pristupljeno: 5.6.2024.].
- [38] Energuid, Mode 1, 2, 3 and 4: what do the different charging modes for electric cars mean? [online], Energuid, 2024. Dostupno na: <https://www.energuid.be/en/questions-answers/mode-1-2-3-and-4-what-do-the-different-charging-modes-for-electric-cars-mean/14019/>. [Pristupljeno: 10.6.2024.].
- [39] Trgovina Tesla, Tesla Mobile Connector [online], Hrvatska, 2024. Dostupno na: <https://shop.tesla-hrvatska.com/hr/proizvod/tesla-mobilni-konektor/>. [Pristupljeno: 12.6.2024.].
- [40] Tesla, Corded mobile connector owner's manual [online], Tesla, SAD, 2024. Dostupno na: https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/Corded_Mobile_Connector_Owners_Manual_en_EU.pdf. [Pristupljeno: 6.12.2024.].
- [41] Tesla, Tesla Wall Connector owner's manual [online], Tesla, SAD, 2024. Dostupno na: <https://www.tesla.com/sites/default/files/wall-connector-europe/tesla-32a-wall-connector-installation-manual-en-EU-v1.pdf>. [Pristupljeno: 13.6.2024.].
- [42] HEP-ELEN, Elen cjenik usluge punjenja [online], HEP-ELEN, Hrvatska, 2024. Dostupno na: https://elen.hep.hr/UserDocsImages/docs/elen_Cjenik_usluge_punjenja_EV_20230601.pdf. [Pristupljeno: 13.6.2024.].
- [43] European Commission. Directorate General for Energy., *Clean energy for all Europeans*. Publications Office: LU, 2019.
- [44] DOOR, Energetske zajednice u Hrvatskoj [online], DOOR, Hrvatska, 2024. Dostupno na: <https://www.door.hr/energetske-zajednice-u-hrvatskoj/>. [Pristupljeno: 24.6.2024.].
- [45] Večernji list, Energetska zajednica građana kao prilika za inovativne tehnologije [online], Večernji list, Zagreb, 2024. Dostupno na: <https://www.vecernji.hr/biznis/energetska-zajednica-gradana-ka0-prilika-za-inovativne-tehnologije-1529329>. [Pristupljeno: 25.6.2024.].
- [46] Logyco, Vodič za osnivanje energetske zajednice građana [online], DOOR, Hrvatska, 2024. Dostupno na: https://www.door.hr/wp-content/uploads/sites/8/2024/03/LOGYCO-Guide_HRV_PREVIEW12pagesSpread-1.pdf. [Pristupljeno: 26.6.2024.].
- [47] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN br. 138/21., 83/23.) [online]. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [48] G. Borić, Croatia Renewable Energy Trends in 2023 (Faster, Higher, Stronger) [online], Regea, Hrvatska, 2024. Dostupno na: <https://regea.org/croatia-renewable-energy-trends-in-2023-faster-higher-stronger/>. [Pristupljeno: 4.9.2024.].
- [49] T. Vijayapriya, D. P., Kothari, „Smart Grid: An Overview“, *SGRE*, izd. 04, sv. 02, str. 305–311, Indija, 2011.

- [50] HEP Elektra, Tarifne stavke (cijene) [online], HEP Elektra, Zagreb, 2024. Dostupno na: <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>. [Pristupljeno: 15.8.2024.].
- [51] HEP Elektra, Tarifne stavke (cijene) [online], HEP Elektra, Zagreb, 2024. Dostupno na: <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578>. [Pristupljeno: 15.8.2024.].
- [52] Obnovi, Solarni paneli [online], Obnovi, Hravtska, 2024. Dostupno na: <https://www.obnovi.hr/obnovljivi-izvori-energije-solarni-paneli/>. [Pristupljeno: 22.8.2024.].
- [53] L., Shuguang, Y., Zhenxing, „Progress and Prospect of Electric Vehicle’s V2G Technology“, *6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, str. 412–416, Shanghai, China, 2019.
- [54] GAMS, Model and Solve Statements [online], GAMS, SAD, 2024. Dostupno na: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ModelSolve.html#UG_ModelSolve_ModelClassificationOfModels_MIP. [Pristupljeno: 3.9.2024.].
- [55] CBC, CBC User Guide [online], CBC, SAD, 2024. Dostupno na: <https://www.coin-or.org/Cbc/cbcuserguide.html>. [Pristupljeno: 3.9.2024.].
- [56] EV Database, Volkswagen ID.5 GTX [online], EV Database, SAD, 2024. Dostupno na: <https://ev-database.org/car/1558/Volkswagen-ID5-GTX>. [Pristupljeno: 22.8.2024.].
- [57] Hihgbury, Highbury DC Bi Directional charger [online], Rectifier Technologies, Australia, 2024. Dostupno na: <https://www.rectifiertechnologies.com/wp-content/uploads/2022/11/985-1106-03-Highbury-DC-Bi-Directional-Brochure.pdf>. [Pristupljeno: 26.8.2024.].
- [58] Rectifier Technologies, CHARGERS & SYSTEMS Archives [online], Rectifier Technologies, Australija, 2024., Dostupno na: https://www.rectifiertechnologies.com/products_cats/chargers-systems/. [Pristupljeno: 26.8.2024.].

SAŽETAK

Diplomski rad bavi se problematikom optimalnog održavanja razine napunjenosti baterijskog spremnika električnog vozila unutar energetske zajednice građanina s ciljem smanjenja troškova i povećanja efikasnosti korištenja energije. U radu su detaljno razmotreni ključni aspekti električnih vozila, uključujući njihovu podjelu prema vrsti pogona i kapacitetu baterije. Također, dan je pregled tipova punionica s posebnim naglaskom na vrste konektora i načine punjenja vozila. Nadalje, istražena je uloga i značaj energetske zajednice građana, koje predstavljaju inovativan pristup decentraliziranoj proizvodnji i distribuciji energije, omogućujući njihovim članovima zajedničko upravljanje energetske resursima.

U sklopu rada razvijen je matematički model u programskom paketu GAMS koji je temeljen na mješovitom cjelobrojnom linearnom programiranju (MILP). Model je rješavan pomoću CBC *solver*-a te su korišteni mjereni ulazni podaci prilikom provođenja simulacija koje su istraživale utjecaj različitih razina integracije obnovljivih izvora energije. Rezultati simulacija pokazuju da veća integracija obnovljivih izvora energije unutar energetske zajednice značajno smanjuje operativne troškove za članove zajednice, dok istovremeno omogućava stabilnije napajanje baterijskih spremnika električnih vozila.

Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju načina na koji energetske zajednice mogu optimizirati potrošnju energije i smanjiti troškove rada kroz optimalno održavanje razine napunjenosti baterija električnih vozila te uz maksimalno iskorištavanje obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi: električna vozila, energetska zajednica građana, GAMS, MIP model, obnovljivi izvori energije, optimizacija.

ABSTRACT

The thesis addresses the issue of optimal maintenance of battery charge levels in electric vehicles within a citizen energy community, with the aim of reducing costs and increasing energy efficiency. The paper thoroughly examines key aspects of electric vehicles, including their classification by propulsion type and battery capacity. It also provides an overview of charging station types with a particular focus on connector types and vehicle charging methods. Furthermore, the role and significance of citizen energy communities are explored, as they represent an innovative approach to decentralized energy production and distribution, allowing their members to collectively manage energy resources.

As part of the thesis, a mathematical model was developed in the GAMS software package, based on Mixed Integer Linear Programming (MILP). The model was solved using the CBC solver, and measured input data were used during simulations that investigated the impact of different levels of integration of renewable energy sources. The simulation results show that greater integration of renewable energy sources within the energy community significantly reduces operational costs for community members while simultaneously enabling more stable charging of electric vehicle battery packs.

This work contributes to a better understanding of how energy communities can optimize energy consumption and reduce operating costs through optimal maintenance of electric vehicle battery charge levels and maximizing the use of renewable energy sources.

Keywords: electric vehicles, citizen energy community, MIP model, renewable energy sources, optimization.