

Primjena višeciljne optimizacije za kratkoročno planiranje pogona energetske zajednice

Babić, Stjepan

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:965297>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**

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

**PRIMJENA VIŠECILJNE OPTIMIZACIJE ZA
KRATKOROČNO PLANIRANJE POGONA
ENERGETSKE ZAJEDNICE**

Diplomski rad

Stjepan Babić

Osijek, 2024. godina.

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

Ime i prezime pristupnika:	Stjepan Babić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1436, 07.10.2022.
JMBAG:	0165076938
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Sumentor:	Nemanja Mišljenović, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Primjena višeciljne optimizacije za kratkoročno planiranje pogona energetske zajednice
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je dati pregled karakteristika energetske zajednice i objasniti višeciljnu optimizaciju. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model za izradu plana optimalnog upravljanja energijom unutar energetske zajednice. Sumentor: Nemanja Mišljenović, mag. ing. el. Tema rezervirana za studenta: Stjepan Babić
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	19.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	30.9.2024.
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:	01.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 01.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Stjepan Babić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1436, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Primjena višeciljne optimizacije za kratkoročno planiranje pogona energetske zajednice**

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 rada	3
2. PREGLED PODRUČJA TEME	4
3. DEFINICIJA ENERGETSKE ZAJEDNICE	9
3.1. Uloga energetske zajednice	9
3.2. Vrste energetske zajednice	10
3.2.1. Energetske zajednice građana.....	10
3.2.2. Zajednice obnovljivih izvora energije.....	12
3.3. Tehnologije proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora	14
3.4. Energetske zajednice u Republici Hrvatskoj	15
3.5. Prednosti energetske zajednice	16
4. VIŠECILJNA OPTIMIZACIJA	19
4.1. Metode višeciljne optimizacije	20
4.1.1. Metoda težinske sume.....	20
4.1.1. Metoda ϵ - ograničenja.....	21
4.1.1. Metoda ciljanog programiranja.....	21
5. PRIMJER OPTIMALNOG UPRAVLJANJA POGONOM ENERGETSKE ZAJEDNICE GRAĐANA	23
5.1. Matematički model	23
5.2. Višeciljna optimizacija za kratkoročno planiranje pogona energetske zajednice	28
5.2.1. Ulazni podaci za potrebe rješavanja optimizacijskog modela.....	28
5.2.2. Predloženi pristup u rješavanju optimizacijskog problema.....	30
5.3. Plan optimalnog pogona promatrane energetske zajednice	31
6. ZAKLJUČAK	39
LITERATURA	41
SAŽETAK	43
ABSTRACT	44

1. UVOD

Prema brojkama Službe za klimatske promjene Copernicus, 2022. godina je bila najtoplija godina ikada izmjerena u Europi. Prosječna temperatura zraka na Zemlji je za otprilike 1 °C viša nego što je bila u doba industrijske revolucije. Stručnjaci smatraju da je uzrok tomu povećanje emisija stakleničkih plinova te da su te emisije izazvane određenim ljudskim aktivnostima. Znanstvenici nastoje ograničiti porast prosječne temperature zraka. Tvrdi da, ukoliko prosječna temperatura zraka poraste za 2 °C, dolazi do negativnih i potencijalno opasnih posljedica za okoliš. Europska unija (EU) četvrta je po emisiji stakleničkih plinova, nakon Indije, Kine i SAD-a, no taj udio emisija pada s 15,2 % iz 1990. godine na 7,3 % do 2019. godine. EU se „Pariškim sporazumom“ 2015. godine obvezala smanjiti vrijednosti emisija stakleničkih plinova iz 1990. godine za 40 %. Spomenuti cilj EU nastoji postići do 2030. godine. 2021. godine ovaj je cilj prilagođen Europskim zelenim planom, određeno je smanjenje od najmanje 55 % do 2030. godine s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine. Cilj Zelenog plana, u okviru Europskog zakona o klimi, je da Europa postane prvi klimatski neutralni kontinent. [1]

Zakonodavnim paketom „Spremni za 55 %“ EU je učinila prvi korak prema postizanju ciljeva do 2030. godine. U planu „REPowerEU“ koji je predstavljen 2022. godine, Europska komisija je predložila svoje planove za pomoć Europskoj uniji, a to su:

- povećanje energije iz obnovljivih izvora,
- ušteda energije,
- raznolikost u opskrbi energijom.

Godine 2023. postignut je dogovor kojim se nastoji integrirati što više energije iz obnovljivih izvora te je dosadašnji cilj od 32 % do 2030. godine promijenjen na 42,5 % do 2030. godine s nadom dostizanja 45 %. Na razini EU postavljen je još jedan obvezujući cilj, a to je povećanje energetske učinkovitosti za 11,7 % do 2030. godine. [2]

Putem ovih paketa Europska unija predstavlja planove prijelaza na zelenu energiju gdje su glavni akteri tih planova sami građani te se pojavljuju novonastale energetske inicijative kao što su „Zajednice obnovljive energije“ i „Energetske zajednice građana“. [3]

Energetske zajednice predstavljaju model suradnje u kojem građani, lokalne zajednice, mala poduzeća i javne institucije aktivno sudjeluju u proizvodnji, potrošnji i distribuciji energije. Osnovna ideja energetske zajednice je omogućiti lokalnim zajednicama da preuzmu kontrolu nad proizvodnjom energije, smanje svoju ovisnost o velikim energetske tvrtkama i koriste prednosti

obnovljivih izvora energije. Primarni cilj energetske zajednice jest smanjiti emisije stakleničkih plinova te povećati energetske sigurnost. Energetske zajednice omogućuju lokalnu proizvodnju i potrošnju energije koristeći obnovljive izvore energije poput fotonaponskih elektrana. Osim smanjenja troškova električne energije, energetske zajednice stavljaju naglasak na smanjenje emisija CO₂, što ih čini ključnim inicijativama u postizanju ciljeva Zelenog plana. S obzirom na to da je prijelaz na obnovljive izvore energije ključan za smanjenje globalnih emisija stakleničkih plinova, energetske zajednice pružaju društvenu i ekološku vrijednost time što omogućuju građanima da direktno sudjeluju u energetske tranziciji. Neprofitni karakter energetske zajednice omogućuje da prioritet bude smanjenje emisija CO₂ i poboljšanje energetske učinkovitosti, a ne isključivo profit. To je važno jer su ciljevi Europskog zelenog plana usmjereni na postizanje klimatske neutralnosti, a energetske zajednice omogućuju ostvarenje tih ciljeva uz izravno sudjelovanje građana. Energetske zajednice ne samo da doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova, nego i osnažuju građane, čineći ih središnjim dijelom energetske tranzicije koja je potrebna kako bi se spriječile negativne posljedice klimatskih promjena. Stoga će se u ovom radu detaljno opisati i definirati energetske zajednice te će se provesti simulacija u cilju određivanja plana optimalnog upravljanja pogonom energetske zajednice u kojoj je cilj pronaći ravnotežu između smanjenja količine emisija CO₂ i troškova energetske zajednice.

1.1. Zadatak rada

U diplomskom radu potrebno je dati pregled karakteristika energetske zajednice i objasniti višeciljnu optimizaciju. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model za izradu plana optimalnog upravljanja energijom unutar energetske zajednice.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Prema [4], energetske zajednice se mogu opisati kao način organiziranja kolektivnih energetske aktivnosti radi pružanja koristi za sve članove zajednice. Postoje dvije vrste energetske zajednice, odnosno „Energetske zajednice građana“ koje su uključene u Direktivu o unutarnjem tržištu električne energije (EU) 2019/944 te „Zajednice obnovljivih izvora energije“ koje su uključene u Direktivu o obnovljivoj energiji (EU) 2018/2001. Iako energetske zajednice sudjeluju u ekonomskim aktivnostima, njihov je primarni cilj osigurati ekološke, ekonomske i društvene dobrobiti za zajednicu.

Autori u [5] tvrde da energetske sustavi diljem svijeta prolaze kroz dramatičnu transformaciju te da je to rezultat tehnoloških promjena, iscrpljivanja izvora fosilnih goriva i klimatskih promjena. Jedan od dokaza tih promjena su Energetske zajednice građana. Energetske zajednice građana opisane su u ovome radu kao moderan način organizacije lokalnih energetske sustava. Ovakav oblik organizacije ne samo da osigurava vlastitu opskrbu energijom već također pružaju usluge većem energetske sustavu prodajom viška proizvedene električne energije. Također se u ovom radu pregledavaju energetske trendovi te povezana tehnološka, socio-ekonomska i ekološka pitanja koja se tiču razvoja energetske zajednice.

Autori u [6] tvrde da je definicija energetske zajednice vrlo fleksibilna. Unatoč tome, u radu je energetska zajednica definirana kao instalacija jedne ili više tehnologija za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u ruralnoj zajednici ili njejoj neposrednoj blizini uz određeni doprinos članova te zajednice. Ovakva organizacija mora biti od koristi zajednici izravno kroz opskrbu kućanstava ili nekakvog zajedničkog objekta, te neizravno izvozom proizvedene električne energije u mrežu.

Koncept energetske sustava zajednice već je neko vrijeme na snazi u obliku lokalnih mreža daljinskog grijanja koje opskrbljuju toplinom domove i društvene zgrade. Posljednjih je godina došlo do procvata drugih oblika energetske infrastrukture u zajednicama, potaknutih programima održive energije i smanjenja ugljika te aktivistima i poduzetnicima koji žele razviti održive energetske projekte s niskim udjelom ugljika u zajednici. Na njih se gledalo kao na oblik osnovne inovacije koji bi mogao pružiti alternativne modele za proizvodnju i opskrbu domova, malih poduzeća i društvenih zgrada električnom i toplinskom energijom te koji se drastično razlikuju od centraliziranih mrežnih infrastrukture koje dominiraju naprednim gospodarstvima. Definicija energetske zajednice nije toliko jednostavna zbog nekolicine razloga. Korištene tehnologije sada uključuju mnoge različite metode proizvodnje toplinske i električne energije kao što su različiti

oblici vjetroturbina, plamenika na drva i biomasu, solarnih panela, hidroelektričnih turbina, geotermalne topline i kombiniranih sustava toplinske i električne energije (engl. *Combined heat and power - CHP*). Nadalje, proizvedena energija može se koristiti na različite načine. Naprimjer, neki veći projekti energetske zajednice, kao vjetroelektrane, nastoje doprinijeti energetskoj zajednici prodajom električne energije u nacionalnu mrežu, umjesto izravnog opskrbljivanja zajednice električnom energijom. [7]

Postoje mnogi projekti proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u zajednici. Baza podataka izrađena krajem 2004. u Ujedinjenom Kraljevstvu identificirala je više od 500 tekućih ili dovršenih projekata podržanih programima ili inicijativama s riječi 'zajednica' u naslovu. Međutim, projekti proizvodnje električne energije predstavljaju vrlo mali udio ove statistike. Mnogi različiti oblici projekata označeni su oznakom 'zajednice', uključujući one koje vode lokalne vlasti i lokalni poduzetnici. Projekti koji uključuju vlasništvo zajednice, kroz financijska ulaganja ili upravljačku kontrolu od strane ili u ime "članova javnosti", postigli su to u različitim stupnjevima i na različite načine. Projekti mogu biti u stopostotnom vlasništvu zajednice ili se mogu razvijati u sklopu sporazuma o suvlasništvu s privatnim sektorom, na primjer vlasništvo zajednice nad jednom turbinom u većoj vjetroelektrani. Projekti mogu uključivati vlasništvo i financiranje proizvodnje električne energije koja se izvozi u mrežu umjesto da se koristi lokalno, ili mogu kombinirati proizvodnju i potrošnju energije u lokalnom vlasništvu (npr. gdje se toplinska energija proizvodi za izravnu lokalnu upotrebu u zgradi zajednice ili umreženoj skupini zgrada). [8]

Budući da su zajednici potrebne različite energetske usluge, intenzivno se istražuje integracija različitih energetske sustava, uključujući kombinirana toplinska i električna postrojenja (CHP), mikromreže, pametne energetske sustave itd. Osim sustava opskrbe energijom, pokazalo se da komunalna poduzeća i operatori sustava mogu integrirati svoje potrošače u decentralizirane i centralizirane sustave upravljanja energijom i da se odgovor na potražnju može koristiti za smanjenje potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova. [9]

Integrirani energetske sustavi zajednice (engl. *Integrated community energy systems - ICES*) predstavljaju model koji omogućuje pretvaranje viškova energije u nove energetske resurse. Povezivanjem različitih izvora energije, tehnologija i infrastrukture, ove zajednice mogu iskoristiti brojne energetske mogućnosti na učinkovitiji način, smanjujući troškove, osiguravajući energetske pouzdanost i smanjujući utjecaj na okoliš, uključujući emisije stakleničkih plinova. Integracija znači sagledavanje postojeće infrastrukture i dostupnih resursa u zajednici i pronalaženje

inovativnih načina za korištenje manje energije za pružanje istih usluga. Integracija podrazumijeva procjenu općinskih, komunalnih, prijevoznih i drugih ulaganja u javnu i privatnu infrastrukturu u zajednici i pronalaženje prilika za učinkovitije korištenje energije uz pružanje više energetske usluga, smanjenje dugoročnih troškova rada i održavanja, osiguranje energetske pouzdanosti, izbjegavanje nepotrebnih kapitalnih troškova i smanjenje utjecaja na okoliš. [10]

Pojam energetske zajednice dobio je sve veći interes u posljednjih nekoliko godina, potaknut boljim informacijskim i komunikacijskim tehnologijama i povećanjem ekološke svijesti. Čak i ako sam pojam nikada nije ispravno definiran, energetske zajednice smatraju se ključnima za olakšavanje decentralizacije proizvodnje električne energije i poboljšanje upravljanja energetskim resursima na lokalnoj razini. Male energetske zajednice stoga cvjetaju u mnogim zemljama. Ovaj trend je često pojačan značajnom potporom kreatora politike, na primjer, u obliku poticajnih cijena. Međutim, unatoč potencijalnim profitima koje takve zajednice ostvaruju, nema jamstva da će biti održive. Podskupina sudionika doista može smatrati isplativim izaći iz zajednice i stvoriti drugu vlastitu ako nije primjereno plaćena. [11],

Autori u [12] detaljno opisuju model sustava za podršku u odlučivanju za energetske planiranje koje omogućuje kombiniranje postojećih mogućnosti proizvodnje električne energije s povećanom upotrebom obnovljivih izvora energije. U radu se važnost pridaje energetskom planiranju na regionalnoj razini, a regija koja je odabrana za analizu, odabrana je ne samo zbog velike ovisnosti o ugljenu za električnu energiju, već i zbog potencijala većeg korištenja energije vjetera i sunca. U radu se posebno raspravlja o razvoju modela primjenom višeciljnog linearnog programiranja (engl. *Multi-objective linear programming - MOLP*) koji se može koristiti za određivanje optimalne kombinacije obnovljivih izvora energije i postojećih postrojenja na fosilna goriva na regionalnoj osnovi. Ovaj model omogućuje donositelju odluka da uravnoteži godišnje troškove proizvodnje s odgovarajućim emisijama stakleničkih plinova i pruža značajnu podršku za provedbu niza različitih analiza politika.

Proizvodnja energije iz obnovljivih izvora postala je važna opcija. U radu [13] definirano je nekoliko važnih čimbenika koji utječu na razvoj proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, poput troškova, tehničke zrelosti i drugih. Praćenjem razvoja proizvodnih tehnologija te predviđanja o budućem gospodarskom razvoju, razvijen je novi model, model optimizacije obnovljivih izvora energije (engl. *Renewable energy optimization model, REOM*), za analizu razvoja tri obnovljiva izvora energije, temeljenih na energiji vjetera, energiji sunca i energiji biomase. Ideja matematičke optimizacije u integriranom planiranju obnovljivih izvora energije pokazala se izvedivom.

Doprinos ovog rada je proširenje postojećih modela kako bi se u obzir uzeli troškovi razvoja, dostupne tehnologije i drugi ključni faktori te omogućila dinamička optimizacija razvojnog puta za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

U radu [14] predlaže se novi model koji je osmišljen kako bi se riješili problemi vezani uz planiranje distribucijskog elektroenergetskog sustava. Ovaj model integrira distribuiranu proizvodnju (npr. proizvodnju energije iz obnovljivih izvora kao što su solarne elektrane i vjetroelektrane) kao učinkovitu i privlačnu opciju, posebno u onim područjima gdje distribucijske komunalne usluge igraju ključnu ulogu. Time se otvara mogućnost decentralizacije proizvodnje energije, smanjenja opterećenja na centralizirane mreže i povećanja energetske učinkovitosti, čime se postiže veća fleksibilnost u radu distribucijskih sustava. Ovaj pristup može također omogućiti lokalnim zajednicama i poduzećima da aktivnije sudjeluju u proizvodnji energije, što vodi do potencijalnih ušteda i smanjenja emisija stakleničkih plinova. Predloženi pristup integrira opsežan optimizacijski model i iskustvo planera kako bi se postigla optimalna veličina i smještaj distribuirane proizvodnje. Ovaj model ima za cilj minimizirati investicijske i operativne troškove opće uprave, ukupna plaćanja za kompenzaciju gubitaka sustava tijekom planskog razdoblja, kao i različite troškove prema dostupnim alternativnim scenarijima. Ovi scenariji variraju od proširenja postojeće trafostanice i dodavanja novih vodova do kupovne moći postojećeg međuspoja kako bi se zadovoljilo povećanje potražnje za opterećenjem. Binarne varijable odluke koriste se u predloženom modelu optimizacije kako bi se osigurale točne odluke o planiranju. Analiza različitih scenarija sadašnje vrijednosti provodi se kako bi se procijenila izvedivost uvođenja distribuirane proizvodnje kao ključnog elementa u rješavanju problema planiranja distribucijskog sustava.

Autori u radu [15] opisuju i evaluiraju novi deterministički model temeljen na mješovitom cjelobrojnom linearnom programiranju (engl. *Mixed-integer linear programming - MILP*) za planiranje proizvodnje električne energije u energetske sustavima. Model je razvijen s ciljem utvrđivanja optimalnog izvora energije i mogućnosti smanjenja onečišćujućih tvari koje zadovoljavaju određene potrebe za električnom energijom te zadovoljavaju ciljeve emisije CO₂ uz minimalne troškove. U formulaciju modela uključeno je nekoliko vremenski ovisnih parametara, kao što su predviđena potražnja za električnom energijom, varijabilnost cijena goriva, vrijeme izgradnje, inicijative za očuvanje i povećanje fiksnih operativnih troškova i troškova održavanja tijekom vremena. Razvijeni model primijenjen je na dvije scenarija. Cilj je ispitati ekonomske, strukturne i ekološke učinke do kojih bi došlo kada bi se od elektroenergetskog sektora zahtijevalo smanjenje emisija CO₂ na određenu granicu.

Višekriterijski optimizacijski algoritam predstavljen je u [16]. Takav algoritam omogućuje tehnokonomске analize za utvrđivanje optimalne veličine distribuiranih izvora energije, posebno fotonaponskih elektrana i baterijskih sustava za pohranu energije u mikromrežama. U svrhu učinkovitog upravljanja mikromrežom koja uključuje fotonaponske sustave, baterije i fleksibilne potrošače, razvijen je optimizacijski model temeljen na mješovitom cjelobrojnom linearnom programiranju. Ključan uvjet za pružanje pomoćnih usluga, kao jedne od mogućih poslovnih prilika za vlasnike mikromreža, jest pravilno određivanje obujma takvih usluga i planiranje rada mikromreže u tim uvjetima. Za rješavanje ovog izazova razvijen je optimizacijski model koji omogućuje planiranje pružanja pomoćnih usluga u mikromreži s fleksibilnim potrošačima i baterijskim sustavima.

3. DEFINICIJA ENERGETSKE ZAJEDNICE

3.1. Uloga energetske zajednice

Energetske zajednice omogućuju kolektivne energetske djelatnosti koje pokreću građani kako bi se podržao prijelaz na čistu energiju. Energetske zajednice mogu pridonijeti povećanju javnog prihvaćanja projekata obnovljive energije te mogu povećati količinu privatnih ulaganja u prijelaz na čistu energiju. Energetske zajednice mogu biti učinkovito sredstvo restrukturiranja naših energetske sustava, ohrabrivanjem građana da pokrenu energetske tranzicije na lokalnoj razini i izravno imaju koristi od bolje energetske učinkovitosti, nižih računa, smanjenog energetske siromaštva i više lokalnih zelenih radnih mjesta. Energetske zajednice omogućuju lokalnim zajednicama da udruže snage i ulažu u čistu energiju. Djelovanjem kao jedinstvena cjelina, znači da energetske zajednice mogu pristupiti svim odgovarajućim energetske tržištima pod jednakim uvjetima s ostalim tržišnim akterima. Prema pravu EU-a, energetske zajednice mogu biti u obliku bilo koje pravne osobe uključujući udruhu, zadruhu, partnerstvo, neprofitnu organizaciju ili društvo s ograničenom odgovornošću. [17]

Energetske zajednice mogu svojim aktivnostima utjecati na članove zajednice ili dioničare, lokalno stanovništvo, na energetske sektor, kao naprimjer prijenosni i distribucijski sustav, te ostale koji obavljaju određene aktivnosti energetske sektora. Jedan od načina na koji energetske učinkovite zajednice doprinose zaštiti okoliša i prelasku na održive izvore energije jest instalacija solarnih panela, vjetroturbina i toplinskih pumpi, koje smanjuju emisije stakleničkih plinova primjenom novih obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije i topline. Ulaganjem, izgradnjom i korištenjem na ovaj način potiče se razvoj gospodarstva i tehnologije te se razvijaju nova znanja. Energetske zajednice također imaju utjecaj na društvo poticanjem svijest o važnosti pametnog korištenja, proizvodnje, distribucije i uštede energije što je najvažniji čimbenik u smanjenju pojava ozbiljnih energetske problema u budućnost. [18]

Inicijative energetske zajednice koje vode građani uglavnom su uključene u aktivnosti proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, no energetske zajednice sve više počinju sudjelovati u raznim energetske aktivnostima. Jedna od tih aktivnosti jest proizvodnja. Proizvodnja se odnosi na projekte zajednice koje zajednički koriste ili posjeduju resurse za proizvodnju energije, gdje se proizvedena energija ne troši, već se izvozi u mrežu i prodaje. Također je jedna od aktivnosti opskrba koja uključuje prodaju i preprodaju električne energije i plina krajnjim korisnicima, pri čemu velike zajednice potencijalno imaju značajan broj maloprodajnih kupaca koji sudjeluju u agregaciji opterećenja i fleksibilnosti, ili u proizvodnji

električne energije za tržišne transakcije. Osim toga energija se može koristiti i razmjenjivati unutar same zajednice, uključujući vlastitu potrošnju i lokalne razmjene energije između članova zajednice. Distribucija je također aktivnost kojom se energetske zajednice bave, a odnosi se na vlasništvo i upravljanje distribucijskim mrežama kojima upravlja zajednica, kao što su lokalne električne mreže ili male toplinske i plinske mreže. Zadruga često kombiniraju proizvodnju i distribuciju energije, ali mrežna infrastruktura ključna je za njihov rad. Energetske usluge uključuju mjere energetske učinkovitosti i uštede energije, fleksibilnost, pohranu energije i integraciju pametne mreže, kao i nadzor i upravljanje energijom za mrežne operacije. Energetske zajednice također mogu sudjelovati u aktivnostima elektromobilnosti što uključuje upravljanje električnim automobilima te upravljanje stanicama za punjenje tih automobila.[18]

3.2. Vrste energetske zajednice

Europska unija uvela je nove propise o regulaciji tržišta energije koje uključuju „Zajednice obnovljivih izvora energije“ i „Energetske zajednice građana“. Na ovaj se način omogućuje građanima da planiraju i koordiniraju svoje sudjelovanje u energetskom sustavu. Ove ideje otvaraju put novim vrstama inicijativa usmjerenih na povećanje decentralizirane proizvodnje i korištenje obnovljivih izvora energije na mjestu proizvodnje te energije. [19]

3.2.1. Energetske zajednice građana

Prema zakonima Republike Hrvatske, energetska zajednica građana je dobrovoljna pravna organizacija u javnom vlasništvu koju kontroliraju njeni članovi ili dioničari, koji mogu biti fizičke osobe, lokalne samouprave poput općina ili mala poduzeća. Glavna svrha zajednice nije ostvarivanje financijske dobiti, već pružanje ekoloških, gospodarskih ili društvenih koristi svojim članovima i okolici. Mogu sudjelovati u gotovo svim aktivnostima vezanim uz proizvodnju i korištenje električne energije. Energetske zajednice mogu investirati i razvijati projekte za članove zajednice te mogu sudjelovati u privatnim i javnim projektima. [19]

Energetske zajednice građana uključuju:

- subjekte koji se bave energetskim aktivnostima kao što su proizvodnja, distribucija, opskrba, potrošnja, distribucija, skladištenje električne energije i pružanje energetske usluga,
- neprofitne organizacije na tržištu,
- organizatore zajednica koji udružuju snage kako bi mogli utjecati na energetski sustav,

- aktere koji odabiru opskrbljivača, zajednički ulažu u energiju sunca te su u posjedu energetske tvrtke i distribucijske mreže.

Agregatori, spomenuti na slici 3.1., kao predstavnici energetske zajednice građana, su grupe tvrtki ili lokalnih agencija koje udružuju snage kako bi zajednički kupovale energiju u malim količinama od jednog ili više decentraliziranih proizvođača, zadržavajući pritom prednosti kupnje većih količina. Osim električne energije, agregatori mogu ponuditi razne usluge, uključujući fleksibilnost. [19]



Slika. 3.1. Energetska zajednica građana [19]

Uvođenjem energetske zajednice građana omogućuje se formiranje zajednica u područjima s većom gustoćom naseljenosti, gdje postoje potrošači zainteresirani za korištenje električne energije iz obnovljivih izvora, ali nemaju mogućnost instalirati vlastite proizvodne pogone. Tu spadaju i potrošači s dovoljno prostora za ugradnju proizvodne opreme, ali s manjom potrošnjom. Stvaranje energetske zajednice građana omogućit će potrošačima koji nemaju prostora za vlastite instalacije da iskoriste višak energije proizveden u instalacijama drugih članova zajednice, čime

se maksimizira korištenje proizvedene energije. Primjerice, ukoliko na nekom prostoru postoje kuće i stambena zgrada od 40 stanova, vlasnici kuća mogu se udružiti i na svoje kuće postaviti solarne panele, a svoju kuću mogu napajati s maksimalno 80 % proizvedene energije, dok ostatak mogu podijeliti putem energetske zajednice građana stanarima stambene zgrade. Isto tako, stanari stambene zgrade se mogu udružiti i na svoju zgradu, ukoliko su zadovoljeni uvjeti, instalirati vlastiti proizvodni pogon.[19]

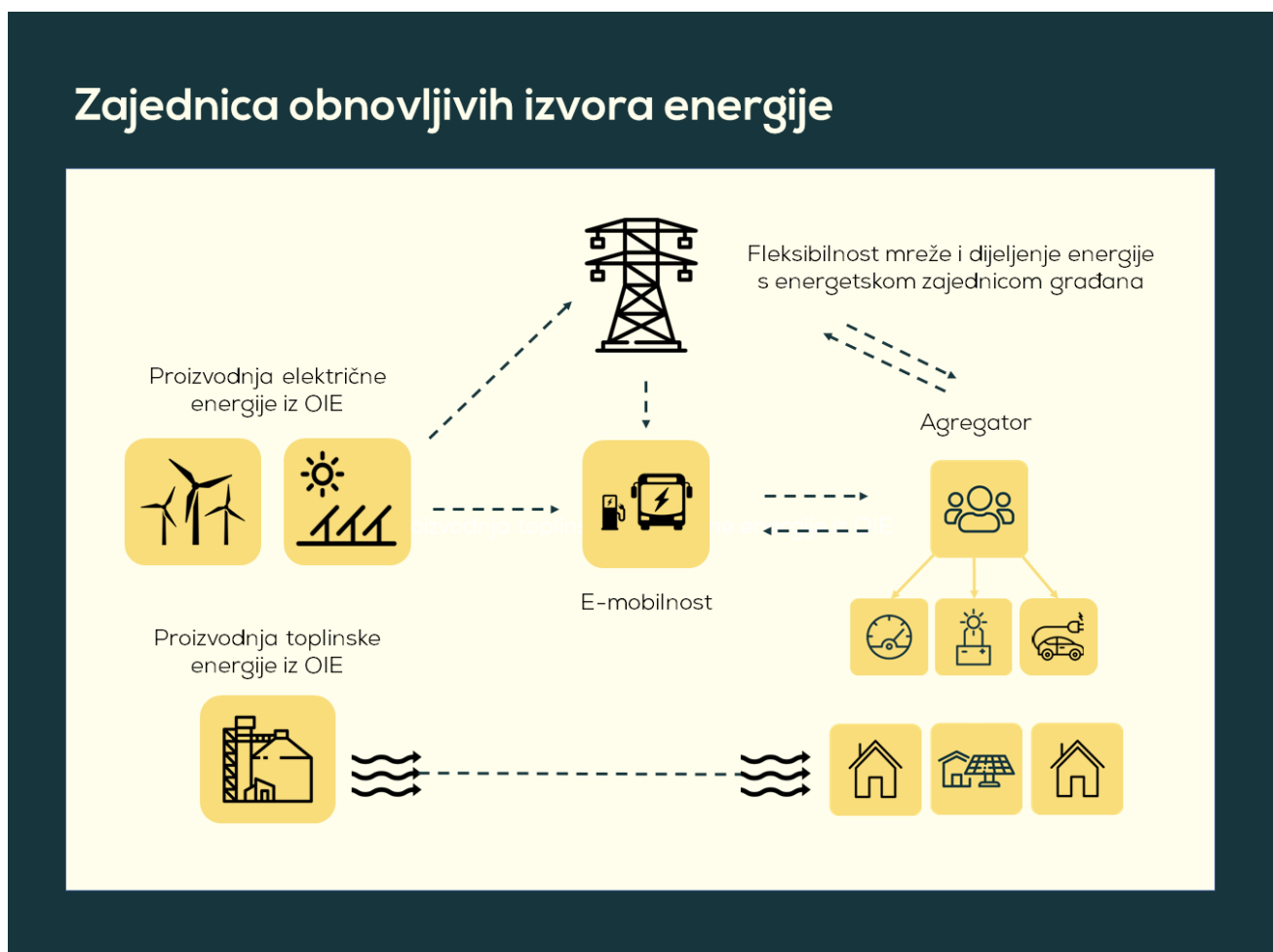
3.2.2. Zajednice obnovljivih izvora energije

Zajednica obnovljivih izvora energije (engl. *Renewable energy community - REC*) okuplja lokalno stanovništvo i organizacije kako bi zajedno stvarali, dijelili i trošili čistu energiju. REC-ovi omogućuju zajednicama prijelaz na obnovljive izvore energije, istovremeno smanjujući troškove električne energije. Zajednice obnovljivih izvora energije sastoje se od proizvođača, koji proizvode i koriste energiju, i potrošača, koji troše energiju. Obično lokalna organizacija s velikim krovim prostorom djeluje kao aktivni kupac koji instalira sredstva za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora kao što su solarni paneli i proizvodi višak čiste energije. Svaki član energetske zajednice ima korist od nižih cijena električne energije i veće energetske neovisnosti, a sve uz zaštitu okoliša. Zajednice obnovljivih izvora energije okupljaju ljude koji su posvećeni čistoj energiji, a utemeljene su na načelima uključenosti, suradnje i zajedničke odgovornosti. [20] Konkretnije, zajednica obnovljivih izvora energije je skupina građana, komercijalnih aktivnosti, lokalnih javnih uprava te malih i srednjih poduzeća koji se okupljaju kako bi proizvodili, razmjenjivali i koristili energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora na lokalnoj razini. Energetske zajednice u Europskoj uniji stvorene su putem EU-ovog paketa „Čista energija za sve Europljane“. Paket je usvojen 2019. godine, te je tim paketom u zakonodavstvo implementiran koncept energetske zajednice, posebice energetske zajednice građana i zajednice obnovljivih izvora energije. Osim omogućavanja zajedničke proizvodnje energije, takve zajednice također imaju za cilj povećati fleksibilnost mreže kroz distribuirane usluge odgovora na potražnju i skladištenja energije koje pružaju same zajednice. Zajednice obnovljivih izvora energije imaju za cilj podijeliti dobrobiti proizašle iz proizvodnje obnovljive energije unutar lokalnog područja gdje REC djeluje. Stvaranje zajednice obnovljivih izvora energije pomaže u decentralizaciji distribucije energije, zauzvrat promičući održiviji model proizvodnje i potrošnje energije. Nadalje, prema Europskoj komisiji, takve zajednice „pridonose povećanju javnog prihvaćanja projekata obnovljive energije i olakšavaju privlačenje privatnih ulaganja u prijelaz na čistu energiju. Istodobno, oni imaju potencijal pružiti izravnu korist građanima povećanjem energetske učinkovitosti, smanjenjem njihovih računa za struju i stvaranjem lokalnih radnih mjesta.“ [21] Zajednica obnovljivih izvora

energije prikazana je na slici 3.2. Riječ je o pravnoj osobi koja, u skladu s nacionalnim zakonodavstvom, djeluje na principima otvorenog i dobrovoljnog sudjelovanja. Zajednica je autonomna, a njome učinkovito upravljaju dioničari ili članovi koji se nalaze u blizini projekata obnovljivih izvora energije koje zajednica posjeduje i razvija. Članovi ili dioničari energetske zajednice obnovljivih izvora energije mogu biti fizičke osobe, mala i srednja poduzeća ili lokalne vlasti, uključujući općine te je primarna svrha tih zajednica osigurati ekološke, gospodarske ili društvene koristi za svoje dioničare ili članove ili za lokalna područja na kojima posluje, a ne financijsku dobit. [22]

Sudionici u zajednicama obnovljivih izvora energije (ZOIE) mogu sudjelovati kao:

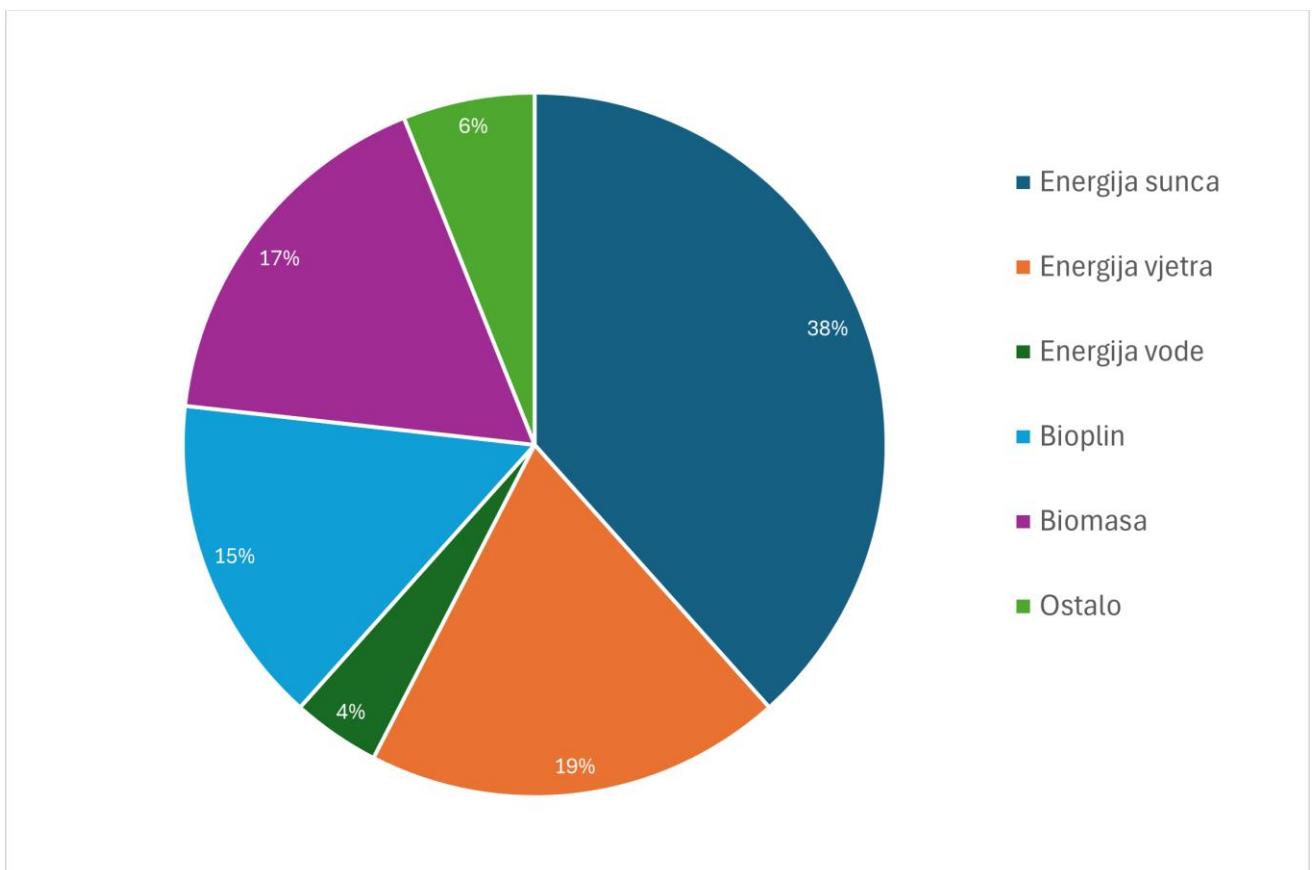
- proizvođači-članovi: dobivaju dio subvencija rezerviranih za REC, što im omogućuje da vrate ulaganja kroz nekoliko godina;
- potrošači-članovi: u ovom slučaju oni dobivaju kvotu subvencija jednostavnim potrošnjom energije, a da pritom ne snose nikakve troškove;
- članovi proizvođači i potrošači: u ovom scenariju sudionici ostvaruju prednosti koje uživaju i članovi proizvođači i članovi potrošači.



Slika. 3.2. Zajednica obnovljivih izvora energije [19]

3.3. Tehnologije proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora

Obnovljivi izvori energije idealni su za decentraliziranu i lokalnu proizvodnju. Na primjer, zajednice mogu sudjelovati u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora, vraćajući višak energije u mrežu uz naknadu po fiksnoj početnoj tarifi, ili mogu funkcionirati kao samostalne "mikromreže" koje rade neovisno o glavnoj mreži. Slučajevi analizirani od strane Zajedničkog istraživačkog centra pokazuju da su energija sunca i energija vjetra najčešće korištene tehnologije što je vidljivo na slici 3.3. Primjeri inicijativa za proizvodnju energije iz energije sunca mogu se vidjeti u mnogim zemljama zapadne Europe, gdje su političke mjere poput *feed-in* tarifa i neto mjerenja doprinijele širenju lokalne proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Osim na kućanstvima, solarni paneli su također prikladni za postavljanje na krovovima javnih zgrada i farmi. Vjetroturbinе u vlasništvu zajednica prisutne su u zemljama poput Belgije, Njemačke, Francuske i Škotske. Općenito, energija vjetra je dominantna u područjima s idealnim uvjetima za vjetar, kao što su Danska i Švedska. [4]



Slika. 3.3. Postotci najčešće korištenih obnovljivih izvora energije u energetske zajednicama [4]

Studije pokazuju da su projekti energetske zajednice koje se oslanjaju na hidroelektrane rjeđi, ali ipak postoje. Također, postoji nekoliko primjera zajedničkih projekata na biomasa u zemljama

poput Švedske, Danske, Njemačke, Poljske i Belgije. Zadruga za daljinsko grijanje, koje koriste drveno gorivo za proizvodnju topline te CHP, posebno su uobičajene u Danskoj (s oko 300 takvih zadruga) i Njemačkoj. U Danskoj, Marstal Fjernvarme, mreža gradskog grijanja u vlasništvu građana koristi solarne toplinske kolektore i dizalice topline za opskrbu toplom vodom otok Ærø. Neke višenamjenske zadruga kao što su Enercoop u Francuskoj, EWS Schönau u Njemačkoj i Som Energia u Španjolskoj također ulažu ili kupuju bioplina. Također postoje zajednice koje koriste biomasu iz lokalnih poljoprivrednih i šumskih resursa za proizvodnju električne energije. Na primjer, Bioenergiedorf Jühnde je prvo njemačko selo koje proizvodi toplinsku i električnu energiju putem obnovljive biomase i CHP, s lokalnom toplinskom mrežom koja isporučuje toplinu kućanstvima. U Švedskoj postoji nekoliko eko-sela organiziranih kao društvene zajednice alternativnog načina života u lokalnom vlasništvu. Jedan primjer je Solbyn koji okuplja stanovnike koji dijele ekološki stil života kroz stambenu udrugu. Koristi izolaciju, solarno grijanje i sustave izmjene topline za povećanje učinkovitosti kućanstva. [4]

3.4. Energetske zajednice u Republici Hrvatskoj

Europska unija je 2019. ozakonila koncept energetske zajednice kroz Direktivu „Čista energija za sve Europljane” kao ključni element postizanja energetske tranzicije Europske unije do 2050. Ciljevi strategije Europske unije za energiju sunca, koja uključuje proizvodnju električne energije putem fotonaponskih panela ili koncentriranih solarnih sustava, predviđaju uspostavu barem jedne energetske zajednice temeljene na obnovljivim izvorima energije na području svake jedinice lokalne samouprave s više od 10 000 stanovnika u svakoj zemlji EU do 2025. Provedba prvog pilot projekta energetske zajednice u Hrvatskoj identificirala je ozbiljne probleme i prepreke na stvaranje energetske usluga. Proces osnivanja energetske zajednice u skladu s postojećim zakonima je izazovan, dugotrajan i isplativ. Energetske zajednice nude jedinstvene prilike građanima, malim i srednjim poduzećima, privatnom sektoru i drugim zajednicama na svom području da skupe sredstva i postanu ulagači u održiva energija, energetske nadogradnje, skladištenje energije i tržišta pogodnosti. Projekt društvene energije služi primarnim energetske ciljevima: ekološkim, ekonomskim i društvenim.[23]

U Hrvatskoj je Energetska zajednica pravna osoba upisana u registar udruga. Iz tog razloga energetska zajednica u Hrvatskoj postoji samo u obliku udruge. Energetske zajednice omogućuju povezivanje potrošača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije. One omogućuju učinkovitije korištenje električne energije, dijeljenje energije među članovima i u konačnici smanjenje troškova. Dopuštene su i udruge potrošača koji nemaju vlastite elektrane, ali

žele biti dio društva i koristiti električnu energiju iz obnovljivih izvora energije. Trenutno u Hrvatskoj postoje brojne energetske inicijative, a 5. ožujka 2024. godine otvorena je prva energetska zajednica u Hrvatskoj „Moja Energetska Zajednica“, službeno osnovana energetska zajednica – MEC. Nalazi se u općini Rugvica u zagrebačkoj pokrajini. U zajednici sudjeluju četiri obiteljske kuće iz iste ulice, koje zajedno imaju fotonaponsku elektranu instalirane snage 3,6 kW. Očekuje se da će godišnja proizvodnja električne energije biti oko 4000 kWh. Jedna od mogućnosti koju ova energetska zajednica pokušava ostvariti jest virtualno dijeljenje energije putem platforme. Član koji proizvodi vlastitu električnu energiju može u određenim obračunskim intervalima (svakih 15 minuta) ostvariti višak proizvodnje. Taj višak se dijeli na način da svaki korisnik dobije jednak udio proizvedene energije (fiksna ključ s jednakim udjelima dobivene proizvodnje je odabran u zajednici), ali samo do razine svoje trenutne potrošnje. Na primjer, ako je ukupan višak 15 kWh, a dijeli se na 3 korisnika, svaki može dobiti maksimalno 5 kWh, ali samo ako toliko i troši. Ako jedan od članova u tom intervalu troši samo 2 kWh, preostala 3 kWh ostaju vlasništvo proizvođača i prodaju se opskrbljivaču putem njegovog obračunskog mjernog mjesta. U suradnji s HEP ODS-om i HEP opskrbom, energetska zajednica nastoji što prije realizirati virtualno dijeljenje energije i u operativnom okruženju. Trenutno se radi na stvaranju druge energetske zajednice u Ivanić-Gradu u sklopu projekta LOGYCO kojeg vodi Udruga za održivi razvoj. Međutim, iako razvoj energetskih zajednica napreduje u Republici Hrvatskoj, i dalje postoje mnoge prepreke. Kako bi se energetska zajednica osnovala, potrebna je dozvola za obavljanje energetske djelatnosti, što podrazumijeva predaju zahtjeva za izdavanje dozvole za obavljanje energetske djelatnosti (obrazac ZDOED) i 18 drugih dokumenata uz plaćanje samog zahtjeva u iznosu od 995,42 €. Osim toga potrebno je zaposliti jednog djelatnika na puno radno vrijeme što može biti velika prepreka za neke manje zajednice. [24]

3.5. Prednosti energetskih zajednica

Energetske zajednice važan su dio energetskog sustava, pružajući energetske učinkovitost i upravljanje potražnjom, podržavajući prebacivanje i uključivanje šire zajednice u ključne izazove energetske tranzicije i pomaganju klimatskih promjena. Prijelaz na klimatsku neutralnost ne može se postići samo tehnologijom i tržištima. Sudjelovanje građana i lokalnih zajednica ključno je kako bi ova tranzicija bila učinkovita i pravedna te kako bi se osiguralo da svi dijele njezine ekonomske, ekološke i društvene koristi. Energetske zajednice su oblik suradnje koji omogućuje građanima i lokalnim zajednicama da se aktivno uključe u projekte obnovljivih izvora energije. Budući da energetske zajednice mogu imati snažan društveni utjecaj, one igraju važnu ulogu u društvu, osim proizvodnje čiste energije. [25]

1. Energetske zajednice nude čistu i lokalnu energiju

Članovi zajednice vlastitom proizvodnjom štite se od cijena na tržištu što je izrazito važno u kriznim vremenima. Isto tako zajednice osvješćuju članove u odgovornosti te povećavaju energetske svijest i pismenost o ugljiku, što vodi do promjena u ponašanju.

2. Energija i klimatske promjene

Energetske zajednice donose brojne prednosti, uključujući smanjenje emisija ugljika koje bi inače bilo teško postići. Povećavaju lokalnu proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, često iskorištavajući objekte koji inače ne bi bili ekonomski isplativi, poput društvenih stanova. Također povećavaju učinkovitost resursa, iskorištavajući neiskorištene krovove za proizvodnju energije i smanjujući gubitke u prijenosu kada se energija proizvodi i koristi lokalno. Energetske zajednice otvaraju nove mogućnosti za uključivanje ljudi u lokalne akcije koje se bave klimatskim promjenama, nestašicom goriva, energetske učinkovitošću i inovacijama.

3. Energetske zajednice mobiliziraju lokalni kapital

Energetske zajednice potiču građane i članove lokalnih zajednica da investiraju u projekte i usluge, čime mobiliziraju lokalni kapital. Procjenjuje se da bi na europskoj razini građani mogli prikupiti više od 200 milijardi eura za energetske tranzicije do 2030. godine. Osim toga, ulaganje u lokalne projekte obnovljive energije smanjuje količinu novca koja leži u bankama, sprječavajući njihovo korištenje za financiranje projekata fosilnih goriva.

4. Energetske zajednice bore se protiv energetske siromaštva

Mnogi energetske projekti u vlasništvu zajednice podržavaju energetske siromašne kućanstva u svom području. Kao integralni dijelovi lokalne zajednice, energetske zajednice mogu identificirati ranjive potrošače koje institucionalni programi često zanemaruju i razviti prilagođena rješenja za njih. Kada se općinski projekti, usluge i aktivnosti provode u suradnji s energetske zajednicama, njihov učinak je veći.

5. Inovacije

Pionirski projekti koji testiraju inovacije u zajednici uključuju različite inicijative, kao što su smanjenje računa za energiju za stanovnike u blizini postrojenja za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora i pružanje lokalnih fleksibilnih usluga. Također obuhvaćaju usluge lokalne mreže koje se bave kapacitetom, balansiranjem, frekvencijskim odzivom i naponom, kao i praćenje korištenja tehnologija u stvarnim uvjetima.

Na koncu, sudjelovanje i angažman unutar energetske zajednice povećavaju društvenu koheziju kroz poboljšanu interakciju i dijalog među članovima. Članovi zajednice surađuju i razvijaju

zajednički identitet, što pomaže u izgradnji lojalnosti i povjerenja. Kroz participativne procese, pronalaze zajednička rješenja za probleme koje ne bi mogli riješiti sami. Energetski projekti zajednice također angažiraju širu javnost informiranjem građana i pozivanjem na sudjelovanje u projektima proizvodnje obnovljive energije i energetske učinkovitosti. Lokalni građani imaju koristi od inicijativa koje financiraju energetske zajednice, poput izgradnje održivih koncertnih dvorana ili postavljanja punionica za električne bicikle. [26]

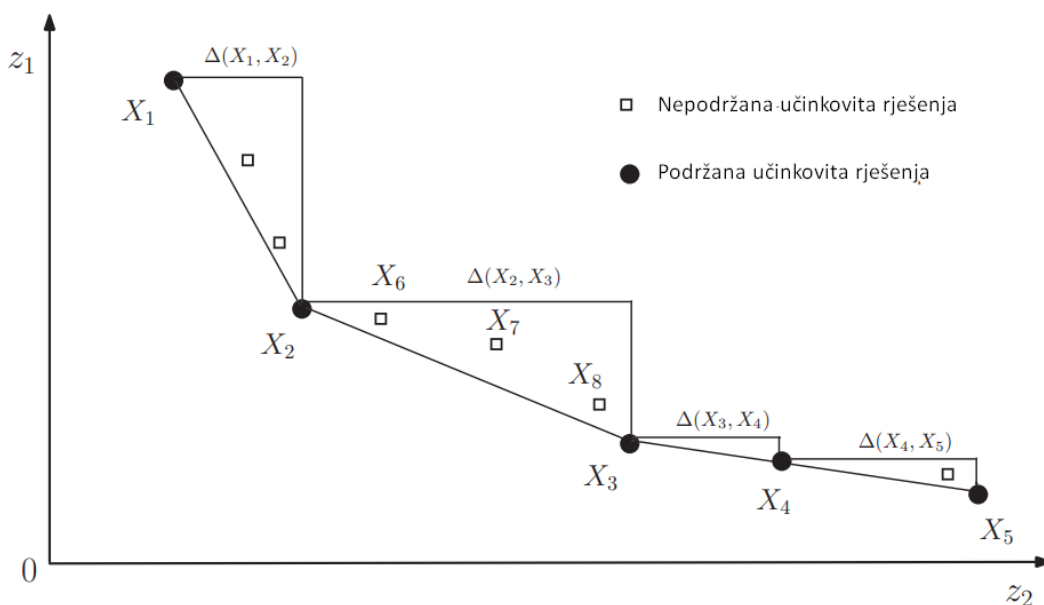
4. VIŠECILJNA OPTIMIZACIJA

U višeciljnoj optimizaciji (engl. *Multi-objective optimization - MOO*) postoji više od jedne funkcije cilja i ne postoji optimalno rješenje koje je istovremeno optimalno za sve ciljeve. U višeciljnoj optimizaciji koncept optimalnosti zamijenjen je Pareto učinkovitošću ili optimalnošću. Pareto učinkovita (ili optimalna, nedominirana, itd.) rješenja su rješenja koja se ne mogu poboljšati u jednom cilju bez pogoršanja u barem jednom od ostalih ciljeva.

Matematička definicija učinkovitog rješenja je sljedeća:

Pretpostavka je da su sve funkcije cilja f_k gdje je $k = 1, 2, \dots, p$ funkcije koje treba minimizirati. Postoji moguće rješenje x MOO problema te je ono efikasno ukoliko ne postoji rješenje x' za koje vrijedi $f_k(x') \leq f_k(x)$ gdje je $e k = 1, 2, \dots, p$.

U slučaju nekonveksnosti izvedivog cilja i prostora za odlučivanje, npr. mješovito cjelobrojno programiranje (engl. *Mixed integer programming - MIP*), skup učinkovitih rješenja može se dalje podijeliti na podržana i nepodržana učinkovita rješenja. Podržana učinkovita rješenja su optimalna rješenja problema pojedinačnog cilja izračunata metodom težinske sume, za bilo koje nenegativne vrijednosti težinskih faktora (granična rješenja unutar izvedivog prostora). Graf na slici 4.1. naziva se Pareto fronta te on jasnije prikazuje razliku između podržanih i nepodržanih učinkovitih rješenja. [27]



Slika 4.1. Grafički prikaz podržanih i nepodržanih učinkovitih rješenja višeciljne optimizacije [27]

4.1. Metode višeciljne optimizacije

MOO je proces koji se koristi kada postoji više ciljeva koje treba optimizirati istovremeno, a ti ciljevi su često sukobljeni i nerazmjerni. Za razliku od jednociljne optimizacije, gdje se optimizira samo jedan cilj, MOO zahtijeva pronalaženje kompromisa između različitih ciljeva. Motivacija za korištenje MOO-a je zato što u optimizaciji ne zahtijeva komplicirane jednadžbe, što posljedično pojednostavljuje problem. Problem donošenja odluka u MOO-ima omogućuje postizanje kompromisa između suprotstavljenih ciljeva. U MOO-u ne postoji jedno najbolje rješenje za sve namjene, već nekoliko rješenja. [28] Postoji mnogo metoda za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema te će tri najčešće korištene metode biti opisane u ovom radu.

4.1.1. Metoda težinske sume

Metoda težinske sume jedna je od najjednostavnijih i najčešće korištenih metoda višeciljne optimizacije. Ova metoda kombinira više ciljeva u jednu funkciju cilja korištenjem težinskih faktora koji odražavaju relativnu važnost svakog cilja. Ako postoji p broj ciljeva optimizacije funkcije f_k gdje je $k = 1, 2, \dots, p$, tada se koristi metoda težinske sume za pretvaranje više ciljeva u jedan cilj te je ta metoda definirana jednadžbom (4-1):

$$f(x) = \min \sum_{k=1}^p [\omega_k \cdot f_k(x)] \quad (4-1)$$

gdje je ω skup težinskih faktora kojima se množe funkcije koje je potrebno minimizirati. Za težinske faktore vrijedi uvjet $\omega_k \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, p$. Na ovaj način se problem s više funkcija cilja pretvara u problem s jednom funkcijom cilja, koji se može riješiti klasičnim optimizacijskim algoritmima. Prednosti metode težinske sume uključuju jednostavnost i lakoću primjene. Metoda omogućuje korisnicima da jasno definiraju preferencije između ciljeva putem težinskih faktora, čineći je intuitivnom i prilagodljivom za različite probleme. Međutim, postoji nekoliko ograničenja. Prvo, učinkovitost ove metode ovisi o pravilnom odabiru težinskih faktora. Ako su težinski faktori neprikladno odabrani, rješenja mogu biti pristrana prema određenom cilju. Drugo, metoda može propustiti Pareto optimalna rješenja kada je Pareto fronta nekonveksna, što znači da ne može pronaći sva kompromisna rješenja. Struktura metode težinske sume vrlo je jednostavna te ju je lako razumjeti i primijeniti. Međutim, u ovoj metodi, donositelji odluka moraju unaprijed odlučiti o težinskim faktorima. [29]

4.1.2. Metoda ε - ograničenja

Metoda ε – ograničenja zahtijeva da granice za svaku funkciju cilja budu određene iskustvima. U ovoj metodi, jedan cilj optimizira se kao glavna funkcija cilja, dok se ostali ciljevi postavljaju kao ograničenja sa zadanim vrijednostima ε . Prilikom primjenjivanja metode ε – ograničenja na funkcije cilja f_k gdje je $k = 1, 2, \dots, p$, potrebno je odrediti jednu funkciju cilja $f_i(x)$ koja će biti proglašena optimiziranom funkcijom, a ostale funkcije će biti postavljene kao ograničenja optimizacijskog problema. Ova metoda prikazana je jednadžbom (4-2):

$$\begin{aligned} \min f(x) \Rightarrow \quad & \min f_i(x) \\ \text{s. t. } & f_k(x) \leq \varepsilon_k, 1 \leq k \leq p, k \neq i \end{aligned} \quad (4-2)$$

gdje je $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p]^T$ skup gornjih granica procijenjenih vrijednosti funkcije cilja koje su unaprijed odredili donositelji odluka, $f_i(x)$ jest optimizirana funkcija cilja, a $f_k(x)$ ostali ciljevi ograničeni vrijednostima ε . Prednost metode ε - ograničenja leži u tome što jamči da će cilj $f_i(x)$ dobiti idealnu vrijednost i uzima u obzir druge $p - 1$ ciljeve $f_k(x)$. Naprimjer, u slučaju funkcije cilja koja se sastoji od dvije zasebne funkcije cilja, jedna funkcija cilja biti će proglašena funkcijom koju treba optimizirati, dok će druga funkcija cilja biti postavljena kao ograničenje. Metoda ε – ograničenja omogućuje veću kontrolu nad problemom optimizacije jer korisnik može precizno definirati prihvatljive granice za svaki cilj. To omogućuje bolju prilagodbu rješenja specifičnim potrebama sustava, osobito kada je jedan cilj važniji od drugih. Također, ova metoda omogućuje generiranje Pareto optimalnih rješenja jer postupnim mijenjanjem vrijednosti ε možemo istražiti cijelu Pareto frontu. Međutim, postoje poteškoće u postavljanju gornjih granica procijenjenih vrijednosti funkcije cilja. Ako su gornje granice premale, algoritam možda neće pronaći izvedivo rješenje; ili ako su gornje granice prevelike, drugi ciljevi kao ograničenja mogu imati značajno umanjene vrijednosti. Stoga se razumne vrijednosti gornjih granica općenito određuju prema inženjerskim iskustvima. [30]

4.1.3. Metoda ciljanog programiranja

Metoda ciljanog programiranja jedna je od najjednostavnijih i najčešće korištenih metoda u višeciljnim optimizacijama. Osnovna ideja ove metode je da se prvo definiraju željene vrijednosti za svaku funkciju cilja, a zatim se optimizira funkcija koja minimizira odstupanje između stvarnih i željenih vrijednosti. Drugim riječima, ciljevi se transformiraju u funkcije odstupanja koje se nastoje minimizirati kako bi se postigao željeni kompromis. Matematički model metode ciljanog programiranja prikazan je jednadžbom (4-3):

$$\min f(x) \Rightarrow \min \sum_{k=1}^p |f_k(x) - do_k| \quad (4-3)$$

gdje je do_k željena vrijednost k -tog cilja funkcije $f_k(x)$, a p predstavlja broj funkcija cilja koje se optimiziraju. Metoda ciljanog programiranja temelji se na jednostavnom principu postavljanja ciljeva i minimizacije odstupanja od tih ciljeva. Na početku, donositelji odluka postavljaju željene vrijednosti za svaku funkciju cilja koje predstavljaju idealne ishode. Nakon toga, metoda traži rješenja koja minimiziraju ukupno odstupanje između stvarnih vrijednosti funkcija ciljeva i unaprijed postavljenih ciljeva. Ova metoda ima nekoliko prednosti. Prvo, jednostavna je za implementaciju i razumijevanje, što je čini popularnom za primjenu u mnogim višeciljnim optimizacijskim problemima. Drugo, fleksibilna je jer omogućuje širok raspon primjena i jednostavno definiranje ciljeva. Konačno, intuitivna je za korisnike jer se fokusira na smanjenje razlika između željenih i stvarnih vrijednosti ciljeva. Međutim, metoda ima i ograničenja. Ključno je to da postavljanje realnih i izvedivih ciljeva može biti izazovno, a rješenja su izrazito osjetljiva na odabir ciljeva. Promjena ciljeva može značajno utjecati na konačna rješenja. Također, metoda je manje učinkovita za složenije, nelinearne probleme jer ne može uvijek pravilno opisati složene odnose između varijabli. [29]

5. PRIMJER OPTIMALNOG UPRAVLJANJA POGONOM ENERGETSKE ZAJEDNICE GRAĐANA

Sukladno zadatku rada izrađen je optimizacijski model sustava upravljanja energijom energetske zajednice. Za razvoj i rješavanje optimizacijskog modela korišten je program GAMS (engl. *General Algebraic Modeling System*). Razvijeni optimizacijski model za cilj ima optimizirati pogon energetske zajednice, točnije minimizaciju ukupnih troškova električne energije i emisija CO₂ primjenom višeciljne optimizacije.

5.1. Matematički model

Matematički model sastoji se od dvije funkcije cilja (minimizacija troškova električne energije i minimizacija emisija CO₂) kombinirane u jednu funkciju cilja i ograničenja. Primjenjuje se metoda težinske sume.

Funkcija cilja koja se minimizira prikazana je jednačbom (5-1):

$$opt = \omega \cdot energy_cost + (1 - \omega) \cdot CO_{2_total} \quad (5-1)$$

gdje su:

- opt – predstavlja funkciju koja se minimizira, kombinaciju troškova električne energije i emisija CO₂,
- ω – težinski faktor kojim se označava važnost svake od dviju funkcija cilja,
- $energy_cost$ – ukupni troškovi električne energije,
- CO_{2_total} – ukupna količina emisija CO₂.

Ukupni troškovi električne energije svih aktivnih kupaca definirani su jednačbom (5-2):

$$energy_cost = c \cdot \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_k(p,t)}{6} \cdot C_{kt}(p,t) - \frac{P_p(p,t)}{6} \cdot C_{pt}(p,t) + \frac{P_{lk}(p,t)}{6} \cdot C_c(p,t) - \frac{P_{lp}(p,t)}{6} \cdot C_c(p,t) \right) \quad (5-2)$$

gdje su:

- c – faktor skaliranja, konstanta kojom se skaliraju troškovi električne energije,
- $P_k(p,t)$ – snaga prilikom uvoza električne energije iz mreže od strane aktivnog kupca p u trenutku t ,

- $P_p(p, t)$ – snaga prilikom izvoza električne energije u mrežu od strane aktivnog kupca p u trenutku t ,
- $P_{lk}(p, t)$ – snaga prilikom uvoza električne energije s lokalnog tržišta energijom od strane aktivnog kupca p u trenutku t ,
- $P_{lp}(p, t)$ – snaga prilikom izvoza električne energije na lokalno tržište energijom od strane aktivnog kupca p u trenutku t ,
- $C_{kt}(p, t)$ – cijena električne energije koju aktivni kupac p plaća prilikom uvoza električne energije iz mreže u trenutku t ,
- $C_{pt}(p, t)$ – cijena električne energije koju aktivni kupac p prima prilikom izvoza električne energije u mrežu u trenutku t ,
- $C_c(p, t)$ – cijena električne energije koju aktivni kupac p plaća/prima na lokalnom tržištu energijom u trenutku t .

Vrijeme t u ovom slučaju predstavlja interval od 10 minuta. Snaga se za svaki trenutak t dijeli sa 6 kako bi se dobile prosječne vrijednosti na satnoj razini, budući da sat sadrži 60 minuta, a intervali su definirani u trajanju od 10 minuta ($60/10 = 6$). Ovakav pristup omogućuje modelu da precizno prati potrošnju i proizvodnju energije u 10-minutnim intervalima, dok istovremeno prikazuje agregirane vrijednosti na satnoj osnovi, što doprinosi boljoj analizi i upravljanju energetske tokovima unutar sustava.

Ukupna količina emisija CO₂ prouzrokovana uvozom električne energije iz mreže definirana je jednadžbom (5-3):

$$CO_{2_total} = \sum_p CO_2 \cdot E_{imp,uk}(p) \quad (5-3)$$

gdje su :

- CO₂ – ugljični intenzitet uvezene električne energije iz mreže,
- E_{imp,uk}(p) – ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane aktivnog kupca p u energetske zajednici.

Stanje napunjenosti baterije električnih vozila definirano je za prvi trenutak ($t = 1$) prema (5-4) te za svaki slijedeći trenutak ($t > 1$) prema (5-5):

$$SOCa(p, ev, t) = SOCa(p, ev, start) + \eta_c \cdot \frac{Pcha(p, ev, t)}{6} - \frac{1}{\eta_d} \cdot \frac{Pdcha(p, ev, t)}{6} \quad (5-4)$$

$$SOCa(p, ev, t) = SOCa(p, ev, t - 1) + \eta_c \cdot \frac{Pcha(p, ev, t)}{6} - \frac{1}{\eta_d} \cdot \frac{Pdcha(p, ev, t)}{6} \quad (5-5)$$

gdje su:

- $SOCa(p, ev, t)$ – stanje napunjenosti baterije električnog vozila u trenutku t ,
- $SOCa(p, ev, start)$ – stanje napunjenosti baterije električnog vozila na početku promatranog vremenskog intervala,
- η_c – učinkovitost punjenja baterije električnog vozila,
- $Pcha(p, ev, t)$ – potrebna snaga za punjenje baterije električnog vozila u trenutku t ,
- η_d – učinkovitost pražnjenja baterije električnog vozila,
- $Pdcha(p, ev, t)$ – dobivena snaga prilikom pražnjenja baterije električnog vozila u trenutku t .

Kao i u formuli (5-2), vrijeme t predstavlja 10-minutni interval, a podjela snage s faktorom 6 omogućuje modelu da stanje napunjenosti baterije prikazuje kao prosječnu vrijednost na satnoj razini.

Ograničenja vezana za uvoz i izvoz električne energije iz/u mrežu i na lokalno tržište energije definirana su sljedećim izrazima:

$$0 \leq P_k(p, t) \leq P_{kmax}(p, t) \cdot P_{kbin}(p, t) \quad (5-6)$$

$$0 \leq P_p(p, t) \leq P_{pmax}(p, t) \cdot P_{pbin}(p, t) \quad (5-7)$$

$$0 \leq P_{lk}(p, t) \leq P_{lkmax}(p, t) \cdot P_{lkbin}(p, t) \quad (5-8)$$

$$0 \leq P_{lp}(p, t) \leq P_{lpmax}(p, t) \cdot P_{lpbin}(p, t) \quad (5-9)$$

gdje su:

- $P_{kmax}(p, t)$ – maksimalna snaga koju aktivni kupac p može uvoziti iz mreže u trenutku t ,
- $P_{pmax}(p, t)$ – maksimalna snaga koju aktivni kupac p može izvoziti u mrežu u trenutku t ,
- $P_{lkmax}(p, t)$ – maksimalna snaga koju aktivni kupac p može uvoziti s lokalnog tržišta energijom u trenutku t ,
- $P_{lpmax}(p, t)$ – maksimalna snaga koju aktivni kupac p može izvoziti na lokalno tržište energijom u trenutku t ,

- $P_{kbin}(p, t), P_{pbin}(p, t), P_{lkbin}(p, t), P_{lpbin}(p, t)$ – binarne varijable odluke kojima se određuje uvoz odnosno izvoz električne energije aktivnog kupca p u trenutku t .

Ograničenja vezana za punjenje odnosno pražnjenje baterije električnog vozila definirana su izrazima (5-10) i (5-11):

$$0 \leq P_{cha}(p, ev, t) \leq P_{chamax} \quad (5-10)$$

$$0 \leq P_{dcha}(p, ev, t) \leq P_{chamax} \quad (5-11)$$

gdje je:

- P_{chamax} – maksimalna snaga punjenja odnosno pražnjenja baterije električnog vozila.

Ograničenje koje se odnosi na stanje napunjenosti (SOC) baterije električnog vozila definirano je izrazom (5-12):

$$SOC_{min} \leq SOC_a(p, ev, t) \leq SOC_{max} \quad (5-12)$$

gdje su:

- SOC_{min} – minimalna dozvoljena razina napunjenosti baterije električnog vozila,
- SOC_{max} – maksimalna dozvoljena razina napunjenosti baterije električnog vozila.

Slijedećim ograničenjem osigurana je ravnoteža između uvoza i izvoza električne energije na lokalno tržište. Iz izraza (5-13) vidljivo je da je energija izvezena na lokalno tržište jednaka uvezenoj energiji s lokalnog tržišta:

$$\sum_{p=1}^P P_{lk}(p, t) = \sum_{p=1}^P P_{lp}(p, t) \quad (5-13)$$

Ograničenje istovremenog uvoza i izvoza električne energije iz/u mreže i sa/na lokalnog tržišta definirao je izrazima (5-14) i (5-15):

$$P_{kbin}(p, t) + P_{pbin}(p, t) \leq 1 \quad (5-14)$$

$$Pl_{kbin}(p, t) + Pl_{pbin}(p, t) \leq 1 \quad (5-15)$$

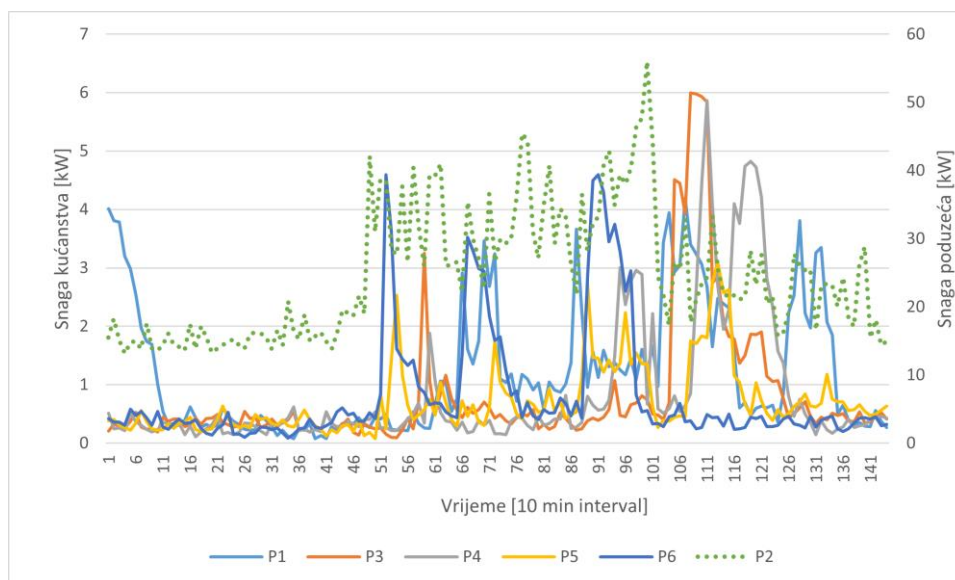
Zbog prisutnosti dviju funkcija cilja, ekonomske i ekološke, formuliranih u jednadžbama (5-2) i (5-3), optimizacijski se model može tretirati kao problem višeciljne optimizacije, koji se rješava primjenom metode težinske sume. Ova metoda omogućuje pretvaranje dviju funkcija cilja u jednu

objedinjenu funkciju. Cilj se postiže pomoću Pareto funkcije, koja kombinira i uravnotežuje oba čimbenika, troškove električne energije i emisije CO₂. Spomenuta funkcija cilja nije samo trošak električne energije, već je kombinacija troškova električne energije definiranih jednačinom (5-2) i emisija CO₂ definiranih jednačinom (5-3), množenih težinskim faktorom ω . Težinski faktor ω označava relativnu važnost svake od dviju funkcija cilja. Gornja granica težinskog faktora ω iznosi 1, te je nametanjem $\omega = 1$ moguće pronaći rješenje koje minimizira očekivane ukupne troškove električne energije, dok donja granica težinskog faktora ω iznosi 0 te je nametanjem $\omega = 0$ moguće pronaći rješenje koje minimizira očekivane emisije CO₂. Promjenom, umjesto toga, težinskog faktora ω u intervalu 0 – 1, moguće je pronaći Pareto granicu, koja uključuje moguća kompromisna rješenja između ekonomskih i ekoloških ciljeva. Ova metoda je jednostavna za implementaciju i pokazalo se da omogućuje pronalaženje svih rješenja koja pripadaju Pareto fronti u slučaju konveksnih problema, uz prisutnost samo dvije funkcije cilja. [31] U modelu su također postavljena određena ograničenja te stoga model poštuje fizička i tehnička ograničenja sustava. Rezultati provedene simulacije u ovom radu pružaju detaljan uvid u strategije upravljanja energetsom zajednicom, s ciljem optimizacije smanjenja troškova električne energije i emisija CO₂.

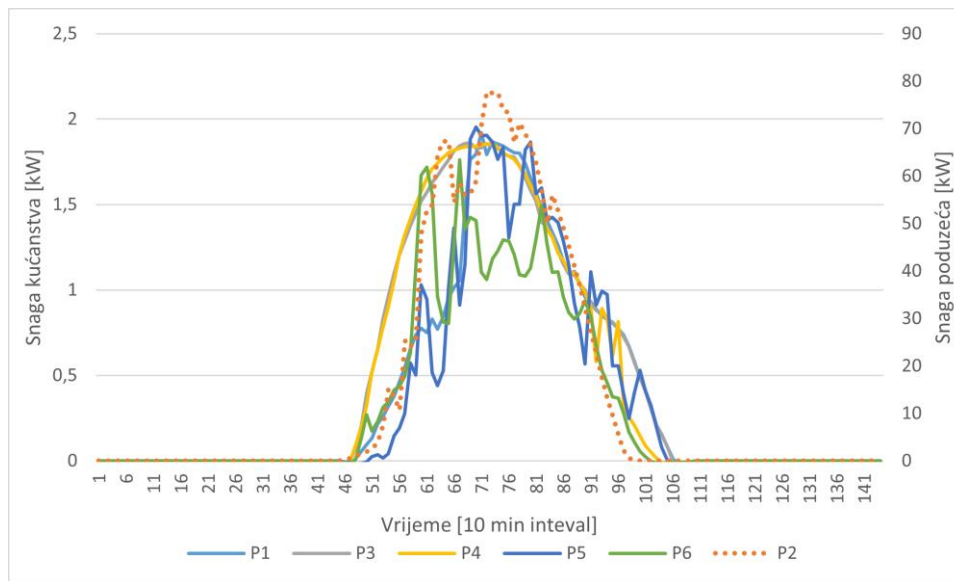
5.2. Višeciljna optimizacija za kratkoročno planiranje pogona energetske zajednice

5.2.1. Ulazni podaci za potrebe rješavanja optimizacijskog modela

Energetska zajednica analizirana u simulaciji sastoji se od šest aktivnih kupaca. P2 predstavlja poduzeće, dok su P1, P3, P4, P5 i P6 kućanstva. Slika 5.1. prikazuje profil potrošnje električne energije svakog aktivnog kupca u zajednici tijekom promatranog vremenskog razdoblja. Jasno se uočava da P2, kao poduzeće, ima daleko veću potrošnju energije u usporedbi s kućanstvima, što je očekivano s obzirom na veće energetske zahtjeve poduzeća. Potrošnja kućanstava (P1, P3, P4, P5, P6) pokazuje niže i ravnomjernije raspodijeljeno opterećenje u usporedbi s poduzećem. Slika 5.2. prikazuje proizvodnju električne energije iz fotonaponskih elektrana unutar zajednice. Vidljivo je da i poduzeće i kućanstva sudjeluju u proizvodnji, pri čemu P2, kao poduzeće, ostvaruje najveću proizvodnju energije. Proizvodnja u kućanstvima također je značajna, ali u skladu s njihovim manjim energetske potrebama. Uočljiva je slična dinamika u rasporedu proizvodnje, gdje svi sudionici postižu vršnu proizvodnju u sličnim vremenskim intervalima. Slika 5.1. i Slika 5.2. jasno prikazuju razliku između potrošnje i proizvodnje energije unutar energetske zajednice, pri čemu poduzeće P2 dominira u oba segmenta, dok kućanstva pokazuju stabilniji i uravnoteženiji profil.



Slika 5.1. Potrošnja električne energije aktivnih kupaca u ovisnosti o vremenu



Slika 5.2. Proizvodnja električne energije aktivnih kupaca u ovisnosti u vremenu

Cijene električne energije su određene prema Bijelom tarifnom modelu sa dvije tarife, nižom i višom tarifom. Podaci o cijenama preuzeti su sa službene stranice HEP-a. Te cijene za kućanstva iznose 0,083 €/kWh za nižu tarifu, odnosno 0,159 €/kWh za višu. Za poduzeća te cijene iznose 0,12 €/kWh te 0,201 €/kWh. Cijena električne energije koja je izvezena u mrežu od strane kućanstva i poduzeća određena je prema tržišnom modelu „Kupac s vlastitom proizvodnjom“ te za kućanstva ona iznosi 0,05 €/kWh, a za poduzeća 0,0374 €/kWh. Cijena električne energije na lokalnom tržištu iznosi 0,025 €/kWh, što predstavlja prosječnu naknadu korištenja distribucijskom mrežom za kućanstva. Ostali ulazni parametri prikazani su u tablici 5.1.

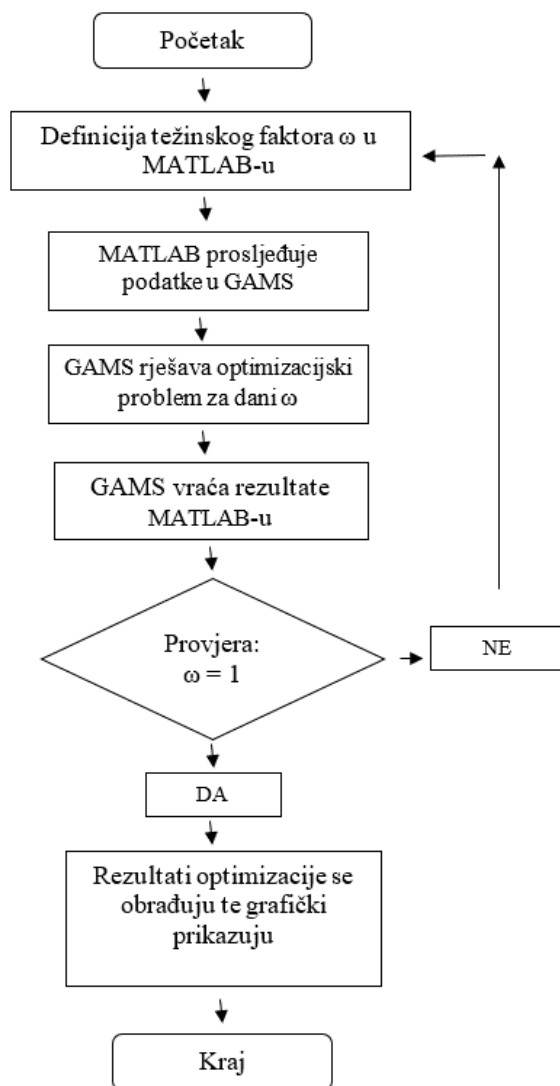
Tablica 5.1. Ulazni parametri optimizacijskog modela

P_{kmax}, P_{lkmax}	13,8/120 kW
P_{pmax}, P_{lpmax}	5/120 kW
η_c, η_d	0.985
P_{chamax}	7,4 kW
CO_2	0,246 kg/kWh
<i>Potrošnja energije električnog automobila</i>	0,175 kWh/km

Također je potrebno uzeti u obzir vrijeme vožnje električnog automobila i koliku udaljenost pređe taj električni automobil u spomenutom vremenu. Vlasnici električnih automobila u prosjeku pređu udaljenost od 40 do 90 km dnevno. U simulaciji je određeno da svaki aktivni kupac s električnim autom pređe udaljenost unutar navedenih granica. Vrijeme putovanja je također različito za svakog aktivnog kupca te ono iznosi između 30 do 90 minuta. [32]

5.2.2. Predloženi pristup u rješavanju optimizacijskog problema

Kako je već navedeno, korišten je težinski faktor ω te faktor skaliranja c . Faktor skaliranja c je faktor kojim se skaliraju ukupni troškovi električne energije kako bi se oni mogli bolje usporediti sa ukupnim emisijama CO_2 . Faktor skaliranja c uvodi se u model kako bi omogućio usporedbu različitih jedinica mjere, ukupnih troškova električne energije, izraženih u eurima, i emisija CO_2 , izraženih u kilogramima. Budući da su troškovi električne energije i emisije CO_2 izraženi u različitim jedinicama i opseg njihovih vrijednosti može se značajno razlikovati, potrebno je uvesti faktor c kako bi se te dvije veličine dovele u sličan raspon vrijednosti. Faktor skaliranja c skalira troškove električne energije tako da budu usporedivi s emisijama CO_2 , omogućujući da se obje funkcije cilja tretiraju ravnopravno u optimizacijskom modelu. Time se sprječava da troškovi ili emisije dominiraju optimizacijskim procesom i osigurava uravnotežen pristup višeciljnoj optimizaciji, gdje se istovremeno minimiziraju i troškovi i emisije CO_2 . Kretanjem težinskog faktora ω od 0 do 1 u koracima od 0.05 pokušava se postići ravnoteža između minimizacije troškova energije te minimizacije emisija CO_2 . Pri vrijednosti $\omega = 1$ glavni je fokus na smanjenju ukupnih troškova, dok se pri vrijednosti $\omega = 0$ optimizacija fokusira isključivo na smanjenje emisija CO_2 . Za potrebe u ovom radu razvijen je algoritam za automatizaciju procesa višeciljne optimizacije u MATLAB-u. Algoritam započinje definicijom gornje i donje granice težinskog faktora ω u MATLAB-u. MATLAB zatim prosljeđuje potrebne ulazne podatke optimizacijskom modelu razvijenom u GAMS-u, gdje se za svaku vrijednost ω u rasponu od 0 do 1 rješava optimizacijski problem. Nakon završetka svake iteracije, rezultati dobiveni optimizacijskim modelom vraćaju se u MATLAB i pohranjuju te se provjerava je li dosegnuta gornja granica težinskog faktora ω koja iznosi 1. Ukoliko gornja granica nije dosegnuta proces se ponavlja. Cilj ovoga algoritma je pronaći optimalnu vrijednost težinskog faktora ω . Nakon dosegnute gornje granice težinskog faktora ω rezultati optimizacije se obrađuju te grafički prikazuju. Na temelju dobivenih rezultata odabire se optimalno rješenje, odnosno odabire se vrijednost težinskog faktora ω koja pruža najbolju ravnotežu minimizacije troškova električne energije i minimizacije emisije CO_2 . Proces navedenog algoritma prikazan je grafički na slici 5.3.

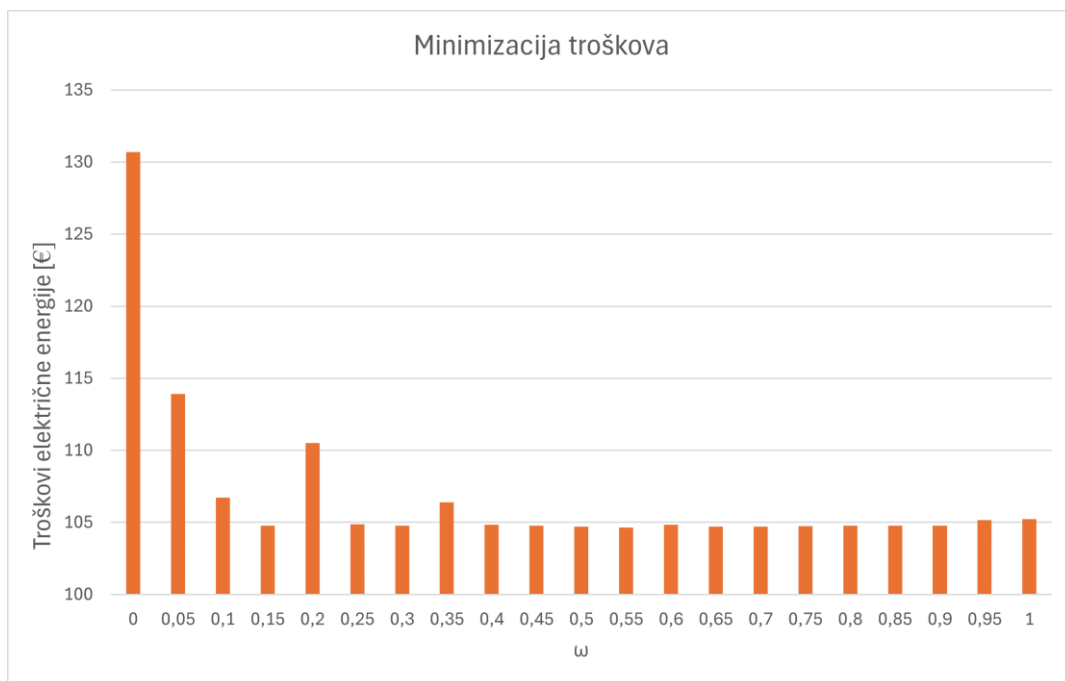


Slika 5.3. Grafički prikaz algoritma za automatizaciju procesa višeciljne optimizacije u MATLAB-u

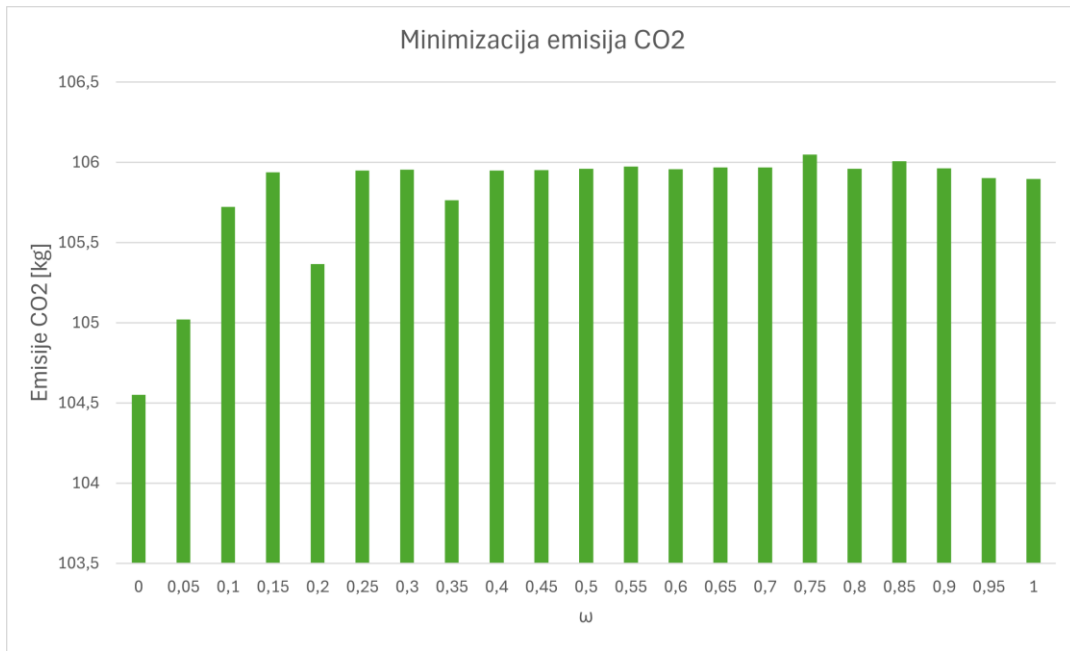
5.3. Plan optimalnog pogona promatrane energetske zajednice

Utjecaj težinskog faktora ω na troškove električne energije i emisije prikazan je na slici 5.4. i slici 5.5. Troškovi prikazani na slikama i u tablicama su stvarni troškovi pomnoženi sa faktorom skaliranja c koji iznosi 2,1 kako bi se vrijednosno uskladile veličine troškova električne energije i emisija CO₂. Na horizontalnim osima prikazana je vrijednost težinskog faktora ω koja koje se kreće u rasponu od 0 do 1, dok vertikalna os prikazuje ukupne troškove električne energije, odnosno emisije CO₂. Prema slici 5.4. vidljivo je da je vrijednost troškova električne energije najveća pri $\omega = 0$ te ona iznosi 130,67 €, odnosno stvaran iznos troškova električne energije glasi 62,22 € kada se u obzir uzme faktor skaliranja c , jer je pri toj vrijednosti težinskog faktora ω cilj u potpunosti minimizirati emisije CO₂. Na slici 5.5. primjećuje se trend suprotan onome sa slike 5.4. Pri vrijednosti težinskog faktora $\omega = 0$ emisije CO₂ poprimaju najnižu vrijednost od 104,55 kg,

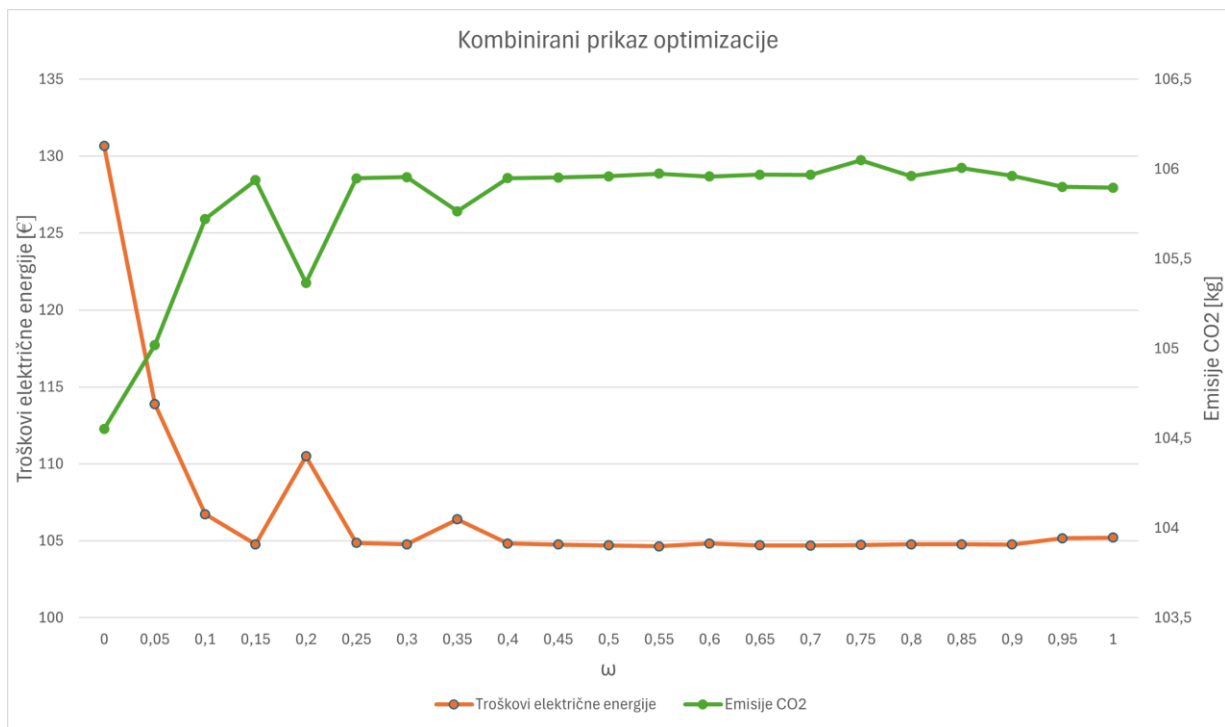
dok se pri povećanju težinskog faktora ω povećavaju i emisije CO₂. Iznos emisija CO₂ se stabilizira pri vrijednostima težinskog faktora $\omega \geq 0.4$ te poprimaju vrijednost 105,96 kg. Maksimalna vrijednost emisija CO₂ iznosi 106,04 kg. Slika 5.6. pruža usporedan prikaz skaliranih troškova električne energije i emisija CO₂ u odnosu na vrijednosti težinskog faktora ω . Prema tome grafu jasnije je da se povećanjem vrijednosti težinskog faktora ω ukupni troškovi električne energije smanjuju te se pri većim vrijednostima težinskog faktora ω stabiliziraju, dok su ukupne emisije veće pri većim vrijednostima težinskog faktora ω . Ovakav prikaz pruža uvid u kompromis između ekonomskih i ekoloških ciljeva rada te je ovakav prikaz ključan, uz prikaz Pareto fronte na slici 5.7. za definiranje optimalne vrijednosti težinskog faktora ω kojom će se postići ravnoteža između ekološke održivosti i ekonomske isplativosti sustava.



Slika 5.4. Prikaz ukupnih troškova električne energije u odnosu na ω



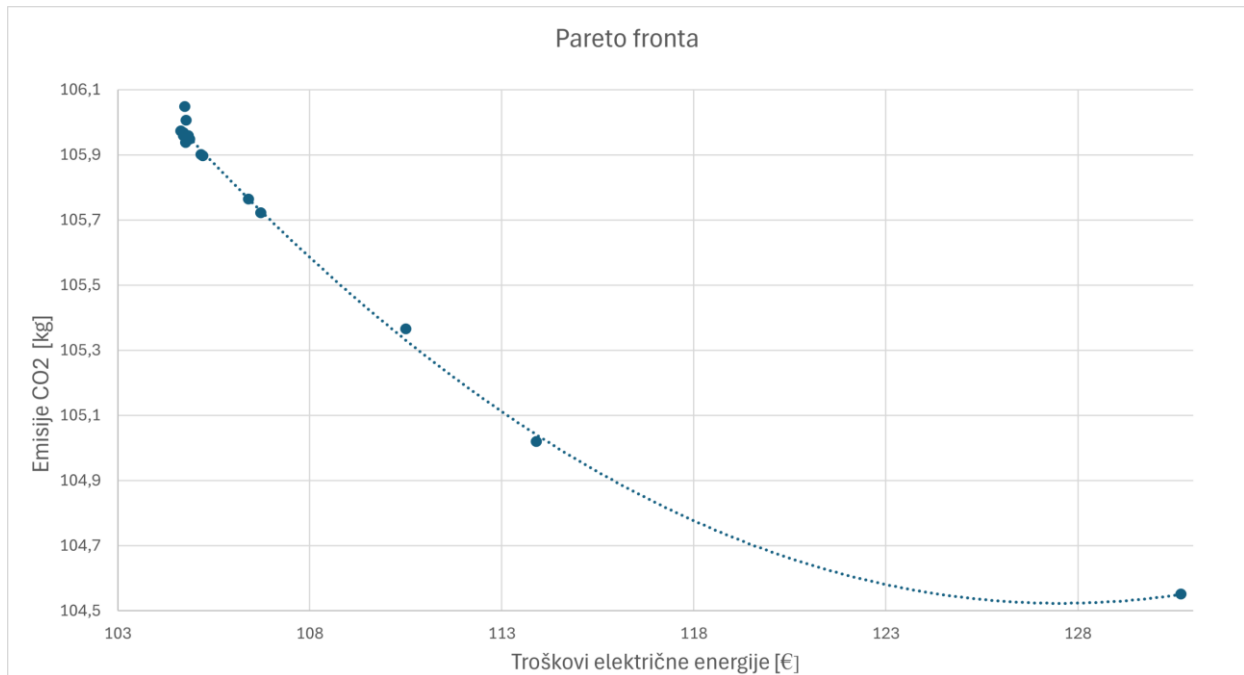
Slika 5.5. Prikaz količine emisija CO₂ u odnosu na ω



Slika 5.6. Kombinirani prikaz troškova električne energije i ukupnih emisija CO₂

Na slici 5.7. prikazana je Pareto fronta koja ukazuje na kompromis između troškova električne energije i emisija CO₂. Na vertikalnoj osi prikazane su ukupne emisije CO₂ u kilogramima, dok su na horizontalnoj osi prikazani troškovi električne energije u eurima pomnoženi sa faktorom skaliranja c koji iznosi 2,1. Iz ovoga grafa je jasno da se emisije CO₂ i troškovi električne energije

ne mogu u potpunosti minimizirati istodobno. Uz pomoć Pareto fronte moguće je identificirati efikasno, odnosno optimalno rješenje, ono rješenje koje neće uvelike pogoršati ni ukupne troškove električne energije ni ukupne emisije CO₂. U kontekstu ovoga rada, odnosno ove simulacije, Pareto fronta govori koliko će energetska zajednica morati kompromitirati troškove električne energije ako želi smanjiti emisije CO₂ i obratno.

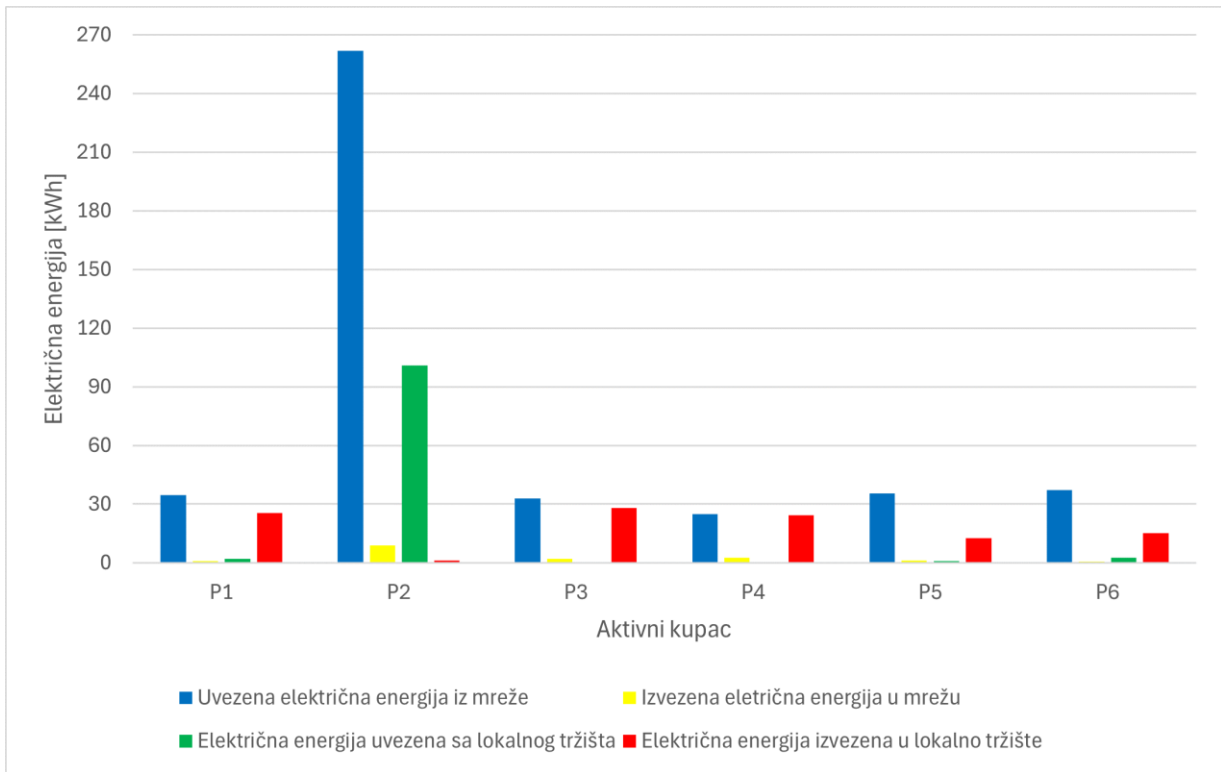


Slika 5.7. Pareto fronta

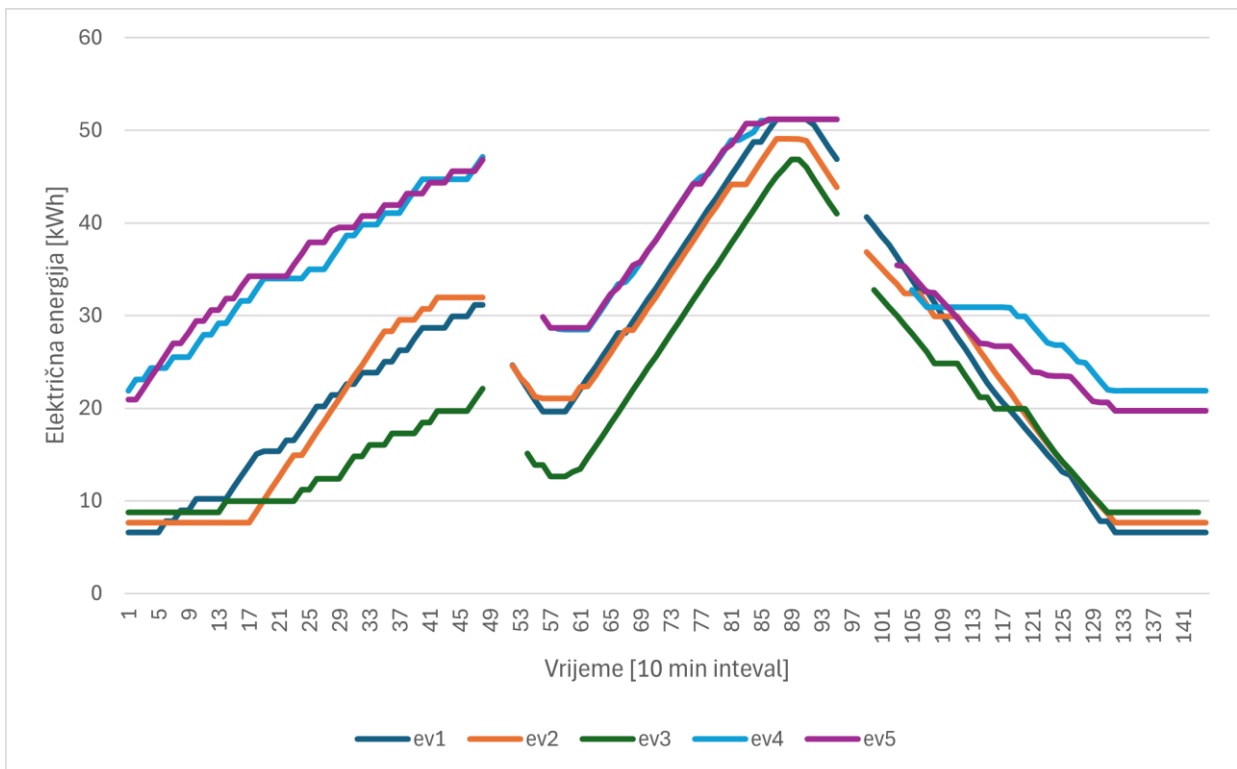
Rezultati prikazani na slikama odnose se na optimizirano rješenje dobiveno za odabranu vrijednost težinskog faktora $\omega = 0,05$. Na slici 5.8. prikazane su količine uvezene i izvezene energije u različite vremenske intervale tijekom dana. Prikazane vrijednosti odnose se na energiju koja se uvozi iz vanjske mreže ili izvozi u mrežu, kao i na energiju koja se razmjenjuje na lokalnom tržištu energijom unutar energetske zajednice. Količine energije, koje se uvoze i izvoze, se mijenjaju kroz dan, odražavajući dinamiku potrošnje i proizvodnje energije unutar zajednice. Ovakav prikaz omogućuje uvid u energetske tokove zajednice te ukazuje na razdoblja kada je zajednica energetski neovisna ili ovisna o vanjskim izvorima energije. Vidljivo je da aktivni kupac P2, koji je poduzeće, uvozi znatno veću količinu energije u usporedbi s ostalim aktivnim kupcima. To je očekivano jer poduzeća obično imaju veću energetska potrošnju nego kućanstva, zbog čega je P2 ključni uvoznik energije u ovoj zajednici. Aktivni kupci P1, P3, P4, P5 i P6, koji su kućanstva, pokazuju znatno manju potrebu za uvozom energije u usporedbi s poduzećem P2. Osim toga, ovi kupci također sudjeluju u izvozu energije na lokalno tržište, što pomaže zajednici da smanji svoju ovisnost o vanjskoj mreži. Zaključno, Poduzeća (P2) imaju veliku potrošnju i značajno ovise o uvozu

energije, dok kućanstva imaju uravnoteženiji pristup te djelomično pokrivaju vlastite energetske potrebe, a višak energije čak i izvoze.

Na slici 5.9. prikazano je stanje napunjenosti baterije (engl. *State of Charge - SOC*) električnih vozila kroz dan. Stanje baterije varira ovisno o vremenu dana, što ukazuje na punjenje ili pražnjenje baterija. Vidljivo je kako postoji tri vremenska intervala u kojima se SOC mijenja. U prvom vremenskom intervalu vidljiv je porast stanja napunjenosti baterija električnih vozila dok su spojeni na kućnim punionicama u kućanstvima. Ovo sugerira da kućanstva pune svoje električne automobile u noćnim i jutarnjim satima kada su cijene električne energije niže. U drugom vremenskom intervalu dana baterije električnih vozila pune se u poduzeću, odnosno za vrijeme radnog vremena. Viškovima električne energije pune se baterije električnih vozila u poduzeću, što je opravdano s obzirom na cijenu izvoza električne energije u mrežu. Električna vozila zahtijevaju značajnu količinu energije za punjenje, posebno ako poduzeće ima više vozila koja se pune istovremeno. U zadnjoj trećini dana vidljiv je pad stanja napunjenosti baterija, što sugerira da se električna vozila u kućanstvima koriste, odnosno baterije se prazne za pokrivanje potrošnje. Promjena stanja napunjenosti, u prvom i trećem vremenskom intervalu, ukazuje na to da kućanstva koriste energiju iz svojih baterija za pokrivanje dnevnih energetske potrebe. Umjesto punjenja baterije električnih vozila u večernjim satima kada su cijene električne energije veće, aktivni kupci odlučuju prazniti baterije električnih vozila, dok u noćnim i jutarnjim satima kada su cijene električne energije niže odlučuju puniti baterije električnih vozila. Ovaj prikaz odražava kako se energija koristi i pohranjuje unutar zajednice, a također pruža uvid u učinkovitost upravljanja baterijama električnih vozila tijekom dana. Optimalno upravljanje baterijama električnih vozila omogućuje ravnotežu između potrošnje, pohrane i proizvodnje energije te smanjuje potrebu za uvozom energije iz vanjske mreže, čime se povećava energetska neovisnost zajednice.



Slika 5.8. Razmjena električne energije aktivnog kupca s mrežom i s lokalnim tržištem energije



Slika 5.9. Stanje napunjenosti baterije električnih vozila u ovisnosti o vremenu

Na temelju provedenih analiza iz prethodnih slika te na temelju vrijednosti prikazanim u tablici 5.2. dolazi se do zaključka kako je optimalno rješenje postignuto pri vrijednosti težinskog faktora $\omega = 0,05$. Pri ovoj vrijednosti težinskog faktora ω ukupni skalirani troškovi električne energije iznose 113,89 €, odnosno stvarni troškovi električne energije iznose 54,23 € kada se u obzir uzme faktor skaliranja c koji iznosi 2,1, dok je ukupna količina emisija CO_2 u iznosu od 105,01 kg. Višeciljnom optimizacijom pogona energetske zajednice su, u konačnici, ukupni troškovi električne energije smanjeni za 7,99 € u odnosu na početni iznos troškova električne energije koji iznosi 62,22 € te su i ukupne emisije CO_2 smanjene za 1,03 kg u odnosu na najveći iznos od 106,04 kg. Veći je fokus na smanjenju emisija CO_2 dok se troškovi električne energije održavaju unutar prihvatljivih granica. Iako su troškovi električne energije znatno manji pri većim vrijednostima težinskog faktora ω , potrebno je uzeti u obzir ciljeve energetske zajednice. S obzirom da su energetske zajednice u Hrvatskoj neprofitne organizacije njihov je glavni cilj smanjenje emisija CO_2 , odnosno smanjenje bilo kakvih negativnih utjecaja na okoliš. Stoga se veći značaj pridaje smanjenju emisija CO_2 u odnosu na minimizaciju troškova električne energije. Povećanjem vrijednosti težinskog faktora ω smanjili bi se troškovi električne energije, ali bi se također povećale emisije CO_2 što se protivi principima energetske zajednice. Izbor vrijednosti težinskog faktora $\omega = 0,05$ pruža ravnotežu između odgovornosti prema okolišu i financijske isplativosti energetske zajednice. Pri ovoj vrijednosti težinskog faktora ω su emisije CO_2 pod kontrolom dok su troškovi dovoljno prihvatljivi za članove zajednice.

Tablica 5.2. Tablični prikaz troškova električne energije i ukupnih emisija CO₂ u ovisnosti o ω

ω	Troškovi električne Energije [€]	Skalirani troškovi električne energije [€]	Ukupne emisije CO ₂ [kg]
0	62,22	130,67	104,55
0,05	54,23	113,89	105,01
0,1	50,82	106,72	105,72
0,15	49,89	104,76	105,93
0,2	52,61	110,49	105,36
0,25	49,93	104,86	105,94
0,3	49,89	104,78	105,95
0,35	50,66	106,39	105,76
0,4	49,91	104,82	105,94
0,45	49,88	104,76	105,95
0,5	49,86	104,70	105,95
0,55	49,83	104,64	105,97
0,6	49,92	104,83	105,95
0,65	49,86	104,70	105,96
0,7	49,85	104,69	105,96
0,75	49,87	104,73	106,04
0,8	49,88	104,76	105,96
0,85	49,89	104,77	106,00
0,9	49,88	104,76	105,96
0,95	50,08	105,16	105,90
1	50,10	105,21	105,89

6. ZAKLJUČAK

Postoje razni problemi i prepreke s kojima se energetska zajednica i njeni članovi susreću, ali energetske zajednice nude ogroman potencijal te svojim prednostima pokazuju kako su upravo one važan dio suvremenog energetskeg sustava. Neke od prepreka s kojima se energetske zajednice susreću su financijski problemi, tehničke poteškoće te društvene prepreke. Financijske poteškoće primjećujemo u protokolu osnivanja energetske zajednice u Republici Hrvatskoj. Kako bi se u Republici Hrvatskoj osnovala energetska zajednica potrebno je 18 različitih dokumenata, obrazac za podnošenje zahtjeva te uz to je potrebno priložiti još otprilike 1000 €. Nakon toga svega potrebno je još zaposliti najmanje jednu osobu na puno radno vrijeme. Osim toga postoje u društvene barijere koje se primjećuju u neosviještenosti građana na probleme emisija stakleničkih plinova te strah i otpor prema promjenama. No, daleko od toga da energetske zajednice ne posjeduju potencijal. Jasno da energetske zajednice obnovljivih izvora energije smanjuju emisije ugljika i ostalih stakleničkih plinova, ali one također nude građanima i članovima zajednica da aktivno sudjeluju u energetskej tranziciji mobiliziraju lokalni kapital te štite članove od nestabilnosti cijena na tržištu energije. Uz to također promiču društveno zajedništvo te povećavaju energetske osviještenost građana. Energetske zajednice se nastoje boriti protiv energetskeg siromaštva, pomažući ranjivim kućanstvima koja su često zanemarena od strane institucionalnih programa. Isto tako energetske zajednice pomažu široj javnosti, informirajući ih o projektima obnovljivih izvora energije.

Rezultati provedenih analiza u ovom radu prikazuju kako dobra optimizacija pogona energetske zajednice može utjecati na emisije stakleničkih plinova i ukupnih troškova proizvodnje, potrošnje i distribucije energije. Višeciljnom optimizacijom postignuta je ravnoteža ekoloških i ekonomskih ciljeva gdje se troškovi električne energije energetske zajednice mogu smanjiti sa 62,22 € na 54,23 €, odnosno troškovi električne energije se mogu smanjiti za 7,99 €, dok se emisije CO₂ mogu smanjiti sa 106,04 kg na 105,01 kg, što predstavlja smanjenje od 1,03 kg. Ovo rješenje naglašava kako je veći prioritet stavljen na smanjenje emisija CO₂, dok su troškovi električne energije održani na prihvatljivoj razini za članove energetske zajednice. Iako postoji mogućnost dodatnog smanjenja troškova, to bi rezultiralo većim emisijama CO₂, što nije u skladu s ciljevima energetske zajednice koje, kao neprofitne organizacije, teže smanjenju negativnog utjecaja na okoliš. Provedenim analizama dokazano je da energetske zajednice imaju potencijal sudjelovati u postizanju zadanih ciljeva Zelenog plana unatoč financijskim izazovima. Rezultati optimizacije potvrđuju da energetske zajednice imaju značajnu ulogu u borbi protiv klimatskih promjena te da

usklađivanje ekoloških i ekonomskih ciljeva zahtijeva pažljivo planiranje i prilagodbu strategije u skladu s načelima energetske zajednice. Na posljetku, energetske zajednice predstavljaju velik korak prema čistoj energiji za sve. Usprkos svim izazovima i preprekama, potencijal i prednosti energetske zajednice ukazuju na to kako su upravo one glavni akteri pri postizanju klimatske neutralnosti. Budućnost energetske zajednice leži u rukama samih građana. Potrebno je prepoznati prepreke i prevladati ih te će se na taj način energetske zajednice dalje razvijati te doseći svoj potencijal.

LITERATURA

- [1] „Odgovor Europske unije na klimatske promjene“ [online], 07-kol-2018. Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20180703STO07129/odgovor-europske-unije-na-klimatske-promjene>. [Pristupljeno: 24.6.2024.].
- [2] „Provedba europskog zelenog plana - Europska komisija“ [online], 14-srp-2021. Dostupno na: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_hr. [Pristupljeno: 24.6.2024.].
- [3] V., Mijatović, „ULOGA ENERGETSKIH ZAJEDNICA“, info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Rijeka. Faculty of Engineering. Department of Electric Power Systems. Section of Electric Facilities and Power Systems, 2023.
- [4] European Commission. Joint Research Centre., *Energy communities: an overview of energy and social innovation*. Publications Office: LU, 2020.
- [5] B. P., Koirala, E., Koliou, J., Friege, R. A., Hakvoort, P. M., Herder, „Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 56, str. 722–744, tra. 2016.
- [6] J. C., Rogers, E. A., Simmons, I., Convery, A., Weatherall, „Public perceptions of opportunities for community-based renewable energy projects“, *Energy Policy*, izd. 11, sv. 36, str. 4217–4226, stu. 2008.
- [7] G., Walker, N., Simcock, „Community Energy Systems“, u *International Encyclopedia of Housing and Home*, 2012, str. 194–198.
- [8] G., Walker, „What are the barriers and incentives for community-owned means of energy production and use?“, *Energy Policy*, izd. 12, sv. 36, str. 4401–4405, pros. 2008.
- [9] X., Xu, X., Jin, H., Jia, X., Yu, K., Li, „Hierarchical management for integrated community energy systems“, *Appl. Energy*, sv. 160, str. 231–243, pros. 2015.
- [10] „Paper No. 1 Building Smart Energy Communities“ [online], 28-ruj-2012. Dostupno na: <https://questcanada.org/paper-no-1-building-smart-energy-communities/>. [Pristupljeno: 11.9.2024.].
- [11] I., Abada, A., Ehrenmann, X., Lambin, „On the viability of energy communities“, *Camb. Work. Pap. Econ.*, lis. 2017.
- [12] A., Arnette, C. W., Zobel, „An optimization model for regional renewable energy development“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, izd. 7, sv. 16, str. 4606–4615, ruj. 2012.
- [13] R.-G., Cong, „An optimization model for renewable energy generation and its application in China: A perspective of maximum utilization“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 17, str. 94–103, sij. 2013.
- [14] W., El-Khattam, Y. G., Hegazy, M. M. A., Salama, „An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning“, *IEEE Trans. Power Syst.*, izd. 2, sv. 20, str. 1158–1165, svi. 2005.
- [15] H., Mirzaesmaeeli, A., Elkamel, P. L., Douglas, E., Croiset, M., Gupta, „A multi-period optimization model for energy planning with CO2 emission consideration“, *J. Environ. Manage.*, izd. 5, sv. 91, str. 1063–1070, svi. 2010.
- [16] I., Strnad, „Optimalno planiranje i upravljanje mikromrežom s lokalnom virtualnom elektranom“, info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, University of Zagreb. Faculty of Electrical Engineering and Computing. Department of Energy and Power Systems, 2016.
- [17] „Energy communities“ [online]. Dostupno na: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-communities_en. [Pristupljeno: 26.6.2024.].
- [18] T., Herak, „Mogućnost osnivanja energetske zajednice na otocima prema direktivama Europske Unije“, info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2022.

- [19] „Energetske zajednice građana i zajednice OIE“ [online], 06-ruj-2022. Dostupno na: <https://nasuncanojstrani.hr/gradanska-energija/energetske-zajednice/>. [Pristupljeno: 26.6.2024.].
- [20] „What is a Renewable Energy Community? - Cleanwatts“ [online]. Dostupno na: <https://cleanwatts.energy/insight/what-is-a-renewable-energy-community/>. [Pristupljeno: 26.6.2024.].
- [21] „Energy communities: definition, benefits and regulation“ [online]. Dostupno na: <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-are-energy-communities>. [Pristupljeno: 26.6.2024.].
- [22] „Q&A - What are citizen and renewable energy communities? - REScoop“ [online]. Dostupno na: <https://www.rescoop.eu/toolbox/q-a-what-are-citizen-and-renewable-energy-communities>. [Pristupljeno: 11.9.2024.].
- [23] „Energetske zajednice u Hrvatskoj – važan korak za energetske tranziciju“ [online]. Dostupno na: <https://mpgi.gov.hr/vijesti-8/energetske-zajednice-u-hrvatskoj-vazan-korak-za-energetske-tranziciju/17626>. [Pristupljeno: 27.6.2024.].
- [24] „Energetske zajednice u Hrvatskoj | DOOR“ [online]. Dostupno na: <https://www.door.hr/energetske-zajednice-u-hrvatskoj/>. [Pristupljeno: 27.6.2024.].
- [25] „Benefits of Community Energy | Community Energy England“ [online]. Dostupno na: <https://communityenergyengland.org/pages/benefits-of-community-energy>. [Pristupljeno: 28.6.2024.].
- [26] „The social impact of energy communities: ten benefits they bring - REScoop“ [online]. Dostupno na: <https://www.rescoop.eu/news-and-events/news/the-social-impact-of-energy-communities-ten-benefits-they-bring>. [Pristupljeno: 28.6.2024.].
- [27] C., Li, C., Park, K. R., Pattipati, D. L., Kleinman, „Distributed algorithms for biobjective assignment problems“, u *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, str. 5893–5898, Orlando, FL, USA, 2011.
- [28] N., Gunantara, „A review of multi-objective optimization: Methods and its applications“, *Cogent Eng.*, izd. 1, sv. 5, str. 1502242, sij. 2018.
- [29] Y., Cui, Z., Geng, Q., Zhu, Y., Han, „Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving“, *Energy*, sv. 125, str. 681–704, tra. 2017.
- [30] T., Marler, *A Study of Multi-Objective Optimization Methods: for Engineering Applications*. VDM Verlag, 2009.
- [31] M. Di Somma, A. Buonanno, M. Caliano, G. Graditi, G. Piazza, S. Bracco, F. Delfino, „Stochastic Operation Optimization of the Smart Savona Campus as an Integrated Local Energy Community Considering Energy Costs and Carbon Emissions“, *Energies*, izd. 22, sv. 15, lis. 2022.
- [32] 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“, u *2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, str. 1–6, 2024.

SAŽETAK

Ovaj rad analizira energetske zajednice te se bavi kratkoročnim planiranjem pogona energetske zajednice koristeći višeciljnu optimizaciju. Glavni cilj optimizacijskog postupka bio je pronaći ravnotežu između smanjenja emisija CO₂ i smanjenja troškova električne energije. Razvijen je optimizacijski model temeljen na mješovitom cjelobrojnom linearnom programiranju, a optimizacija je provedena kombinacijom MATLAB i GAMS. Rezultati pokazuju da je optimalno rješenje postignuto pri težinskom faktoru $\omega = 0,05$, gdje su ukupni troškovi smanjeni sa 62,22 € na 54,23 €, odnosno za 7,99 €, dok su emisije CO₂ smanjene sa 106,04 kg na 105,01 kg, odnosno za 1,03 kg. Naglašeno je smanjenje emisija CO₂, što je vrlo važno s obzirom na neprofitnu prirodu energetske zajednice i njihovu ekološku misiju.

Ključne riječi: energetske zajednice, emisije CO₂, višeciljna optimizacija, troškovi električne energije

ABSTRACT

This paper defines the energy community and deals with the short-term planning of the energy community plant using multi-objective optimization. The main goal was to find a balance between reducing CO₂ emissions and reducing energy costs, taking into account technical and economic factors. A mathematical model based on mixed integer linear programming was developed, and the optimization was carried out in MATLAB and GAMS tools. The results show that the optimal solution was achieved at a weighting of $\omega = 0.05$, where total costs were reduced from €62.22 to €54.23, by €7.99, and CO₂ were reduced are at 106.04 kg to 105.01 kg, for 1.03 kg. Emphasis is placed on reducing emissions, which is crucial given the non-profit nature of energy communities and their environmental mission.

Key words: energy communities, CO₂ emissions, multi-objective optimization, energy costs