

Ivona Šironja
Grid ONE d.o.o.
ivona.sironja@gridone.hr

Goran Jurišić
Grid ONE d.o.o.
goran.juriscic@gridone.hr

Mirna Gržanić Antić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mirna.grzanic@fer.hr

TRANSFORMACIJA TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE KROZ ENERGETSKE ZAJEDNICE

SAŽETAK

U radu je promatrano uključivanje aktivnih kupaca u energetske zajednice, nove entitete unutar elektroenergetskog sustava, s naglaskom na koristi i izazove za operatora distribucijskog sustava. Istraženo je njihovo sudjelovanje na tržištima električne energije, posebno na lokalnim tržištima i tržištima fleksibilnosti, gdje mogu djelovati kao pružatelji usluga na distribucijskoj razini. Rezultati pokazuju da energetske zajednice omogućuju bolje upravljanje potrošnjom električne energije, smanjuju troškove za električnu energiju krajnjih korisnika mreže kroz povećanu samopotrošnju i optimiziraju korištenje distribuiranih izvora energije. Također, zaključeno je da mogu značajno doprinijeti energetskej tranziciji, razvoju novih poslovnih modela, smanjenju gubitaka zahvaljujući lokalnoj proizvodnji i potrošnji, koja smanjuje potrebu za prijenosom električne energije, kao i povećanju sigurnosti opskrbe.

Ključne riječi: energetske zajednice, napredne mreže, dijeljenje električne energije, tržišni modeli, usluge fleksibilnosti

TRANSFORMATION OF THE ELECTRICITY MARKET THROUGH ENERGY COMMUNITIES

SUMMARY

The paper examines the inclusion of prosumers in energy communities, new entities within the power system, with a focus on the benefits and challenges for the distribution system operator. Their participation in electricity markets, particularly in local electricity markets and flexibility markets, where they can act as service providers at the distribution level, was explored. The results demonstrate that energy communities enable better management of electricity consumption, reduce electricity costs for end users through increased self-consumption, and optimize the use of distributed energy resources. It is also concluded that they can significantly contribute to the energy transition, the development of new business models, the reduction of losses due to local production and consumption, which reduces the need for electricity transmission, as well as to improved security of supply.

Key words: energy communities, smart grids, electricity sharing, market models, flexibility services

1. UVOD

Europske direktive 2019/944 o unutarnjem tržištu električne energije IEMD [1] i 2018/2001 o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora RED II [2], postavile su temelje za transformaciju elektroenergetskog sustava (EES) kroz aktivnu ulogu krajnjih korisnika mreže (u tekstu dalje: krajnji korisnici), definirajući aktivne kupce, energetske zajednice građana, energetske zajednice obnovljive energije, potrošače obnovljive energije koji djeluju zajednički i agregatore. Tako aktivni kupci imaju pravo sudjelovanja na svim tržištima električne energije, prodaje vlastite proizvedene električne energije i sudjelovanja u programima fleksibilnosti. Energetska zajednica građana (EZG) je pravna osoba osnovana na području Republike Hrvatske, koja omogućuje dobrovoljno i otvoreno sudjelovanje fizičkih i pravnih osoba (uključujući jedinice lokalne samouprave, mikropoduzeća i mala poduzeća) u energetske aktivnostima - proizvodnja, potrošnja, skladištenje, punjenje električnih vozila, upravljanje i dijeljenje energije, neovisno o izvoru energije. EZG djeluje na neprofitnoj osnovi, u skladu sa zakonima koji uređuju financijsko poslovanje neprofitnih organizacija. Donošenje odluka temelji se na načelu jedan član – jedan glas, neovisno o vlasničkom udjelu, dok stvarnu kontrolu mogu imati samo članovi koji nisu srednja i velika poduzeća. Cilj je ostvarenje okolišnih, gospodarskih i socijalnih koristi za svoje članove i vlasnike udjela i/ili lokalnu zajednicu, a ne stvaranje financijske dobiti. Na tržištu može sudjelovati samostalno ili putem agregatora. Agregator je fizička ili pravna osoba koja kombinira snagu i/ili električnu energiju više kupaca, proizvođača, aktivnih kupaca ili operatora skladišta energije radi sudjelovanja na bilo kojem tržištu električne energije. Agregiranje može biti važan mehanizam za optimizaciju upravljanja potražnjom električne energije. Potrošači vlastite obnovljive energije koji djeluju zajednički su skupina od najmanje dva potrošača vlastite obnovljive energije u istoj zgradi ili stambenom kompleksu, a priključeni su na niskonaponski vod zajedničke srednjenaponske distribucijske trafostanice. Zajednica obnovljive energije (ZOE) je pravna osoba čiji su dioničari ili članovi fizičke osobe, mala i srednja poduzeća ili jedinice lokalne ili područne (regionalne) samouprave, a koja djeluje neovisno u odnosu na vanjske komercijalne interese. Ključna obilježja uključuju stvarni nadzor dioničara ili članova smještenih u blizini projekata energije iz obnovljivih izvora kojih je ta pravna osoba vlasnik ili ih razvija. Prvotna svrha je pružiti okolišnu, gospodarsku ili socijalnu dobrobit za svoje dioničare ili članove ili lokalna područja na kojima djeluje uz korištenje energije isključivo iz obnovljivih izvora, a ne financijska dobit. ZOE ima pravo proizvoditi, trošiti, skladištiti i prodavati obnovljivu energiju proizvedenu u proizvodnim jedinicama zajednice, uključujući mogućnost dijeljenja proizvedene energije među članovima zajednice. Također može pristupiti tržištima izravno ili putem agregatora, pod jednakim uvjetima kao i ostali tržišni sudionici.

U pogledu uvođenja novih entiteta i naprednih mreža, prema [3], neki od najvećih izazova za operatora distribucijskog sustava (ODS) su prihvatanje sve većeg broja obnovljivih izvora energije (OIE), vođenje pogona sa sve većim udjelom kolebljivih izvora, stvaranje preduvjeta za uključivanje većeg broja mjesta za punjenje električnih vozila u elektrodistribucijsku mrežu, stvaranje preduvjeta za uključivanje pružatelja usluga fleksibilnosti, stvaranje preduvjeta za funkcioniranje i razvoj maloprodajnog tržišta električne energije, digitalizacija, informatizacija, osiguranje stručnih ljudskih potencijala. Programski sustavi na svim razinama elektrodistribucijske djelatnosti, od poslovanja, zaštite podataka, vođenja pogona, modeliranja i planiranja razvoja postaju sve složeniji. Interesantan rezultat istraživanja [4] pokazuje da omjer tehničkih i netehničkih gubitaka u mreži iznosi 51:49%, što se razlikuje od ranije pretpostavljenog omjera od 70:30%. Netehnički gubici obuhvaćaju neovlašteno korištenje električne energije, poteškoće u nadzoru mjernih mjesta i priključaka, oštećenje opreme distribucijske mreže, tehničke probleme odnosno kvarove, nemogućnost ili neispravno očitavanje brojila što za rezultat ima neispravne podatke o potrošnji i/ili proizvodnji električne energije. Prema [3], u Hrvatskoj je na niskonaponskoj razini ukupno 2.291.838 obračunskih mjernih mjesta (OMM-a) kategorije kućanstvo te 197.429 OMM-a kategorije poduzetništvo. U sustavu daljinskog očitavanja je od toga 46% naprednih brojila u kategoriji poduzetništva i 13% naprednih brojila u kategoriji kućanstava.

U radu je fokus na energetske zajednicama građana koje imaju pravo proizvoditi i prodavati vlastitu električnu energiju te sudjelovati u programima fleksibilnosti i pružanju usluga operatoru sustava, a za koje je osmotrivost elektroenergetske mreže (mreža) glavni preduvjet. Poticanjem zajedničkog djelovanja na lokalnoj razini potiču se ostvarenje okolišne, gospodarske i socijalne dobrobiti. Rad prikazuje sudjelovanje energetske zajednice građana i zajednice obnovljive energije (u tekstu: energetske zajednice) na tržištima električne energije, usluge koje mogu pružati na tržištima fleksibilnosti ostvarenim na distribucijskoj razini i mehanizme dijeljenja električne energije između članova sudionika energetske zajednice.

2. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Već spomenuta IEMD direktiva[1], krajnjim korisnicima mreže daje okvir za aktivno sudjelovanje na tržištu električne energije u vidu novih poslovnih modela te promiče održivost i sigurnost opskrbe. Prema Zakonu o tržištu električne energije [5] u Hrvatskoj tržišta dijelimo na:

- Veleprodajna (izvanburzovno i burzovno),
- Maloprodajna (opskrba električne energije i agregiranje),
- Ostala (tržište uravnoteženja i tržište nefrekvencijskih pomoćnih usluga).

Na primjeru CROPEX-ovog tržišta dan-unaprijed, (DU; engl. Day-Ahead Market) sudionici na tržištu dostavljaju ponude za kupovinu i prodaju električne energije na satnoj osnovi, a proces se zatvara u podne dan prije isporuke. U dostupnim istraživanjima sudjelovanja energetske zajednice na tržištima električne energije fokus je uglavnom na tržište DU koje je povezano s unutardnevnim tržištem (engl. Intra-Day Market). Na unutardnevnom tržištu ponude se dostavljaju u danu isporuke električne energije odnosno danu izvršenja transakcije i zaključavaju se 30 minuta prije početka ugovorene isporuke (primjer CROPEX). Unutardnevna tržišta služe za ispravljanje pogrešaka u dan unaprijed prognozama. Energetske zajednice na ovim tržištima mogu sudjelovati izravno ili putem agregatora, a prema [6] mogu djelovati kao:

- Preuzimatelji cijena (eng. „price takers“) kojima je cilj izbjeći financijski rizik,
- Stvaratelji cijena (eng. „price makers“) s ciljem razvoja ponuda vezanih uz fleksibilnost lokalnih energetske zajednice i natječući se s ostalim proizvođačima,
- agregatori upravljanja opterećenja,
- agregatori električnih vozila.

U [7] je simuliran LEM (engl. local electricity market) na različitim razinama. Prva razina trgovanja je unutar energetske zajednice, druga razina je trgovanje viškom/manjkom električne energije između energetske zajednice, a treća razina trgovanje na veleprodajnom tržištu električne energije putem agregatora. Sudjelovanje na veleprodajnom tržištu putem agregatora krajnjim korisnicima mreže omogućava pristup nižim cijenama i većim uštedama. Osim agregatora, centralni menadžer (CM) energetske zajednice, može sudjelovati na veleprodajnom tržištu električne energije i/ili koordinirati trgovinu unutar zajednice [9]. Na DU tržištu on sklapa kupoprodajne ugovore, a zatim članove zajednice potiče na fleksibilno ponašanje pomoću cjenovnih signala. Time omogućava bolju tržišnu poziciju članova zajednice i veću konkurentnost na maloprodajnoj razini.

Rad [8] sadrži optimizacijski model za upravljanje energetskom zajednicom od DU tržišta do stvarnog vremena. Model se sastoji od dva modula: IFOU-DA (engl. Internal Flexibility Optimization and Unbalancing Day Ahead) i IFOU-RT (engl. Internal Flexibility Optimization and Unbalancing Real Time). Prvi modul primjenjuje se za upravljanje kupcima s vlastitom proizvodnjom, pružanje usluga uravnoteženja te smanjenje troškova nabave energije. Drugi modul optimizira razliku između prognoziranih i ostvarenih vrijednosti proizvodnje i potrošnje članova energetske zajednice, preuzimanja električne energije iz mreže i predaje električne energije u mrežu. Autori zaključuju kako uz korištenje baterijskog spremnika kupci s vlastitom proizvodnjom mogu ostvariti i do tri puta veći profit sudjelovanjem na tržištu pružanja pomoćnih usluga – rezervi, ali i smanjiti troškove nabave energije na DU tržištu.

U literaturi se mogu pronaći tri zastupljene sheme dijeljenja informacija i formiranja tržišta električne energije unutar energetske zajednice:

- **centralizirano tržište** kojim u potpunosti upravlja CM ili koordinator zajednice s ciljem maksimizacije blagostanja zajednice,
- **decentralizirano tržište** u kojem članovi energetske zajednice autonomno odlučuju o kupnji/prodaji,
- **distribuirana shema** u kojem CM predlaže određivanje cijena, a članovi energetske zajednice zadržavaju kontrolu.

U konvencionalnim elektroenergetskim sustavima struktura tržišta električne energije bila je centralizirana, OPS je imao dominantnu ulogu te se trgovina električnom energijom odvijala pod njegovim nadzorom na veleprodajnom tržištu. IEMD direktiva naglašava poprimanje aktivne uloge ODS-a kako bi

se riješili izazovi uzrokovani penetracijom distribuiranih izvora energije. Zbog najčešće malih kapaciteta distribuiranih izvora i visokih nameta u slučaju odstupanja od planiranih vrijednosti potrebna je nova tržišna struktura. Lokalna tržišta električne energije i lokalna tržišta fleksibilnosti (engl. local flexibility market – LFM) su moguća rješenja navedenih izazova.

Lokalna tržišta električne energije dizajnirana su za upravljanje penetracijom OIE poticanjem lokalne trgovine električnom energijom i tako indirektno rješavaju probleme poput preopterećenja i visokih napona [10]. Lokalna tržišta olakšavaju integraciju distribuiranih izvora električne energije i trgovinu električnom energijom, a istovremeno potiču lokalnu ravnotežu i samoodrživu zajednicu [11]. Doprinosi decentralizaciji i autonomiji u upravljanju električnom energijom [12]. Osim toga, imaju velik potencijal za smanjenje troškova električne energije krajnjih kupaca [13]. Autori u [10] klasificiraju lokalna tržišta u tri kategorije: P2P (peer to peer) trgovina, trgovina pod nadzorom posrednika i kombinacija prve dvije kategorije. Ekonomska izvedivost i potencijalna isplativost ovih tržišta uvelike ovisi o regulatornom okviru [14]. Regulatorni koncepti razlikuju se u različitim državama i ne postoji univerzalni model koji bi odgovarao svima. Međutim, autori u [14] su identificirali kako modeli koji imaju negativne učinke na prihode ODS-a nisu održivi. Potrebno je pronaći ravnotežu koja je poticajna za sudjelovanje krajnjih korisnika mreže na lokalnom tržištu i donosi im ekonomsku korist, a da pritom operatori sustava nisu zakinuti financijski. Troškovi korištenja elektroenergetске mreže bi trebali biti raspoređeni proporcionalno stvarnom korištenju mreže i utjecaju na elektroenergetsku mrežu.

Lokalna tržišta fleksibilnosti sredstvo su za trgovanje fleksibilnošću između ODS-a i ostalih sudionika (npr. agregatora, energetske zajednice,...) na geografski ograničenim prostorima, a mogu raditi paralelno s dnevnim i unutardnevnim tržištima [10]. Njihov glavni cilj je ODS-u omogućiti aktivnije upravljanje i kontrolu nad distribucijskim elektroenergetskim sustavom.

Operator lokalnog tržišta fleksibilnosti (engl. Flexibility market operator, FMO) entitet je koji upravlja nadmetanjem, poravnanjem i obračunom tržišta [15]. Autori su tržišta fleksibilnosti na razini distribucije podijelili u četiri kategorije: modeli centralizirane optimizacije, modeli temeljeni na teoriji aukcija, simulacijski modeli, modeli temeljeni na teoriji igara. Modeli centralizirane optimizacije fokusirani su na optimizaciju ciljeva poput maksimizacije društvenog blagostanja ili minimizacije troškova, pri čemu se pažnja usmjerava na jednog glavnog sudionika. Modeli temeljeni na teoriji aukcija određuju ravnotežnu cijenu tržišta na osnovi ponudbenih strategija sudionika, s mogućnostima plaćanja prema ravnotežnoj ili ponudenoj cijeni. Simulacijski modeli koriste agent-based pristup za simulaciju ponašanja sudionika i analizu tržišne dinamike u velikim sustavima. Modeli temeljeni na teoriji igara proučavaju kako sudionici racionalno maksimiziraju profit, razlikujući se između kooperativnih i nekooperativnih strategija. U kooperativnoj igri sudionici surađuju da bi maksimizirali korist cijele zajednice, dok u nekooperativnoj igri svaki sudionik pokušava maksimizirati vlastitu korist, često bez obzira na druge [16]. Osim djelatne snage, koja je češće u fokusu prilikom pružanja usluga fleksibilnosti, u istraživanju [17] se koristi zajednički baterijski spremnik, dok se putem pametnih pretvarača jalova snaga pruža kao pomoćna usluga ODS-u. Sudjelovanje energetske zajednice na lokalnom tržištu i lokalnom tržištu fleksibilnosti od velikog je potencijala za buduća istraživanja. Energetske zajednice, koje se sastoje od više korisnika mreže s vlastitim distribuiranim energetske resursima (proizvodnjom, skladištenjem, fleksibilnom potrošnjom), mogu imati značajnu ulogu u pružanju lokalnih usluga fleksibilnosti.

3. FLEKSIBILNOST

Fleksibilnost u elektroenergetskim sustavima jest sposobnost prilagodbe promjenama u proizvodnji ili potrošnji energije, a ključna je za održavanje stabilnosti i učinkovitosti EES-a, za regulaciju napona, upravljanje preopterećenjima i uravnoteženje. Usluge fleksibilnosti mogu pomoći u odgodi proširenja mreže i smanjenju kapitalnih troškova [15]. U kontekstu energetske zajednice, fleksibilnost se najčešće razrađuje kroz dva glavna pristupa: sustave skladištenja energije i prilagodbu potrošnje. Prilagodba potrošnje uključuje povećanje ili smanjenje potrošnje u vidu uključivanja ili isključivanja uređaja prema potrebama mreže. S druge strane, sustavi skladištenja omogućuju spremanje viška energije kada je proizvodnja velika i korištenje te energije kada je potražnja veća. Ključne prednosti sustava za pohranu energije za mrežu su rezervna proizvodnja, podrška prijenosu električne energije, kontrola napona i regulacija frekvencije [18]. Posebno je naglašena fleksibilnost baterijskih spremnika, toplinskih pumpi, električnih vozila, bojlera za vodu i sličnih uređaja kao ključnih elemenata za postizanje energetske efikasnosti i smanjenja troškova za krajnje korisnike mreže ili članove zajednice [19]. Fleksibilnost može biti usmjerena od energetske zajednice prema mreži tako da zajednica daje svojevrsnu potporu mreži i obavlja „uslugu fleksibilnosti“, a može biti usmjerena i prema članovima

zajednice. Fleksibilnost na strani krajnjih korisnika mreže imat će značajnu ulogu u postizanju veće integracije OIE [20], a znači sposobnost korisnika mreže da prilagode svoju potrošnju i/ili proizvodnju različitim poticajima, bilo financijskim ili drugim vrstama poticaja ili dinamičkim signalima povezanim s cijenama električne energije. U [21] je istraženo kako energetske zajednice mogu sudjelovati u tržišnoj nabavi fleksibilnosti s ciljem kvantificiranja ekonomskih koristi. Razvijen je alat koji pomaže kvantifikaciji dobitaka od sudjelovanja na LFM i od usluga pomicanja potrošnje, a temelji se na povijesnim cijenama pružanja usluga fleksibilnosti. Zaključeno je kako trenutne cijene fleksibilnosti za upravljanje zagušenjima ne odražavaju uštede od pojačanja mreže (tj. investicija u fizičku infrastrukturu mreže poput proširenja ili zamjene vodova, dodavanja novih transformatorskih stanica, povećanja kapaciteta mrežnih elemenata), niti uštede koje proizlaze iz njihove odgode. Istaknuta je nužnost povećanja likvidnosti tržišta LFM za povećanje konkurentnosti i pristupačnosti. Optimizacija kolektivne samopotrošnje u energetske zajednice kroz planiranje rada električnih uređaja, skladištenja energije i minimizacije razmjene energije s elektroenergetskom mrežom u [22] ostvaruje se prilagodbom rasporeda i potrošnje energije uz pomoć kontroliranih opterećenja i dostupnih postrojenja za skladištenje energije. Ovisnost o elektroenergetskoj mreži, mjerena količinom tržišno nabavljene energije, u radu [22] je smanjena za 15% u odnosu na individualno sudjelovanje članova energetske zajednice van iste. Donesen je zaključak kako je metoda mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. Mixed Integer Linear Programming method, MILP) dostatna za manje energetske zajednice i jednostavnije modele, dok je za veće energetske zajednice potrebno razviti heurističke modele. Pretpostavka da agregator ima ključnu ulogu u nabavljanju i upravljanju fleksibilnosti od krajnjih kupaca i trgovini s entitetima poput ODS-a, OPS-a ili subjekata odgovornih za odstupanje (voditelji bilančnih skupina) implicira postojanje strukture u lancu usluga fleksibilnosti. U projektu „Energy Frontrunners“ ODS kupuje usluge fleksibilnosti od agregatora kako bi smanjio vršna opterećenja distribucijskog sustava, koje može nastati tijekom razdoblja velike proizvodnje iz sunčanih elektrana (uslijed povrata električne energije u mrežu), kao i u razdobljima vršne potražnje za električnom energijom.

Dinamičke cijene su učinkovit alat za poticanje fleksibilnosti u energetske sustavima jer motiviraju krajnje kupce na prilagodbu svojih obrazaca potrošnje u skladu s promjenama u cijeni energije [23]. U [9] fleksibilno ponašanje u vidu fleksibilnih kućanskih uređaja (uključujući i električna vozila) smanjilo je troškove za čak 3 do 20 %. Centralni menadžer energetske zajednice sustavom nagrađivanja potiče krajnje kupce na prilagodbu potrošnje električne energije prema unaprijed definiranom rasporedu.

U [24] predstavljen je sustav za upravljanje energijom u energetske zajednici, EMS (engl. Energy Management System). Cilj sustava je minimizacija razmjene električne energije s mrežom. Kao temeljni razlog potrebe minimiziranja interakcija s mrežom navodi se kako višak proizvodnje električne energije može dovesti do toka električne energije s niskog napona na srednji napon i tako utjecati na povećanje napona. Kao rješenje koriste baterijski spremnik upravljan od strane ODS-a. Kapacitet fleksibilnosti je ukupna količina dostupne fleksibilnosti, a ograničavajući faktori su minimalni i maksimalni limiti punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika te veličina baterijskog spremnika. ODS je u ulozi upravitelja energetske zajednice, koji uz vremenske podatke i profile potrošnje električne energije predviđa agregiranu potrošnju i proizvodnju energetske zajednice i te podatke šalje modulu za uravnoteženje unutar sustava za upravljanje energijom koji određuje raspored za dan unaprijed ili trenutne vrijednosti u gotovo stvarnom vremenu. Korištene su RBB (engl. Rule-based balancing) i OPT (engl. Optimization) metode te fiksni model vremenske prognoze za 24 sata, a upravljanje fleksibilnošću temelji se na 15-minutnim mjerenjima.

Istraživanja sugeriraju da bi rastući broj energetske zajednice mogao uzrokovati fragmentaciju tržišta električne energije, pri čemu izazove stvara uključivanje velikog broja sudionika bez relevantne tehničke i regulatorne stručnosti u domeni elektroenergetskih sustava i tržišta električne energije. Potrebni su alati i sveobuhvatni sustavi upravljanja koji omogućuju automatizirane radnje i funkcioniranje energetske zajednice u pružanju usluga fleksibilnosti, usklađeni s tehničkim, tržišnim i regulatornim pravilima elektroenergetskog sustava.

4. DIJELJENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Složenost dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice proizlazi iz tehničkih, ekonomskih, regulatornih i organizacijskih izazova. Ključno je optimalno definirati raspodjelu proizvedene električne energije iz postrojenja u vlasništvu energetske zajednice kako bi članovi uspješno upravljali

svojim energetske potrebama i resursima, a bez ekonomske zaknutosti u odnosu na konvencionalno trgovanje sa svojim opskrbljivačem. Uobičajeni koncepti dijeljenja električne energije mogu se ostvariti kroz zajedničke mikromreže, razmjenu između pojedinaca peer-to-peer trgovanjem, posjedovanjem zajedničkog spremnika energije ili virtualnim dijeljenjem [25]. Europska unija P2P trgovanje definira kao prodaju obnovljive energije između tržišnih sudionika putem ugovora uz prethodno utvrđene uvjete koji uređuju automatsko izvršenje i namirenje transakcija, izravno između sudionika ili neizravno kroz certificiranog trećeg tržišnog sudionika, poput agregatora [2]. Virtualne elektrane (engl. virtual power plants VPP) olakšavaju koordinaciju distribuiranih energetske resursa i agregiraju potrošnju električne energije krajnjih korisnika mreže za sudjelovanje na tržištu električne energije, na taj način omogućavaju dodatni prihod krajnjim kupcima [12].

Jedno od često postavljenih pitanja u literaturi je kako raspodijeliti troškove i prihode unutar energetske zajednice, a da bude pravedno i poticajno za sve članove. Većina metoda temelji se na definiranim ključevima dijeljenja, podjeli ovisnoj o potrošnji električne energije ili podjeli temeljenoj na teoriji igara, u kojoj su često korištene metoda nukleolusa i Shapleyeva metoda [26]. Definirani ključevi dijeljenja električne energije najčešće uključuju fiksni ili dinamički ključ (shemu) raspodjele [27]. Osim spomenutih koncepta, važnost je u praćenju potrošnje i proizvodnje električne energije, analizi podataka i virtualnih elektroenergetskih sustava te fleksibilnosti poput pomicanja opterećenja u vrijeme kad je proizvodnja iz obnovljivih izvora velika. Na taj način povećava se stopa samodostatnosti.

Za učinkovito dijeljenje električne energije ključno je u obzir uzeti čimbenike poput sastava zajednice, politika dijeljenja odnosno shema dijeljenja, mehanizama određivanja cijena. Rad [28] pokazuje kako poticaji za iskorištenje dijeljene električne energije dovode do bolje usklađenosti s potrebama korisnika mreže odnosno njihovim profilima potrošnje električne energije, dok poticaj na količinu proizvedene električne energije rezultira s prevelikim proizvodnim kapacitetom za lokalne potrebe zajednice.

U [29] autori su analizirali primjenu P2P trgovanja na razini lokalne zajednice/mikromreže. Razmotrene su metode dijeljenja računa (engl. bill sharing, BS), srednje tržišne cijene (engl. mid-market rate MMR) i strategija cijena temeljenih na aukciji. Povećanjem broja članova energetske zajednice uštede su rasle jer je ostvarena veća raznolikost profila potrošnje električne energije čime je ostvarena veća samopotrošnja. U metodi dijeljenja računa trošak se dijeli među članovima neovisno o stvarnoj potrošnji električne energije, stoga autori smatraju da ova metoda neće utjecati na mijenjanje navika potrošnje električne energije odnosno fleksibilnost krajnjih korisnika mreže.

Autori u [30] istražuju utjecaj P2P trgovanja kroz dva različita modela energetske zajednice: NSR-EC (non-shared resources EC) u kojem su individualni korisnici mreže udruženi za formiranje lokalnog tržišta te SR-EC (shared resources) u kojoj se OIE smatraju centraliziranim, a baterijski sustavi korisnika mreže promatrani su kao jedan zajednički. U radu je klasificirano i modelirano nekoliko mehanizama određivanja cijena dijeljenja električne energije: marginalna cijena (engl. clearing price CP), dijeljenje računa BS, omjer ponude i potražnje (engl. supply demand ratio SDR). Autori zaključuju kako je za NSR-EC najbolji rezultat u vidu ušteda postignut za CP i MMR mehanizme. Metode ne jamče da svi članovi energetske zajednice ostvaruju korist stoga se kao potencijalno rješenje može uvesti dvorazinski model raspodjele troškova električne energije. Uz osiguranje minimalne granice uštede osigurano je da niti jedan član energetske zajednice nema povećane troškove električne energije u usporedbi s individualnim sudjelovanjem i trgovanjem s opskrbljivačem.

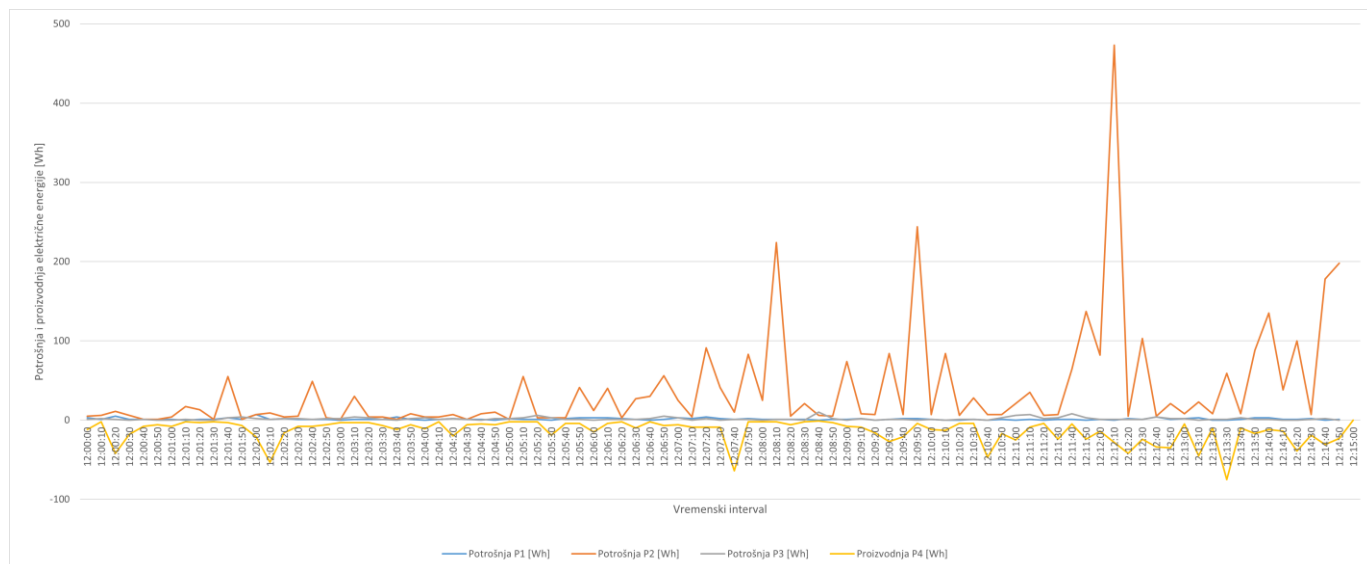
Jednostavne metode dijeljenja električne energije mogu biti korisne za lakše shvaćanje raspodjele troškova električne energije ili ostvarenja ušteda unutar energetske zajednice, ali potrebno je korištenje složenijih metoda, koje uključuju i dinamičke prilagodbe za integraciju s naprednim mrežama, koja omogućuje prilagodbu operativnih odluka u stvarnom vremenu čime se dodatno doprinosi fleksibilnosti i efikasnosti elektroenergetskog sustava. Uvođenje višekriterijske optimizacije omogućuje donošenje uravnoteženih odluka koje ne samo da minimiziraju troškove električne energije, već maksimiziraju koristi za energetske zajednicu, energetske samodostatnost i održivost. Uočen je nedostatak modela koji se temelje na dinamičnim cijenama, optimizacijskom ključu koji je također dinamički i raspodjeli troškova električne energije u realnom vremenu.

Postoji sve više platformi za energetske zajednice, njihovo upravljanje i operativan rad. U sklopu projekta My Energy Community [31] razvijena je platforma za potrebe dijeljenja električne energije između članova energetske zajednice u gotovo stvarnom vremenu te je osnovana prva energetska zajednica građana u Hrvatskoj, Moja energetska zajednica. U sklopu projekta uočeno je da su najčešće sheme dijeljenja električne energije prema fiksnom ključu i dijeljenje proporcionalno potrošnji električne energije.

Tako su u sklopu projekta modelirana dva modela energetske zajednice: energetska zajednica obiteljskih kuća i energetska zajednica vrtića.

4.1. SLUČAJ 1 – ENERGETSKA ZAJEDNICA OBITELJSKIH KUĆA

Predmetna energetska zajednica sastoji se od četiri člana tipa kućanstvo – jednog kupca s vlastitom proizvodnjom i tri krajnja kupca. Na slici 1. su prikazane potrošnja i proizvodnja električne energije članova energetske zajednice za jedan 15-minutni interval.



Slika 1. Potrošnja i proizvodnja zajednice

Očitavanja su u 10 sekundnom intervalu, a za potrebe obračuna koriste se agregirane vrijednosti u 15-minutnim intervalima. Prva tri člana su krajnji kupci, a član četiri je kupac s vlastitom proizvodnjom, koji je u prikazanom 15-minutnom intervalu „proizvođač“ (u prikazanom 15-minutnom intervalu je proizvodio više električne energije nego što je trošio na tom obračunskom mjernom mjestu). Koristeći maloprodajne tržišne cijene električne energije (dvotarifni sustav) u Hrvatskoj te srednju vrijednost cijene dijeljenja u energetske zajednici (MMR) (tablica I.), proveden je izračun smanjenja troška za električnu energiju za ovaj vremenski interval. Prikazan je samo jedan 15-minutni interval zbog pojednostavljenja količine podataka (svakih 10s). Mrežarina predstavlja reguliranu naknadu za korištenje elektroenergetske mreže, koju krajnji kupci plaćaju za prijenos i distribuciju električne energije. Ona se obračunava neovisno o podrijetlu energije – bilo da se energija preuzima iz javne mreže ili dijeli unutar energetske zajednice, ako je riječ o isporuci putem mreže.

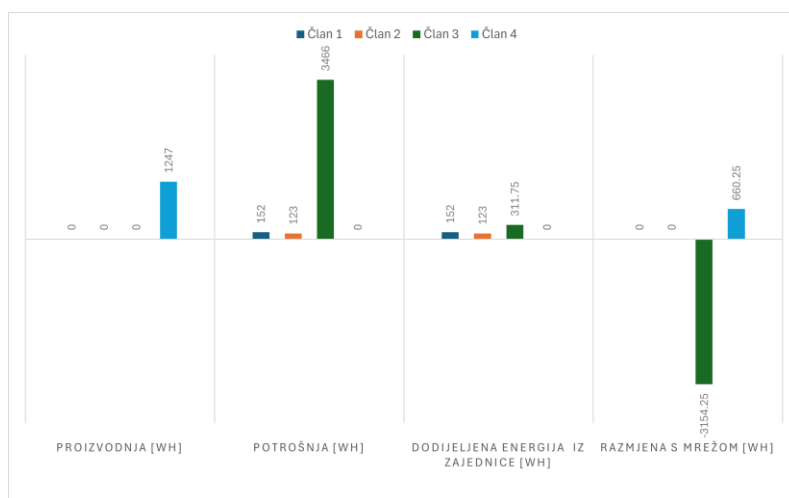
Tablica I. Cijene korištene za energetske zajednicu

Stavka	Cijena [€/kWh]
Energija predana u mrežu	0,06325
Kupljena energija preuzeta iz mreže (bez mrežarine)	0,07028
Mrežarina	0,04114
Kupljena energija preuzeta iz mreže (s mrežarinom)	0,11142
Energija dijeljenja u zajednici (bez mrežarine)	0,06676

Napravljen je model raspodjele električne energije za fiksni i proporcionalni ključ dijeljenja. Rezultati razmjene električne energije za prikazani 15-minutni interval uz korištenje fiksnog ključa nalaze se na slici 2, a rezultati ušteda u tablici II.

Fiksnim ključem svaki član dobije četvrtinu viška proizvedene energije, odnosno za ovaj interval maksimalno 311,75 kWh (1.247 kWh/4). Dodijeljena količina električne energije iz energetske zajednice ograničena je maksimalnom potrošnjom člana u tom intervalu. Tako će član 1 dobiti samo 152 kWh, član

2 samo 123 kWh, član 3 cjelokupan udio, a član 4 ništa jer je u navedenom trenutku imao viška proizvodnje i potrošnja mu je iznosila 0 kWh. Preostali višak električne energije kod članova koji nisu mogli iskoristiti svoju četvrtinu smatra se kao vlasništvo „proizvođača“ električne energije (član 4), koji je investirao u sunčanu elektranu, i s njegovog obračunskog mjernog mjesta taj se preostali višak predaje u mrežu.



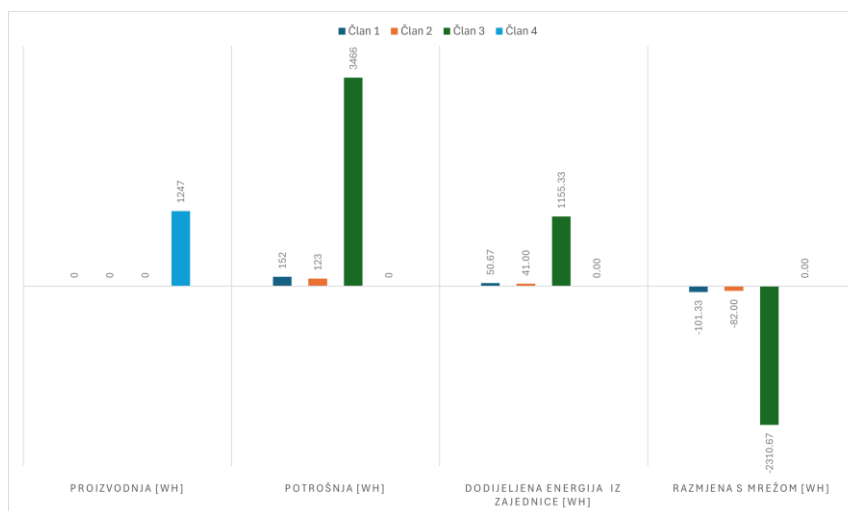
Slika 2. Fiksni ključ

Na slici 2., u prikazanoj razmjeni s mrežom, negativne vrijednosti označavaju kupovinu električne energije od opskrbljivača, a pozitivne vrijednosti stupca označavaju višak električne energije koji je prodan opskrbljivaču. Ovakav model u kojem je sav višak proizvedene električne energije vlasništvo „proizvođača“ isplativ je za kupce s vlastitom proizvodnjom koji su sami investirali u svoju sunčanu elektranu.

Tablica II. Troškovi i prihodi za električnu energiju u slučaju fiksnog ključa

Član	U zajednici (€)	Bez zajednice (€)	Ušteda (%)
P1	-0,0164	-0,0169	2,96
P2	-0,0133	-0,0137	2,92
P3	-0,3851	-0,3862	0,29
P4	0,0809	0,0789	2,54

Proporcionalnim ključem se višak proizvodnje električne energije dijeli krajnjim kupcima proporcionalno njihovoj potrošnji u tom intervalu. Tako će član 1 dobiti 4,06% viška proizvodnje, član 2 će dobiti 3,29%, a član 3 će dobiti 92,65%. U tablici III. negativne vrijednosti predstavljaju trošak za električnu energiju, a pozitivne vrijednosti prihod od električne energije. U promatranom 15-minutnom intervalu svi članovi ostvaruju uštede – sudjelovanjem u energetske zajednice trošak za električnu energiju krajnjeg kupca (član 1, član 2 i član 3) je manji, a prihod proizvođača (član 4) je veći nego u slučaju individualnih transakcija s opskrbljivačem van energetske zajednice.



Slika 3. Proporcionalan ključ

Rezultati energetskega tokova za proporcionalan ključ nalaze se na slici 3, a rezultati ekonomskog učinka u tablici III.

Tablica III. Troškovi i prihodi za električnu energiju u slučaju proporcionalnog ključa

Član	U zajednici (€)	Bez zajednice (€)	Ušteda (%)
P1	-0,0168	-0,0169	0,59
P2	-0,0136	-0,0137	0,73
P3	-0,3821	-0,3862	1,06
P4	0,0833	0,0789	5,58

Uz raspodjelu električne energije proporcionalnu potrošnji električne energije količina razmijenjene energije s javnom mrežom se smanjuje budući se sav višak proizvedene električne energije može dodijeliti i potrošiti u zajednici. U ovom primjeru, član 4 je sav svoj višak proizvedene energije prodao članovima zajednice i time je ostvario veći prihod u odnosu na korištenje fiksnog ključa. Članovi 1 i 3 ostvaruju nešto manju uštedu u odnosu na fiksni ključ. Razlog tome je što član 3 ima znatno veću potrošnju stoga on dobiva najveći udio proizvedene električne energije u tom intervalu pa članovi 1 i 2 dio svoje potrošnje moraju podmiriti kupovinom električne energije od svoga opskrbljivača. Član 3 na ovaj način ostvaruje veću uštedu nego u slučaju fiksnog ključa kad dobiva četvrtinu električne proizvedene energije, a ostatak mora podmiriti kupovinom električne energije od svoga opskrbljivača.

4.2 SLUČAJ 2 – ENERGETSKA ZAJEDNICA VRTIČA

Slučaj 2 odnosi se na energetska zajednica sastavljenu od četiri dječja vrtića. Iako dječji vrtići, kao javne ustanove, trenutno mogu koristiti model obračuna predviđen za korisnike postrojenja za samoopskrbu, zakonski okvir trenutačno ne dopušta da takav korisnik istodobno bude i član energetske zajednice uključen u dijeljenje električne energije unutar te zajednice. Zbog toga su svi izračuni u ovom radu provedeni prema kategoriji obračuna za kupce s vlastitom proizvodnjom električne energije, pri čemu planirano ukidanje modela samoopskrbe dodatno potvrđuje opravdanost takvog pristupa. Dostupna su mjerenja s brojila koja bilježe podatke na 15-minutnim intervalima u vrtićima. Svi vrtići imaju instalirane sunčane elektrane. Prvo se iz tih sunčanih elektrana pokriva potrošnja unutar vrtića, a preostale vrijednosti mjerenja s brojila prikazuju višak proizvodnje (kada proizvodnja električne energije sunčane elektrane premašuje trenutnu potrošnju) ili višak potrošnje (kada potrošnja električne energije premašuje proizvodnju). Dakle, vrtić u jednom intervalu može imati ili višak potrošnje ili višak proizvodnje. Temeljem proporcionalnog ključa raspodjele dostupnih viškova proizvodnje električne energije u energetskoj zajednici, analizirani su financijski učinci kroz dvije komponente: model „kupac s vlastitom proizvodnjom“ u kojem vrtić kao krajnji kupac djeluje samostalno i model sudjelovanja u energetskoj zajednici građana. Ključ raspodjele je takav da se viškovi proizvodnje električne energije vrtića dijele unutar energetske zajednice vrtićima koji u tom intervalu imaju višak potrošnje. Višak proizvodnje električne energije dijeli se proporcionalno godišnjem višku potrošnje električne energije pojedinog člana. Taj udio dodijeljenog viška

električne energije je jednak omjeru ukupnog viška potrošnje vrtića ($P_{i,t}$) i ukupnog viška potrošnje svih vrtića ($P_{j,t}$) u godini dana:

$$u_i = \frac{\sum_t P_{i,t}}{\sum_i \sum_t P_{i,t}} \quad (1)$$

U tablici IV. prikazani su godišnji kumulativi viška potrošnje i proizvodnje električne energije u godini dana te ključ (udio u_i) prema kojem će se u modeliranoj energetske zajednici dodjeljivati višak proizvedene električne energije.

Tablica IV. Godišnji kumulativi predane i preuzete električne energije po vrtiću

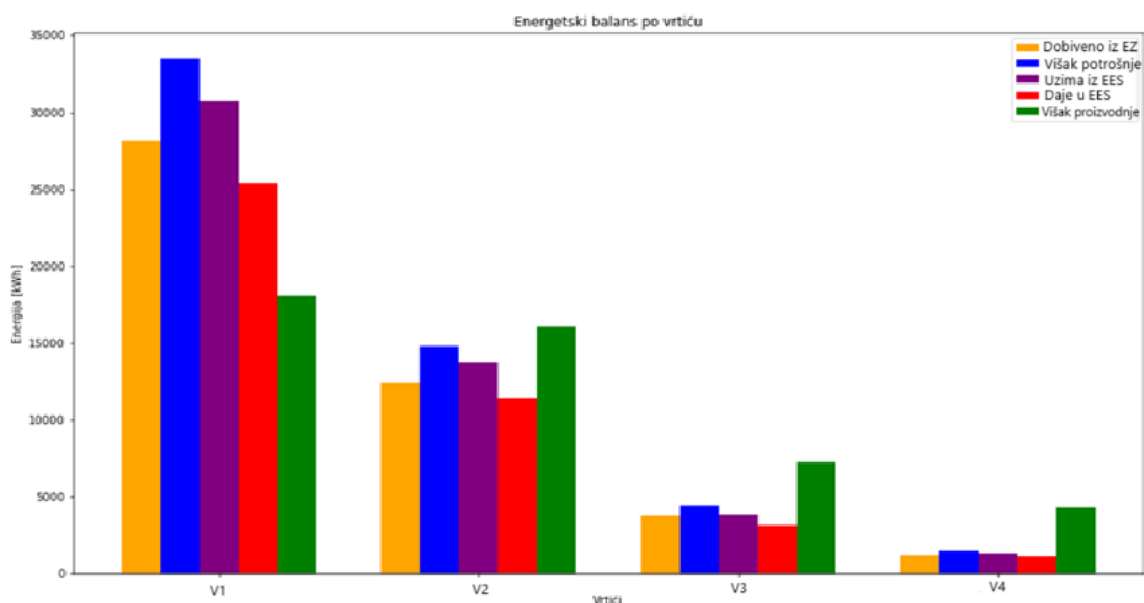
Član	Višak potrošnje (kWh)	Višak proizvodnje (kWh)	Udio (%)
V1	33.509,38	18.028,27	61,79
V2	14.795,02	16.069,48	27,28
V3	4.476,27	7.236,09	8,25
V4	1.448,04	4.282,39	2,67

Korištene cijene električne energije nalaze se u tablici V.

Tablica V. Cijene korištene za energetske zajednicu vrtića

Kupovna cijena VT bez mrežarine €/kWh	0,125543
Kupovna cijena NT bez mrežarine €/kWh	0,080231
Kupovna cijena VT s mrežarinom €/kWh	0,168481
Kupovna cijena NT s mrežarinom €/kWh	0,107242
Prodajna cijena VT €/kWh	0,06761
Prodajna cijena NT €/kWh	0,04321
Cijena dijeljenja u EZG VT bez mrežarine €/kWh	0,097
Cijena dijeljenja u EZG NT bez mrežarine €/kWh	0,062
Cijena dijeljenja u EZG VT s mrežarinom €/kWh	0,126
Cijena dijeljenja u EZG NT s mrežarinom €/kWh	0,075

Energetski balans na godišnjoj razini, koji se temelji na 15-minutnom obračunu kupca s vlastitom proizvodnjom, prikazan je na slici 4.



Slika 4. Energetski balans u energetske zajednici - fiksni ključ

Ukupan višak proizvedene električne energije u svakom intervalu se dijeli proporcionalno godišnjem višku potrošnje vrtića (Tablica IV, udio). Formula (2) označava električnu energiju koju vrtić i dobije iz energetske zajednice u intervalu t ($E_{i,t}$). Ta električna energije jednaka je umnošku udjela energije u_i i sumi viškova proizvodnje električne energije vrtića ($\sum_j G_{j,t}$) za svaki 15-minutni interval t :

$$E_{i,t} = u_i \cdot \sum_j G_{j,t} \quad (2)$$

Tako dobivena električna energija iz energetske zajednice, označena je kao „Dobiveno iz EZ“ (narančasto na slici 4.).

Ako je višak potrošnje električne energije u 15-minutnom vremenskom intervalu bio istovremen s dobivenom električnom energijom iz energetske zajednice, tada se ta količina dijeljene električne energije proizvedene unutar energetske zajednice smatra potrošenom unutar energetske zajednice. Ako je dobivena električna energija iz energetske zajednice manja od viška potrošnje u tom intervalu, član energetske zajednice ostatak potrebne električne energije kupuje od svog opskrbljivača i preuzima iz elektroenergetskog sustava (EES), što je označeno kao „Uzima iz EES“ (ljubičasto na slici 4.). Formulom se navedeno može prikazati kao:

ako je $E_{i,t} < P_{i,t}$:

$$EES_{in,i,t} = \max(0, E_{i,t} - P_{i,t}) \quad (3)$$

gdje $EES_{in,i,t}$ označava električnu energiju preuzetu iz EES-a/mreže za vrtić i u vremenskom intervalu t . Ako dodijeljena električna energija iz energetske zajednice nije istovremena s potrošnjom članova energetske zajednice, ili je veća od ostvarene potrošnje električne energije za taj interval, višak dodijeljene električne energije prodaje se opskrbljivaču i predaje u EES/mrežu, što je na grafu označeno kao „Daje u EES“ (crveno na slici 4.). Formulom se navedeno može prikazati kao:

ako je $E_{i,t} > P_{i,t}$:

$$EES_{out,i,t} = \max(0, P_{i,t} - E_{i,t}) \quad (4)$$

gdje $EES_{out,i,t}$ označava električnu energiju predanu u EES/mrežu za vrtić i u vremenskom intervalu t .

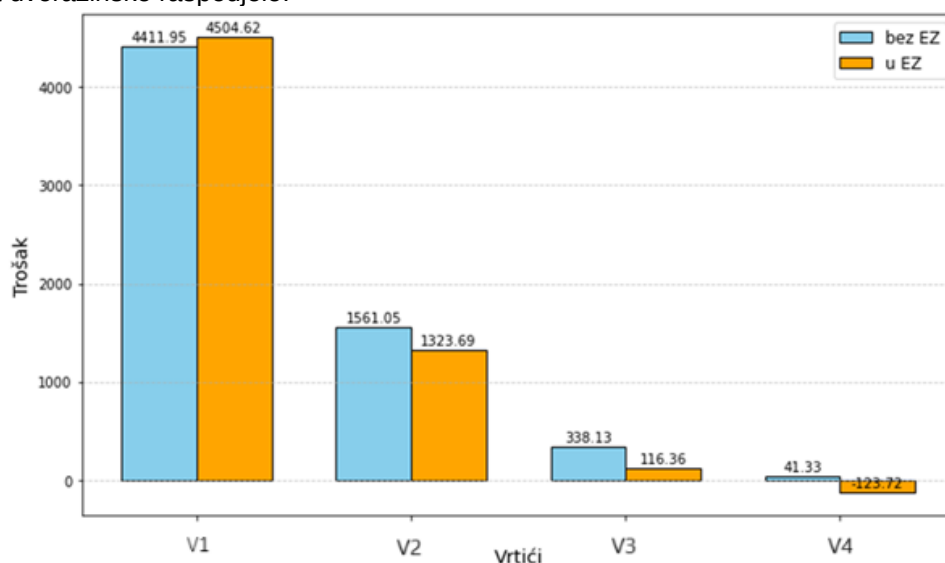
Prije sudjelovanja u energetske zajednici, predana električna energija članova označena je kao „Višak proizvodnje“ (zeleno na slici 4.), a preuzeta električna energija kao „Višak potrošnje“ (plavo na slici 4.).

Vidljivo je da dječji vrtić V1 ima najveći višak potrošnje električne energije, zbog čega iz energetske zajednice dobiva najveći udio viška proizvodnje. Međutim, jedino ovaj vrtić ima stupac viška proizvodnje manji od stupca „Daje u EES“, što znači da vrtić ne može iskoristiti većinu dodijeljene električne energije iz energetske zajednice zbog neistovremenosti viškova potrošnje i viškova proizvodnje u energetske zajednici ili prevelikih viškova proizvodnje električne energije dobivenih iz energetske zajednice. Neiskorišteni višak mora se predati u EES/mrežu. Ova situacija rezultira povećanim troškovima za V1 te bi stoga bilo potrebno razmotriti alternativni ključ raspodjele električne energije kako bi se osigurala optimalna iskorištenost električne energije unutar energetske zajednice. Ostali vrtići imaju manji stupac „Uzima iz EES“ u odnosu na stupac „Višak potrošnje“, što znači da su dio svojih potreba za električnom energijom nadomjestili iz energetske zajednice po povoljnijim uvjetima. Ova situacija ukazuje na to da su energetske zajednice učinkovite u smanjenju troškova za članove, omogućujući im da dio svojih potreba pokriju putem zajedničke proizvodnje električne energije, čime se smanjuje potreba za kupovinom električne energije na tržištu i preuzimanje te energije iz EES-a.

Slika 5. prikazuje usporedbu godišnjih troškova vrtića za električnu energiju u modelu kupca s vlastitom proizvodnjom (bez EZ) i u modelu članstva u energetske zajednici (u EZ). Priključivanjem energetske zajednici građana ostvaruju se godišnje uštede u odnosu na samostalno djelovanje, koje se kreću između 240 i 165 € godišnje. Dječji vrtić V1 jedini ne ostvaruje financijsku korist iz sudjelovanja u energetske zajednici. Razlog tomu je činjenica da je vrtić V1 najveći potrošač električne energije, te prema odabranom ključu raspodjele dobiva najveći udio viška proizvodnje koji ne može u potpunosti iskoristiti. Kao rezultat toga, vrtić će morati platiti naknade za mrežarinu i dodijeljenu električnu energiju, dok od opskrbljivača prima znatno manju naknadu za višak električne energije koju mu prodaje i koju predaje u mrežu.

S obzirom na to da je grad vlasnik sunčanih elektrana vrtića, postoji mogućnost preraspodjele financijskih sredstava (npr. Bill Sharing metoda) kako bi se spriječio financijski gubitak vrtića ili kako bi se utvrdio drugačiji ključ podjele. Jedno od rješenja je uvođenje dinamičkog ključa koji se mijenja za svaki 15-

minutni interval i prema kojem nitko ne bi primio više električne energije nego što mu je potrebno u tom trenutku, a višak proizvodnje bio bi vlasništvo onoga iz čije je sunčane elektrane potekla proizvodnja ili bi bio predmet dvorazinske raspodjele.



Slika 5. Usporedba godišnjih troškova za električnu energiju

Zaključno, rezultati financijske analize za dječje vrtiće donose uštede koje nisu zanemarive, ali nedovoljno su značajne u odnosu na troškove osnivanja i vođenja energetske zajednice, a koji nisu uračunati u proračun ušteda.

Povećanje isplativosti modela zahtijevalo bi uključivanje u energetska zajednica članova s različitim profilima potrošnje energije, posebno onih s intenzivnijom potrošnjom tijekom ljetnih mjeseci. Takvi krajnji korisnici mogu uključivati bolnice, zgrade javne uprave, hotele i turističke objekte, sportske i rekreacijske centre i sl. Ovakav pristup ne samo da bi povećao efikasnost i isplativost energetske zajednice, već bi dodatno osigurao optimalno korištenje obnovljivih izvora energije, posebice u periodima njihove maksimalne proizvodnje električne energije.

4. ZAKLJUČAK

Energetske zajednice važan su alat za ubrzanu transformaciju EES-a prema održivim izvorima energije. Kao koncept, potiču lokalnu energetska neovisnost, smanjuju troškove za krajnje korisnike (kroz veću samopotrošnju i manju ovisnost o tržišnim cijenama električne energije) i gubitke (tehnički gubici u prijenosu električne energije), a potiče sigurnost opskrbe, decentralizacija i dekarbonizacija. Međutim, postoji značajan nedostatak istraživanja temeljenih na stvarnim slučajevima, koji bi trebali biti temelj unaprjeđenja postojećih modela i politika. Primjena odgovarajućih cjenovnih signala i korištenje postrojenja za skladištenje energije mogu omogućiti bolje iskorištavanje potencijala manjih krajnjih kupaca za fleksibilnost, čime se stvara osnova za učinkovitije dijeljenje električne energije. Iznimno je bitno povećati osmotrivost EES-a, posebice u distribucijskoj mreži, povećanjem mjerenja i udjela naprednih brojila. Rješenja za pohranu energije mogu biti dobar alat u podršci EES-u u vrijeme vršnih opterećenja, ali i izvor prihoda i mogućnosti pružanja usluga fleksibilnosti ili iskorištenja većeg stupnja samodostatnosti. Europska unija potiče razvoj tržišta fleksibilnosti na distribucijskoj razini kako bi se unaprijedila integracija obnovljivih izvora energije, poboljšala stabilnost energetskih sustava i osigurala učinkovita ravnoteža između ponude i potražnje. U kontekstu nadolazećih zakonskih i regulatornih promjena, poput ukidanja modela samoopskrbe i prelaska na model kupca s vlastitom proizvodnjom, sudjelovanje u energetskim zajednicama dobiva na dodatnoj važnosti. Uz mogućnost nepovoljnih uvjeta otkupa viškova električne energije od strane opskrbljivača, energetske zajednice nude siguran okvir za upravljanje viškovima električne energije i optimizaciju troškova za električnu energiju. Prilikom izračuna ušteda ustanovljeno je kako mogućnost nadogradnje modela dijeljenja električne energije predstavljaju dinamički ključ koji je različit za svaki 15-minutni interval i dvorazinska raspodjela energije.

5. LITERATURA

- [1] E. Union, "Directive (eu) 2019/944 of the european parliament and of the council of 5 june 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending directive 2012/27," J. Eur. Union, 2019.
- [2] European Parliament, "Directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018," 2018.
- [3] Hep d.o.o., "DESETOGODIŠNJI (2024.– 2033.) PLAN RAZVOJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE HEP ODS-a s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje." https://www.hera.hr/hr/ docs/2024/Prijedlog_2024-01-29.pdf.
- [4] Energetski institut Hrvoje Požar (EIHP), "Stručna i znanstvena potpora u izradi metodologije za planiranje gubitaka električne energije i metodologije za izračun ostvarenja gubitaka te procjene tehničkih gubitaka i neovlašteno preuzete električne energije," tech. rep., Energetski institut Hrvoje Požar (EIHP), 2016. Izvještaj.
- [5] Vlada RH, Zakon o tržištu električne energije NN 111/21, 83/23, <https://www.zakon.hr/z/377/Zakon-o-tr%20C5%BEi%20C5%A1tu-elektri%C4%8Dne-energije>, 29 Listopad, 2023.
- [6] P. Ponnagati, R. Sinha, J.R. Pillai, and B. Bak-Jensen, „Flexibility provisions through local energy communities: A review“, *Next Energy*, vol. 1, no. 2, p. 100022, 2023.
- [7] G. Santos, R. Faia, F. Lezama, and Z. Vale, "Multilevel electricity trading simulation considering energy communities participation," in 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 15, IEEE, 2023.
- [8] G. Brusco, N. Sorrentino, D. Menniti, and A. Pinnarelli, "Real time management model of a renewable energy community with distributed storage for imbalance costs reduction," Available at SSRN 4639073.
- [9] M. Gržanić, J. M. Morales, S. Pineda, and T. Capuder, "Electricity costsharing in energy communities under dynamic pricing and uncertainty," IEEE access, vol. 9, pp. 30225–30241, 2021.
- [10] X. Jin, Q. Wu, and H. Jia, "Local flexibility markets: Literature review on concepts, models and clearing methods," *Applied Energy*, vol. 261, p. 114387, 2020.
- [11] G. Santos, R. Faia, F. Lezama, and Z. Vale, "Multilevel electricity trading simulation considering energy communities participation," in 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-5, IEEE, 2023.
- [12] S. Pelka, E. Chappin, M. Klobasa, and L. de Vries, "Participation of active consumers in the electricity system: Design choices for consumer governance," *Energy Strategy Reviews*, vol. 44, p. 100992, 2022.
- [13] A. Aminlou, M. M. Hayati, and K. Zare, "Local peer-to-peer energy trading evaluation in micro-grids with centralized approach," in 2023 8th international conference on technology and energy management (ICTEM), pp. 1–6, IEEE, 2023.
- [14] L. Herenčić, P. Ilak, I. Rajšl, and M. Kelava, "Local energy trading under emerging regulatory frameworks: Impacts on market participants and power balance in distribution grids," in IEEE EUROCON 2021-19th International Conference on Smart Technologies, pp. 449–454, IEEE, 2021.
- [15] D. Badanjak and H. Pandžić, "Distribution-level flexibility markets—a review of trends, research projects, key stakeholders and open questions," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6622, 2021.
- [16] J. Mello, C. de Lorenzo, F. A. Campos, and J. Villar, „Pricing and simulating energy transactions in energy communities“, *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1949, 2023.
- [17] F. García-Muñoz, F. Teng, A. Junyent-Ferré, F. Díaz-González, and C. Corchero, "Stochastic energy community trading model for day-ahead and intraday coordination when offering der's reactive power as ancillary services," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100951, 2022.
- [18] G. Brusco, D. Menniti, A. Pinnarelli, and N. Sorrentino, "Renewable energy community with distributed storage optimization to provide energy sharing and additional ancillary services," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, p. 101173, 2023.

- [19] P. Ponnaganti, R. Sinha, J. R. Pillai, and B. Bak-Jensen, "Flexibility provisions through local energy communities: A review," *Next Energy*, vol. 1, no. 2, p. 100022, 2023.
- [20] F. D'Ettorre, M. Banaei, R. Ebrahimi, S. A. Pourmousavi, E. Blomgren, J. Kowalski, Z. Bohdanowicz, B. Łopaciuk-Gonczaryk, C. Biele, and H. Madsen, "Exploiting demand-side flexibility: State-of-the-art, open issues and social perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112605, 2022.
- [21] P. M. Urios, "Self-organised energy communities for flexibility services," 2022.
- [22] M. Sangaré, E. Bourreau, B. Fortz, A. Pachurka, and M. Poss, "Loads scheduling for demand response in energy communities," *Computers & Operations Research*, vol. 160, p. 106358, 2023.
- [23] C. Eid, L. A. Bollinger, B. Koirala, D. Scholten, E. Facchinetti, J. Lilliestam, and R. Hakvoort, "Market integration of local energy systems: Is local energy management compatible with european regulation for retail competition?," *Energy*, vol. 114, pp. 913–922, 2016.
- [24] A. Ahmadifar, M. Ginocchi, M. S. Golla, F. Ponci, and A. Monti, "Development of an energy management system for a renewable energy community and performance analysis via global sensitivity analysis," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4131–4154, 2023.
- [25] S. Ahmed, A. Ali, and A. D'Angola, "A review of renewable energy communities: Concepts, scope, progress, challenges, and recommendations," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 1749, 2024.
- [26] J. Barba and S. Martin, "Sharing-cost factors for a community of pv prosumers with battery storage," in *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, pp. 16, IEEE, 2023.
- [27] F. Oliveira, P. Nogueira, and M. Casquição, "Energy agencies and renewable energy communities: A new path for energy decentralization," *European Energy Network: Strasbourg, France*, vol. 57, 2022.
- [28] M. Moncecchi, S. Meneghello, and M. Merlo, "Energy sharing in renewable energy communities: The italian case," in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
- [29] C. Long, J. Wu, C. Zhang, L. Thomas, M. Cheng, and N. Jenkins, "Peerto-peer energy trading in a community microgrid," in *2017 IEEE power & energy society general meeting*, pp. 1–5, IEEE, 2017.
- [30] D. S. Schiera, C. De Vizia, A. Zarri, R. Borchellini, A. Lanzini, E. Patti, and L. Bottaccioli, "Modelling and techno-economic analysis of peer-to-peer electricity trading systems in the context of energy communities," in *2022 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2022 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, pp. 1–6, IEEE, 2022.
- [31] M. E. Community, "Myenergycommunity." <https://www.myenergycommunity.eu/>.