



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ

ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ
ТЕХНОЛОГИИ



Институт за електротехника, електротермија и електрични возила

Бодан М. Велковски

**ПОДОБРУВАЊЕ НА ОПЕРАТИВНАТА ФЛЕКСИБИЛНОСТ НА
ЗАЕДНИЦИТЕ НА ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА СО
ИНТЕГРАЦИЈА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА И ПРИМЕНА НА
ИНОВАТИВНИ ТАРИФНИ СИСТЕМИ**

Докторски труд

Скопје, 2026

Докторанд:

БОДАН МИЛЕ ВЕЛКОВСКИ

Тема:

ПОДОБРУВАЊЕ НА ОПЕРАТИВНАТА ФЛЕКСИБИЛНОСТ НА ЗАЕДНИЦИТЕ НА ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА СО ИНТЕГРАЦИЈА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА И ПРИМЕНА НА ИНОВАТИВНИ ТАРИФНИ СИСТЕМИ

Ментор:

Проф. д-р СНЕЖАНА ЧУНДЕВА,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

Комисија за одбрана:

Проф. д-р СНЕЖАНА ЧУНДЕВА, ментор
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р АЛЕКСАНДРА КРКОЛЕВА МАТЕСКА, претседател
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р ДИМИТАР ДИМИТРОВ, член
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р Зоран Хаци-Велков, член
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје,
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р НАТАША МАРКОВСКА, член
Македонска академија на науките и уметностите

Научна област:

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

Лектор:

Ленка Панчевска

Датум на одбрана:

26.2.2026

Бодан Миле Велковски

**ПОДОБРУВАЊЕ НА ОПЕРАТИВНАТА ФЛЕКСИБИЛНОСТ НА
ЗАЕДНИЦИТЕ НА ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА СО
ИНТЕГРАЦИЈА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА И ПРИМЕНА НА
ИНОВАТИВНИ ТАРИФНИ СИСТЕМИ**

– АПСТРАКТ –

Заедниците на обновлива енергија добиваат сè поголемо значење во енергетскиот систем, бидејќи овозможуваат локална, оптимизирана и поефикасна употреба на распределените енергетски ресурси. Нивната вредност дополнително се зголемува со интеграцијата на електричните возила, кои делуваат како мобилен и високо флексибилен потрошувач. Во оваа дисертација е развиен оптимизациски модел заснован на мешано-целобројно линеарно програмирање кој ја оптимизира работата на заедниците на обновлива енергија со интегрирани електрични возила. Моделот ги минимизира вкупните трошоци за електрична енергија на заедницата, почитувајќи ги оперативните ограничувања на технологиите и техничките ограничувања на дистрибутивната мрежа. Моделот е употребен за анализа на ефектите од различни тарифни системи и механизми за поддршка на сопствена потрошувачка врз економските резултати на заедниците и врз техничките параметри на дистрибутивната мрежа. Резултатите покажуваат дека тарифните системи кои го поттикнуваат локалното користење на енергијата, во комбинација со координирано полнење на електричните возила, можат да ги намалат мрежните загуби и врвните оптоварувања и да ја зголемат сопствената потрошувачка на заедницата. Дисертацијата вклучува уште две истражувања што ја разгледуваат конкретната улога на електричните возила во рамките на заедниците на обновлива енергија. Првата студија покажува дека, иако дневното полнење од надворешни корисници навистина може да ја зголеми сопствената потрошувачка на заедницата, овој ефект генерира дополнителни приходи и со тоа реална вредност за заедницата само под специфични услови: доволно локално производство и јасно структурирани економски сигнали и внатрешни тарифи. Втората студија квантитативно ја оценува зависноста помеѓу бројот на електрични возила, моќностите на полначите и клучните индикатори на заедницата. Анализата открива дека зголемувањето на бројот на електрични возила ја подобрува сопствената потрошувачка на заедницата, но ја намалува енергетската независност и го зголемува врвното оптоварување, освен ако инфраструктурата за полнење не е соодветно димензионирана. Поголемите моќности на полнење делумно го ублажуваат овој ефект, бидејќи овозможуваат подобро усогласување меѓу профилите на полнењето и локалното производство. Овие резултати ја нагласуваат улогата на електричните возила како клучен флексибилен ресурс во заедниците на обновливи извори на енергија и го потврдуваат значењето на внимателно дизајнираните тарифни и регулаторни механизми за подобрување на нивната оперативна флексибилност.

Клучни зборови: заедници на обновливи извори на енергија (ЗОИЕ); електрични возила (ЕВ); математичка оптимизација; тарифни системи за електрична енергија; споделување на енергија; сопствена потрошувачка; мешано-целобројно линеарно програмирање (МЦЛП).

Bodan Mile Velkovski

ENHANCING THE OPERATIONAL FLEXIBILITY OF RENEWABLE ENERGY COMMUNITIES THROUGH INTEGRATION OF ELECTRIC VEHICLES AND IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE TARIFF SYSTEMS

– ABSTRACT –

Renewable energy communities are gaining increasing importance in modern energy systems, as they enable local, optimized, and more efficient use of distributed energy resources. Their value is further enhanced by the integration of electric vehicles, which act as mobile and highly flexible consumers. This dissertation develops a mixed-integer linear programming optimization model that optimizes the operation of renewable energy communities with integrated electric vehicles. The model minimizes the community's total electricity cost while respecting the operational constraints of the technologies and the technical limits of the distribution network. It is used to analyze the effects of various tariff systems and incentives for self-consumption on the economic performance of the communities and on the technical parameters of the distribution network. The results show that tariff systems which promote local use of energy, combined with coordinated charging of electric vehicles, can reduce network losses and peak loads while increasing the community's self-consumption. The dissertation further includes two studies examining the specific role of electric vehicles within renewable energy communities. The first study shows that although daytime charging by external users can increase the community's self-consumption, this effect generates additional revenue—and thus real value for the community—only under specific conditions: sufficient local photovoltaic production and clearly structured internal economic signals and tariffs. The second study quantitatively evaluates the relationship between the number of electric vehicles, the capacities of the chargers, and key performance indicators of the community. The analysis reveals that an increasing number of electric vehicles improves the community's self-consumption but reduces energy independence and increases peak loads, unless the charging infrastructure is appropriately sized. Higher charging capacities partially mitigate this effect by enabling better alignment between charging profiles and local production. These findings highlight the role of electric vehicles as a key flexible resource in renewable energy communities and confirm the importance of carefully designed tariff and regulatory mechanisms for enhancing their operational flexibility.

Keywords: renewable energy communities (REC); electric vehicles (EV); mathematical optimization; electricity tariff systems; energy sharing; self-consumption; mixed-integer linear programming (MILP).

Благодарност – Изразувам искрена благодарност до проф. д-р Снежана Чундева за нејзиното посветено менторство, трпение и континуирана поддршка во текот на моите докторски студии. Благодарност упатувам и до членовите на Комисијата за одбрана за нивната стручност, соработка и за конструктивните забелешки кои значајно придонесоа за унапредување на овој труд.

Посебна благодарност до мојот колега и пријател, д-р Владимир Ѓорѓиевски, за плодните дискусии и несебичната помош и поддршка во изминатите години. На моето семејство и на пријателите им благодарам за љубовта, разбирањето и трпението, без кои ова достигнување немаше да биде возможно.

Бодан

Изјавувам дека докторскиот труд го изработив самостојно, дека уредно ги цитирам сите користени извори и литература и дека трудот не е користен во рамките на други универзитетски студии или за стекнување на друго звање.

Потпис на авторот, с.р

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

Потпис на авторот, с.р

СОДРЖИНА

Апстракт	3
Abstract	4
Содржина	7
Номенклатура	9
АКРОНИМИ	9
МАТЕМАТИЧКИ СИМБОЛИ	10
Листа на слики	13
Листа на табели	15
Глава 1. Вовед	16
1.1. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА	17
1.2. ИСТРАЖУВАЧКИ ПРОБЛЕМ	22
1.3. ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	23
1.4. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	24
1.5. ХИПОТЕЗИ	25
1.6. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКАТА РАБОТА	25
1.7. СТРУКТУРА	26
Глава 2. ЗОИЕ, тарифни системи и влијанија врз дистрибутивната мрежа	28
2.1. ЗАЕДНИЦИ НА ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА	28
2.1.1. Правен и регулаторен контекст на ЗОИЕ во ЕУ	28
2.1.2. Структурни карактеристики на ЗОИЕ	30
2.1.3. Улогата на ЕВ во ЗОИЕ	31
2.2. ТАРИФНИ СИСТЕМИ И МЕХАНИЗМИ ЗА ПОДДРШКА НА СПОДЕЛУВАЊЕТО ЕНЕРГИЈА ВО РАМКИ НА ЗОИЕ	33
2.2.1. Типови на тарифни системи за продажба на електрична енергија	34
2.2.2. Регулирани трошоци за електричната енергија и влијанија врз ЗОИЕ	36
2.2.3. Економски инструменти за поддршка на ЗОИЕ	37
2.2.4. Влијание на тарифните системи врз однесувањето на членовите на ЗОИЕ	41
2.3. ВЛИЈАНИЈА ВРЗ ДИСТРИБУТИВНАТА МРЕЖА	42
2.3.1. Влијанија на ЗОИЕ врз работата на дистрибутивната мрежа	42
2.3.2. Влијанија од полнење ЕВ во дистрибутивни мрежи	43
2.3.3. Интеракции помеѓу ЗОИЕ и полнењето на ЕВ	45
Глава 3. Математичко моделирање на ЗОИЕ	46
3.1. МАТЕМАТИЧКА ОСНОВА НА МЕШАНО-ЦЕЛОБРОЈНОТО ЛИНЕАРНО ПРОГРАМИРАЊЕ (МЦЛП)	46
3.1.1. Стандардни методи за решавање на МЦЛП проблеми	47
3.2. КОНЦЕПТУАЛНА РАМКА ЗА МОДЕЛ НА ЗОИЕ СО ИНТЕГРАЦИЈА НА ЕВ	47
3.2.1. Членови и ресурси во заедницата	47
3.2.2. Принципи на споделување на енергија	48
3.2.3. Претпоставки за енергетските текови	48
3.3. ЦЕЛНА ФУНКЦИЈА НА ОПТИМИЗАЦИСКИОТ МОДЕЛ	49
3.4. ОГРАНИЧУВАЊА НА МЦЛП ОПТИМИЗАЦИСКИОТ МОДЕЛ	51
3.4.1. Биланс на електрична енергија	51
3.4.2. Споделување на електрична енергија во рамки на ЗОИЕ	51

3.4.3. Моделирање на електрични возила	52
3.4.4. Моделирање на батериски систем за складирање енергија.....	53
3.4.5. Биланс на топлинска енергија и систем за складирање топлинска енергија	54
3.5. РЕГУЛАРИЗАЦИЈА НА ПОЛНЕЊЕТО НА ЕВ.....	55
3.5.1. Теоретски основи на регуларизацијата во математичката оптимизација	56
3.5.2. Регуларизирана целна функција и формализација на оптимизацискиот проблем	56
3.5.3. Регуларизациски компоненти	57
3.5.4. Нумерички резултати и конзистентност при користење различни решавачи	59
3.6. НУМЕРИЧКИ ИНДИКАТОРИ.....	60
3.6.1. Стапка на сопствена потрошувачка.....	61
3.6.2. Стапка на енергетска независност	62
3.6.3. Стапка на споделување енергија.....	62
3.6.4. Однос на произведена и потрошена енергија	62
Глава 4. Влијание на тарифните системи врз работењето на ЗОИЕ и параметрите на дистрибутивната мрежа	63
4.1. ОПИС И ПОСТАВЕНОСТ НА СТУДИЈАТА НА СЛУЧАЈ.....	63
4.1.1. Конфигурација на ЗОИЕ и дистрибутивната мрежа	63
4.1.2. Влезни податоци.....	65
4.1.3. Анализирани тарифни системи	66
4.2. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	68
4.2.1. Енергетска динамика на ЗОИЕ и технички параметри.....	68
4.2.2. Оперативни параметри на дистрибутивната мрежа	71
Глава 5. Можности за интеграција на ЕВ во ЗОИЕ.....	76
5.1. ИНТЕГРАЦИЈА НА НАДВОРЕШНИ СОПСТВЕНИЦИ НА ЕВ ВО РЕЗИДЕНЦИЈАЛНИ ЗОИЕ	76
5.1.1. Студија на случај	77
5.1.2. Резултати и дискусија	79
5.2. СТАТИСТИЧКА АНАЛИЗА НА ВЛИЈАНИЕТО НА БРОЈОТ НА ЕВ И МОЌНОСТА НА ПОЛНАЧИТЕ ВРЗ ЕНЕРГЕТСКИТЕ ИНДИКАТОРИ НА ЗОИЕ	83
5.2.1. Регресивна анализа.....	83
5.2.2. Дискусија на резултатите	88
Глава 6. Заклучок.....	90
6.1. ВАЛИДАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКИТЕ ХИПОТЕЗИ.....	91
6.2. ПРИДОНЕС	92
6.3. ПРИМЕНА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	94
6.4. НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	94
Прилог 1. Резултати од статистички тестови.....	101
Биографија	104
Публикации	105

НОМЕНКЛАТУРА

Акроними

Кирилични		
Кратенка	Значење	
БССЕ	Батериски систем за складирање енергија	
ВТ	Висока тарифа	
ГЕЗ	Граѓанска енергетска заедница	
ДДВ	Данок на додадена вредност	
ДМ	Дистрибутивна мрежа	
ЕВ	Електрично возило	
ЕУ	Европска Унија	
ЗОИЕ	Заедница на обновливи извори на енергија	
МСП	Мало или средно претпријатие	
МЦЛП	Мешано-целобројно линеарно програмирање	
НН	Нисконапонско	
НТ	Ниска тарифа	
ОИЕ	Обновливи извори на енергија	
СН	Среднонапонско	
ФВ	Фотоволтаичен (генератор, систем)	
Латинични		
Кратенка	Значење	Англиски превод
АВ	Станбена зграда	Apartment building
ADMM	Метод на множители со наизменични насоки	Alternating direction method of multipliers
CI%	Процентуално зголемување на трошокот	Cost increase
ESR	Стапка на споделување енергија	Energy sharing rate
FiP	Повластена премија	Feed-in premium
FiT	Повластена тарифа	Feed-in tariff
GTDR	Однос на произведена и потрошена енергија	Generation to demand ratio
HC3	Робусна корекција на стандардни грешки во регресија	Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator (Type 3)
MFH	Куќа со повеќе домаќинства	Multi-family house
OF	Целна функција	Objective function
PSI	Индекс на измазнетост на профил на полнење на ЕВ	Profile smoothness index
SCR	Стапка на сопствена потрошувачка	Self-consumption rate
SFH	Куќа со едно домаќинство	Single-family house
SSR	Стапка на енергетска независност	Self-sufficiency rate
ToU	Според време на користење (пр. тарифа)	Time of use
V2C	Возило до заедница	Vehicle to community
V2G	Возило до мрежа	Vehicle to grid
VIF	Фактор на инфлација на варијансата	Variance inflation factor

Математички симболи

Симбол	Дефиниција
i	Индекс на член во ЗОИЕ (важи за сите променливи со овој индекс во оваа табела)
t	Временски чекор (важи за сите променливи со овој индекс во оваа табела)
T	Временски опсег
n	Вкупен број на членови во ЗОИЕ
N	Множество од сите членови во ЗОИЕ
C_i	Вкупен трошок за електрична енергија на член i
C_N	Вкупен колективен трошок за електрична енергија на целата ЗОИЕ
$C_i^b(t)$	Цена за преземена електрична енергија од мрежата
$C_i^s(t)$	Цена за предадена електрична енергија во мрежата
$C_i^{sh,b}(t)$	Цена за преземена електрична енергија од ЗОИЕ
$C_i^{sh,s}(t)$	Цена за предадена електрична енергија во ЗОИЕ
C_i^{cap}	Цена за врвната ангажирана моќност
$C_i^{reg,b}(t)$	Регулирани трошоци за електрична енергија преземена од мрежата
$C_i^{reg,s}(t)$	Регулирани трошоци за електрична енергија предадена во мрежата
$C_i^{reg,sh,b}(t)$	Регулирани трошоци за електрична енергија преземена од ЗОИЕ
$C_i^{reg,sh,s}(t)$	Регулирани трошоци за електрична енергија предадена во ЗОИЕ
$C_i^{prem,sh,b}(t)$	Премија за преземена споделена електрична енергија од ЗОИЕ
$C_i^{prem,sh,s}(t)$	Премија за предадена споделена електрична енергија во ЗОИЕ
C_i^{ext}	Вкупна цена за електрична енергија што надворешниот корисник i ја плаќа на ЗОИЕ
$p_i^b(t)$	Количество електрична енергија преземена од мрежата
$p_i^s(t)$	Количество електрична енергија предадена во мрежата
$p_i^{sh,b}(t)$	Количество електрична енергија преземена од ЗОИЕ
$p_{i,t}^{sh,i}(t)$	Количество електрична енергија предадена во ЗОИЕ
p_i^{max}	Врвна ангажирана моќност на член i во анализираниот временски опсег
$p_i^{load}(t)$	Количество електрична енергија употребено за напојување на електричните уреди во објектот на член i
$p_i^{bat,ch}(t)$	Количество енергија употребено за полнење на батерискиот систем
$p_i^{bat,dis}(t)$	Количество енергија преземено од батерискиот систем
$p_i^{HP}(t)$	Количество електрична енергија употребено од топлинската пумпа
$p_i^{EV}(t)$	Количество електрична енергија употребено за полнење на батеријата на ЕВ
$p_i^{PV}(t)$	Количество електрична енергија произведена од ФВ генератор
\bar{p}_i^{grid}	Максимална моќност на приклучната точка кон дистрибутивната мрежа
\bar{p}_i^{EV}	Максималната моќност за полнење ЕВ,
$x_i(t)$	Бинарна променлива, која одредува дали во временски чекор t , членот i предава или презема електрична енергија
$e_i^{EV}(t)$	Количество енергија складирано во батеријата на ЕВ
η_i^{EV}	Коефициент на ефикасност на полнењето на батеријата на ЕВ
$t_i^{EV,arr}$	Време на пристигнување на ЕВ
$t_i^{EV,dep}$	Време на заминување на ЕВ
$\alpha_i(t)$	Бинарен параметар за присутност на ЕВ на станицата за полнење

$E_i^{EV,start}$	Почетно ниво на енергија во батеријата на ЕВ
$E_i^{EV,des}$	Почетно ниво на енергија во батеријата на ЕВ
\underline{E}_i^{EV}	Минимално ниво на енергија во батеријата на ЕВ
\bar{E}_i^{EV}	Максимално ниво на енергија во батеријата на ЕВ
$e_i^{bat}(t)$	Количество енергија складирано во батерискиот систем
$\eta_i^{bat,ch}$	Коефициент на ефикасност на полнење на батерискиот систем
$\eta_i^{bat,dis}$	Коефициент на ефикасност на празнење на батерискиот систем
$\bar{P}_i^{bat,ch}$	Максимална дозволена моќност за полнење на батерискиот систем
$\bar{P}_i^{bat,dis}$	Максимална дозволена моќност за празнење на батерискиот систем
\underline{E}_i^{bat}	Минимално дозволено количество енергија складирана во батерискиот систем
\bar{E}_i^{bat}	Максимално дозволено количество енергија складирана во батерискиот систем
$E_i^{bat,start}(t)$	Почетно количество енергија складирано во батерискиот систем во временски чекор $t=1$
$y_i(t)$	Бинарна променлива која означува дали батерискиот систем се празни или се полни во временскиот чекор t
$q_i^{load}(t)$	Побарувачка на топлинска енергија
$q_i^{HP}(t)$	Топлина произведена од топлинската пумпа
$q_i^{tes,ch}(t)$	Топлинска енергија складирана во системот за складирање топлинска енергија
$q_i^{tes,dis}(t)$	Топлинска енергија ослободена од системот за складирање топлинска енергија
$COP_i(t)$	Коефициент на перформанса на топлинската пумпа
\bar{Q}_i^{HP}	Топлински капацитет на топлинската пумпа
$e_i^{TES}(t)$	Топлина складирана во системот за складирање топлинска енергија
$\eta_i^{TES,ch}$	Коефициент на ефикасност на полнење на системот за складирање топлинска енергија
$\eta_i^{TES,dis}$	Коефициент на ефикасност на празнење на системот за складирање топлинска енергија
$q_i^{TES,ch}(t)$	Топлинска моќност на полнење на системот за складирање топлинска енергија
$q_i^{TES,dis}(t)$	Топлинска моќност на празнење на системот за складирање топлинска енергија
$E_i^{TES,start}$	Почетна топлина складирана во системот за складирање топлинска енергија
$\bar{Q}_i^{TES,ch}$	Максимална топлинска моќност на полнење на системот за складирање топлинска енергија
$\bar{Q}_i^{TES,dis}$	Максимална топлинска моќност на празнење на системот за складирање топлинска енергија
$z_i(t)$	Бинарна променлива која означува дали системот за складирање топлина се празни или се полни во временскиот чекор t
\underline{E}_i^{TES}	Минимално дозволено количество топлина складирана во системот за складирање топлина
\bar{E}_i^{TES}	Максимално дозволено количество топлина складирана во системот за складирање топлина
$r_1(x)$	Регуларизациска компонентата која пенализира големи промени во моќноста на полнење на ЕВ
$r_2(x)$	Регуларизациска компонентата која пенализира покасно полнење на ЕВ
$r_3(x)$	Регуларизациска компонентата која пенализира порано полнење на ЕВ
v	Вектор на оптимизациски променливи
$f(v)$	Основна целна функција на оптимизацискиот модел
$R(v)$	Вкупна варијација на моќноста на полнење на ЕВ
λ_s	Тежински фактори за регуларизација за измазнетост на полнење на ЕВ
λ_e	Тежински фактори за регуларизација за порано или покасно полнење на ЕВ

$p_i^{\text{dem}}(t)$	Моментална побарувачка на електрична енергија на член i
$p_N^{\text{dem}}(t)$	Моментална колективна побарувачка на електрична енергија на ЗОИЕ
$p_i^{\text{sc}}(t)$	Сопствена потрошувачка на локалното производство за член i
$p_N^{\text{sc}}(t)$	Колективна сопствена потрошувачка на ЗОИЕ
N_{EV}	Број на ЕВ во ЗОИЕ
$P_{\text{ch,max}}$	Максималната моќност на полначите за ЕВ на ЗОИЕ
P_{max}	Врвна ангажирана моќност на целата ЗОИЕ
β_1	Коефициент на маргинална промена на зависната променлива при зголемување на бројот на електрични возила и максималната моќност на полначите
β_2	Коефициент на маргинална промена на зависната променлива при зголемување на максималната моќност на полначите
β_0	Константен член во регресивните модели
ε	Стохастички член во регресивните модели

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 3.1. Крива на зависност помеѓу индексот на измазнетост на профилот на полнење на ЕВ (PSI) и зголемувањето на трошокот (Ct%) за $\lambda s \in [10 - 6,106]$ при $\lambda e = 0$. Вредностите на соодветните λs се прикажани покрај точките на графиконот.....	60
Слика 4.1. Приказ на анализираната ДМ.....	64
Слика 4.2. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи F1 и F2, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.....	68
Слика 4.3. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи F3 и F4, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.....	69
Слика 4.4. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи D1 и D2, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.....	69
Слика 4.5. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи D3 и D4, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.....	69
Слика 4.6. Стапка на споделување енергија (ESR) за анализираната ЗОИЕ за секој тарифен систем, во случај кога е овозможено споделување на енергија меѓу членовите.....	70
Слика 4.7. Стапка на сопствена потрошувачка (SCR) за анализираната ЗОИЕ при секој тарифен систем, со (сина боја) и без (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите.....	70
Слика 4.8. Стапка на енергетска независност (SSR) за анализираната ЗОИЕ при секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).....	70
Слика 4.9. Врвна моќност на анализираната ДМ за секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).....	72
Слика 4.10. Загуби во мрежата во анализираната ДМ за секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).....	72
Слика 4.11. Тарифен систем F1: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	73
Слика 4.12. Тарифен систем F2: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	73
Слика 4.13. Тарифен систем F3: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	73
Слика 4.14. Тарифен систем F4: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	74
Слика 4.15. Тарифен систем D1: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	74
Слика 4.16. Тарифен систем D2: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	74
Слика 4.17. Тарифен систем D3: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	74

Слика 4.18. Тарифен систем D4: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).....	75
Слика 5.1. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во февруари (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).....	79
Слика 5.2. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во јуни (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).	80
Слика 5.3. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во октомври (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).....	80
Слика 5.4. Анализа на чувствителност на економските придобивки за: (лево) членовите на заедницата и (десно) надворешните корисници на ЕВ, со разгледување на вариации од $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ и $\pm 30\%$ на цената по која членовите на заедницата споделуваат енергија, за трите анализирани месеци.	82
Слика 5.5. Корелација меѓу бројот на електрични возила, моќноста на полначите, стапката на сопствена потрошувачка (SCR), стапката на енергетска независност (SSR) и врвната ангажирана моќност	84
Слика 5.6. Предвидена стапка на сопствена потрошувачка (SCR) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите	86
Слика 5.7. Предвидена стапка на енергетска независност (SSR) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите	87
Слика 5.8. Предвидено врвно оптоварување (kW) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите	87
Слика П1.1. Дијагностички графици за регресискиот модел на SCR	101
Слика П1.2. Дијагностички графици за регресискиот модел на SCR	102
Слика П1.3. Дијагностички графици за регресискиот модел на SCR	103

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

ТАБЕЛА 4.1. ТИП НА ПОТРОШУВАЧ ВО СЕКОЈ ЈАЗОЛ И ИНСТАЛИРАНИ КАПАЦИТЕТИ НА ФВ ГЕНЕРАТОР, БССЕ, БАТЕРИЈА НА ЕВ И ПОЛНАЧ ЗА ЕВ.	64
ТАБЕЛА 4.2. ПРЕГЛЕД НА ЦЕНОВНИТЕ КОМПОНЕНТИ ЗА СИТЕ АНАЛИЗИРАНИ ТАРИФНИ СИСТЕМИ.	68
ТАБЕЛА 5.1. ЦЕНОВНИ КОМПОНЕНТИ УПОТРЕБЕНИ ВО АНАЛИЗАТА ЗА ДВАТА ТАРИФНИ СИСТЕМИ.....	78
ТАБЕЛА 5.2. СТАПКА НА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА (SCR) И СТАПКА НА ЕНЕРГЕТСКА НЕЗАВИСНОСТ (SSR) ЗА ДВЕТЕ АНАЛИЗИРАНИ СЦЕНАРИЈА.....	80
ТАБЕЛА 5.3. ВКУПНИ МЕСЕЧНИ ТРОШОЦИ ЗА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА НА ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА И НАДВОРЕШНИТЕ УЧЕСНИЦИ ЗА СЦЕНАРИЈАТА 1 И 2, И НАМАЛУВАЊЕ НА ТРОШОЦИТЕ ЗА ДВЕТЕ ГРУПИ.	81
ТАБЕЛА 5.4. ВКУПНИ МЕСЕЧНИ ТРОШОЦИ ЗА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА НА ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА И НАДВОРЕШНИТЕ КОРИСНИЦИ НА ЕВ ЗА СЦЕНАРИЈАТА 1 И 2, И НАМАЛУВАЊЕ НА ТРОШОЦИТЕ ЗА ДВЕТЕ ГРУПИ ПРИ ПРИМЕНА НА РАМНО НАМАЛУВАЊЕ НА МРЕЖНИТЕ ТРОШОЦИ ЗА ЕНЕРГИЈАТА СПОДЕЛЕНА МЕЃУ ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА.	82
ТАБЕЛА 5.5. ДЕСКРИПТИВНИ СТАТИСТИКИ ЗА ЗАВИСНИТЕ И НЕЗАВИСНИТЕ ПРОМЕНЛИВИ	84
ТАБЕЛА 5.6. РЕЗУЛТАТИ ОД РЕГРЕСИЈАТА СО РОБУСНИ НСЗ СТАНДАРДНИ ГРЕШКИ: ВЛИЈАНИЕ НА БРОЈОТ НА ЕВ И КАПАЦИТЕТОТ НА ПОЛНАЧИТЕ ВРЗ SCR, SSR И ВРВНАТА АНГАЖИРАНА МОЌНОСТ (ЛОГИТ/ЛОГ ТРАНСФОРМИРАНИ МОДЕЛИ)	86
ТАБЕЛА 6.1. ПОВРЗАНОСТ ПОМЕЃУ ХИПОТЕЗИТЕ, МЕТОДИТЕ И КЛУЧНИТЕ РЕЗУЛТАТИ.....	92
ТАБЕЛА П1.1. РЕЗУЛТАТИ ОД ДИЈАГНОСТИЧКИТЕ ТЕСТОВИ ЗА ТРИТЕ ЗАВИСНИ ПРОМЕНЛИВИ.....	101

ГЛАВА 1. ВОВЕД

Глобалната енергетска транзиција е систематска промена во производството, дистрибуцијата и користењето на енергијата, поттикната од климатските промени, исцрпувањето на фосилните ресурси и потребата од сигурно, континуирано и праведно снабдување. Таа се темели на декарбонизација, зголемување на уделот на обновливите извори на енергија (ОИЕ), подобрена енергетската ефикасност и развој на децентрализирани, интелигентни мрежи со поголемо учество на граѓаните и локалните заедници. Овие структурни промени придонесуваат за климатска отпорност и економска стабилност на енергетскиот систем.

Заедниците на обновливи извори на енергија (ЗОИЕ) се правни структури во кои домаќинства, мали бизниси и јавни институции заеднички произведуваат, управуваат, складираат и разменуваат локално произведена енергија [1]. При тоа, клучните придобивки од ЗОИЕ опфаќаат: производство и користење локална обновлива енергија, финансиски заштеди, намалување на енергетската сиромаштија и зајакната вклученост на граѓаните во енергетските процеси. Поради тоа, ЗОИЕ се сметаат за еден од клучните механизми за постигнување на целите на енергетската транзиција [2].

Електричните возила (ЕВ) и инфраструктурата за нивно полнење можат дополнително да ја унапредат работата на ЗОИЕ. Кога се соодветно интегрирани, ЕВ обезбедуваат оперативна флексибилност и складирање на енергија, преку преземање на вишоците од локално произведена енергија од ОИЕ и намалување на потребата од преземање енергија од дистрибутивната мрежа (ДМ) [3]. Сепак, нивната интеграција бара примена на напредни алгоритми за управување поради потенцијалното зголемување на врвните оптоварувања и можните негативни влијанија врз ДМ [4], [5].

Тарифните системи за електрична енергија играат клучна улога во економската одржливост на ЗОИЕ. Динамичките цени, тарифите според време на користење, надоместоците за врвна моќност и механизмите за поддршка на локално споделување енергија можат значајно да ја подобрат сопствената потрошувачка и да го насочат однесувањето на корисниците. И обратно, несоодветно дизајнираните тарифни системи, можат да ја намалат исплатливоста на заедницата и да ја ограничат соработката меѓу нејзините членови [6].

Интеракцијата меѓу ЗОИЕ и ДМ може да ја зголеми ефикасноста на мрежата, преку намалување на врвните оптоварувања, редуцирање на техничките загуби и подобрување на локалниот напонски профил [7]. Меѓутоа, оваа интеракција може да создаде и одредени ограничувања, доколку не се земат предвид техничките ограничувања на инфраструктурата, како што се капацитетот на трансформаторите, термичките ограничувања на водовите и чувствителноста на мрежата на повратни текови на моќност. Во такви случаи, неконтролираното зголемување на локалното производство или недоволно координираната флексибилност можат да создадат нови врвни оптоварувања, напонски девијации или загушувања на мрежата [8]. Поради тоа, потребни се прецизни оптимизациски модели и соодветни регулаторни и тарифни политики кои ќе ја усогласат работата на ЗОИЕ со техничките и оперативните цели на електроенергетскиот систем, обезбедувајќи сигурно, ефикасно и стабилно функционирање на мрежата.

Работењето на ЗОИЕ е дополнително условено од економските и законодавните рамки, како и од варијабилноста на ОИЕ и ценовните сигнали на пазарот. Поради тоа, интеграцијата на ЕВ и тарифните системи мора да се моделираат прецизно и прилагодено на локалниот контекст. Иако ЗОИЕ се релативно нов концепт, литературата укажува на недоволно обработена интеракција меѓу ЗОИЕ, интеграцијата на ЕВ, тарифните системи и мрежните влијанија [9], [10], [11], [12].

Во тој контекст, оваа дисертација развива сеопфатна рамка за анализа на влијанието на интеграцијата на ЕВ и тарифните системи врз техничката, економската и оперативната ефикасност на ЗОИЕ, со цел нивно применливо и одржливо функционирање и подобро усогласување со работата на ДМ.

1.1. Преглед на литература

Енергетски заедници се правни и социјални структури кои овозможуваат реализација на здружени енергетски проекти. Тие им овозможуваат на групи од граѓани, мали бизниси и јавни институции колективно да произведуваат, споделуваат и користат обновлива енергија. Интересот за енергетски заедници значително се зголеми откако Европската Унија (ЕУ) воспостави дефиниции за категории на енергетски заедници во рамки на законскиот пакет „Чиста енергија за сите Европејци“¹ на Европската Унија [13]. Преку Директивата 2018/2001/ЕУ за промоција на користењето на енергија од обновливи извори [14], таа го дефинираше терминот „заедници на обновливи извори на енергија“. Овие заедници имаат за цел, преку заедничко користење и управување со ОИЕ, да ја подобрат одржливоста, да ги намалат трошоците и да им овозможат на своите членови да учествуваат во енергетската транзиција. Според директивата, ЗОИЕ се средство за постигнување на еколошки, социјални, здравствени и економски предности во регионот каде што се основаат. Како такви, тие дејствуваат како катализатори за намалување на јаглеродните емисии во енергетскиот сектор, особено на оние кои потекнуваат од електричната енергија, и овозможуваат одржлив развој во урбаните средини.

Еден од главните механизми преку кој ЗОИЕ можат да ја постигнат својата цел е со т.н. споделување енергија². Основната цел на овој механизам е зголемување на сопствената потрошувачка, дефинирана како однос помеѓу директно потрошената и вкупно произведената електрична енергија од локалните дистрибуирани извори, најчесто фотоволтаични (ФВ) генератори. Зголемувањето на сопствената потрошувачка е од суштинско значење, бидејќи овозможува поефикасно искористување на локалното производство, намалување на размената на енергија со ДМ и, како последица, пониски трошоци за електрична енергија и помали оптоварувања на мрежната инфраструктура. Механизмот на споделување енергија кај ЗОИЕ потекнува од концептот на директно тргување со енергија³. Под концептот на директно тргување со енергија се подразбира дека еден потрошувач на електрична енергија, кој поседува дистрибуирана производна единица, има право директно да тргува со локално произведената енергија со друг потрошувач, преку дигитална платформа, по однапред утврден механизам. Теориските и практичните

¹ Терминот е превод на англискиот термин – Clean Energy for all Europeans

² Терминот е превод на англискиот термин – energy sharing

³ Терминот е превод на англискиот термин – peer-to-peer energy trading

аспекти на директното тргување со енергија се во длабока мера истражени и на оваа тема може да се најде обемна научна литература [15], [16], [17], [18], [19], како и голем број на пилот и активни комерцијални проекти [20]. Во контекстот на ЗОИЕ, покажано е дека споделувањето енергија значително може да ја зголеми енергетската независност. Така, во трудот [21], се покажува дека сопствената потрошувачка на електрична енергија добиена од фотоволтаичен генератор во една ЗОИЕ може да се зголеми од 26,5% до 65,2%, ако на членовите на заедницата им се овозможи меѓусебно да ја споделуваат енергијата. Дополнително, ова се поврзува и со намалување на трошоците за електрична енергија на годишно ниво до 15% и намалување на емисиите на јаглероден диоксид (CO₂) до 34%. Трудите [22] и [23] покажуваат слични резултати и ги поткрепуваат овие наоди. Со оглед на сеопфатните придобивки кои споделувањето енергија во рамките на ЗОИЕ ги овозможува за своите членови, животната средина и енергетскиот сектор како целина, важно е оваа практика да биде поддржана и од законска рамка што ќе го поттикне нејзиното усвојување.

Научната литература за споделување енергија првенствено се фокусира на два клучни аспекти од интерес: внатрешните правила за распределба на трошоците и придобивките во рамките на заедницата, и општата правна рамка. Првиот аспект е опширно истражен. Преглед на релевантни модели, концепти на решенија и алгоритамски техники за правилата според кои енергијата се споделува меѓу членовите на една заедница може да се најде во трудот [24]. Во трудот [25] авторите предлагаат три механизми за распределба на нето-добивката од споделувањето енергија меѓу членовите на една ЗОИЕ. Трудот [26] предлага модел за споделување енергија со теорија на игри, тестиран во енергетска заедница во Сиднеј. Слично на тоа, во трудот [27] е предложен пристап кон моделирање на споделување енергија заснован на генетски алгоритми. Авторите на трудот [28] предлагаат оптимизациски модел заснован на ADMM–метод на множители со наизменични насоки⁴ за оптимално тргување со енергија во енергетските заедници, земајќи ги предвид пазарот на електрична енергија ден-однапред, договорите за директно тргување со електрична енергија и електричната мрежа. Хибридна стратегија за споделување енергија меѓу потрошувачите, земајќи ги предвид трошоците и за електричната и за топлинската мрежа, е предложена во [29]. Во трудот [30] се користи пристап заснован на Шеплиева вредност за распределба на приходите меѓу членовите на заедницата во заедници кои вклучуваат топлински пумпи и систем за складирање топлинска енергија. Трудот [31] дава формулација на стохастички модел за споделување енергија со цел минимизација на вкупните трошоци на заедница со фотоволтаичен генератор и батериски системи за складирање енергија (БССЕ).

Вториот аспект, односно регулативите што ја воспоставуваат управувачката рамка, во поново време добиваат сè поголемо внимание во литературата. Истражувањата се насочени кон тоа како преку регулативата може да се поттикне споделувањето енергија во рамките на енергетските заедници. Различни механизми за поддршка, воспоставени со законските рамки, може да се најдат и во литературата и во активна употреба во неколку земји-членки на ЕУ. Овие механизми вклучуваат премии за сопствена потрошувачка на електрична енергија, намалени мрежни трошоци, ослободување од даноци или некоја комбинација од овие мерки. Разликите во постоечката регулатива за споделување на енергија во земјите од ЕУ се сеопфатно

⁴ Терминот е превод на англискиот термин – alternating direction method of multipliers (ADMM)

сумирани во трудовите [32] и [33]. Во трудот [34] се анализирани предизвиците и можностите наметнати од законските рамки за потрошувачите на обновлива енергија во 9 европски земји. Трудот [35] ги опишува и категоризира различните политики за агрегирање на потрошувачи и нивното влијание врз регулативите на глобално ниво.

За да се поттикне споделувањето енергија во Австрија, членовите на ЗОИЕ плаќаат намалени мрежни трошоци и се ослободени од данокот на некои од нив. Во Италија и Германија, споделувањето енергија е поттикнато со премии за сопствена потрошувачка и ослободување од данок за електричната енергија што е споделена меѓу членовите. Ваквите механизми за поддршка придонесоа за формирање голем број нови енергетски заедници во Италија во изминатите години. Во трудовите [36] и [37] се дефинирани оптимизациски модели за дизајн и управување со ЗОИЕ, според италијанската законодавна рамка. Германскиот Закон за поддршка на електрична енергија за станарите, користи слична рамка, со варијабилни стимули во зависност од капацитетот на локалниот систем за производство, првенствено со намера да ги мотивира сопствениците на згради да инсталираат локални системи за производство и да ја продаваат локално произведената електрична енергија, директно на своите закупци. Во трудот [38] е предложен оптимизациски модел за оваа рамка, и истиот е употребен за проценка на влијанието на различни технологии, како што се фотоволтаични системи, комбинирани генератори на топлинска и електрична енергија, батериски системи и електрични возила.

Споделувањето енергија може да се поттикне преку регулираните трошоци, кои имаат значаен удел во конечната цена на електрична енергија за потрошувачите. Регулираните трошоци вообичаено опфаќаат мрежни тарифи и различни јавни давачки и даноци. Извештајот на Германското здружение за енергетски и водни индустрии [39] открива дека дури 77% од вкупната цена по единица електрична енергија, купена во Германија на нисконапонско ниво, отпаѓа на даноци, мрежни трошоци и останати давачки. Влијанието на трошоците за ДМ се фокусира на трудот [8], кој разгледува четири модели на мрежни трошоци, што се применуваат во Германија и покажува дека мрежните тарифи со надомест за ангажирана моќност имаат значително поголем потенцијал за намалување на врвното оптоварување и повратните текови на моќност, во споредба со тарифите врз основа на количество преземена енергија. Слични наоди се презентирани и во трудот [6], за енергетска заедница во Данска. Во трудот [40] е истражено влијанието на структурата на мрежните трошоци врз директното тргување со енергија во Австрија, Норвешка и Ирска и е заклучено дека трите испитани законодавни рамки генерираат економски придобивки. Повеќе автори го имаат проучено влијанието на цената на електричната енергија и нејзините компоненти, врз економските придобивки, на енергетските компании [41] и на енергетските заедници [42], [43]. Трудот [44] нуди увид во позитивниот ефект од користењето на динамички тарифи за електрична енергија за флексибилни потрошувачи, но нивната анализа не опфаќа споделување енергија помеѓу потрошувачите.

Истражувањата нагласуваат дека тарифната и ценовната структура кои се воведуваат за енергетските заедници има одлучувачко влијание врз нивниот економски успех. Во трудот [23] е дадена широка анализа на ефектот од регулираните трошоци врз економските придобивки од споделувањето енергија во енергетските заедниците во 39 земји. Резултатите покажуваат дека тие во голема мера влијаат врз финансиските заштеди на една енергетска заедница, што упатува на

потребата од понатамошно истражување на влијанијата на моделирањето на тарифните системи. Доколку пазарот и моделирањето на тарифните системи не ги наградуваат флексибилноста и сопствената потрошувачка на една ЗОИЕ, нејзината економската исплатливост може значајно да се намали. Практично, една заедница, без стимулација да го прилагоди својот профил на оптоварување, едноставно ќе преземе многу повеќе енергија од снабдувачот, зголемувајќи ги своите трошоци и оптоварувајќи ја мрежата. Во трудот [6] се покажува дека ако заедниците преку соодветни тарифи не се поттикнати да го намалат количеството енергија кое го преземаат од мрежата, тие може да предизвикаат нејзино дополнително оптоварување, истовремено намалувајќи ја сопствената потрошувачка, а со тоа и намалување на сопствените финансиски заштеди. Овие наоди укажуваат дека тарифните механизми за поддршка на сопствената потрошувачка често се одлучувачки фактор за тоа дали една заедница е финансиски одржлива. Затоа, потребно е креаторите на политики да ги усогласат тарифните системи со моделите на ЗОИЕ. Во студијата на случај презентирани во истиот труд, покажано е дека со реструктурирање на даноците и моделот на пресметка на мрежните трошоци, односно со воведување на трошоци врз основа на врвно оптоварување и временски варијабилни цени, заедницата е поттикната подобро да ја распредели својата потрошувачка во текот на денот и да искористи повеќе од сопствената произведена енергија. Овој практичен доказ сугерира дека регулаторните тела можат значително да ги подобрат техничките и економските индикатори на ЗОИЕ со усвојување тарифни системи кои наградуваат однесување кое е повољно за мрежата. Пример за ова се тарифи според време на користење, трошоци за врвно оптоварување или други ценовни сигнали што ќе ги поттикнат ЗОИЕ да ја користат енергијата во услови на зголемено производство од обновливите извори, односно да ја намалат употребата на енергија за време на врвните оптоварувања на мрежата.

И покрај големиот број трудови за ЗОИЕ објавени во последните години, влијанието на овие заедници врз ДМ сè уште е недоволно истражено во научната литература. Авторите на трудот [45], заклучуваат дека, доколку не се планираат и управуваат соодветно, ЗОИЕ можат да предизвикаат зголемени загуби и оптоварувања, како и влошен напонски профил во ДМ. Актуелната литература, исто така, не содржи истражувања за влијанијата на различните тарифни системи за ЗОИЕ врз ДМ. Ова тврдење е поткрепено со наодите презентирани во трудот [46], кои ја истакнуваат празнината во литературата поврзана со евалуација на потенцијалните придобивки и проблеми за ДМ, кои можат да се јават заради мрежните тарифи кои не ги земаат предвид промените предизвикани од работата на енергетските заедници. Трудот [8] се осврнува на темата, но неговиот домен е ограничен исклучиво на анализата на намалувањето на врвните оптоварувања.

Со подемот на ЕВ во последните години, нивната интеграција во локалните електроенергетски системи носи и можности и предизвици за ЗОИЕ. Полнењето на ЕВ може значително да ја зголеми локалната побарувачка за електрична енергија. Сепак, ЕВ исто така можат да делуваат како флексибилни потрошувачи и дистрибуирани складишта на енергија преку технологии за двонасочно полнење (возило до мрежа – V2G⁵), со што ја поддржуваат заедницата и мрежата. Неконтролираното полнење на голем број ЕВ во една заедница може да ја оптовари ДМ. Прегледниот труд [47] потенцира дека за да се овозможи високо ниво на

⁵ Кратенката V2G доаѓа од англискиот термин – vehicle to grid (V2G)

застапеност на ЕВ, потребни се значителни инвестиции за надградба и зајакнување на мрежата. Без соодветна стратегија за паметно полнење, врвните оптоварувања од истовремено полнење на ЕВ би можеле да го надминат капацитетот на мрежата, особено во периодите на висока побарувачка на електрична енергија. Последните истражувања покажуваат дека интегрирањето на ЕВ во ЗОИЕ може да ја зголеми енергетската флексибилност на заедницата и да ги намали трошоците за енергија за членовите [3], [48]. Овие наоди ја нагласуваат важноста на ЕВ, како мобилни складишта, во ЗОИЕ и потенцијалот нивното паметно полнење да ја зголеми флексибилноста на мрежата и финансиските придобивки за учесниците.

Студиите покажуваат дека синхронизацијата на полнењето на ЕВ, со локалното производство на електрична енергија од ОИЕ, може значително да ја зголеми сопствената потрошувачка и да ги намали и распредели врвните оптоварувања, особено кога заедниците вклучуваат различни профили на оптоварување, односно се состојат од резиденцијални и комерцијални потрошувачи [49]. Развиени се оптимизациски модели за управување на полнењето кај т.н. агрегатори на ЕВ во склад со потребите на мрежата. Во трудот [50] е нагласена улогата на ЕВ во подобрувањето на енергетската стабилност, на ниво на заедницата.

Овие перспективи можат да се претворат во мерливи економски и оперативни придобивки за ЗОИЕ. Со примена на V2G технологиите, ЕВ во заедницата можат да обезбедат услуги за флексибилност, како што се регулација на напонот и фреквенцијата, намалување на врвните оптоварувања и балансирање на варијабилноста на обновливите извори на енергија [51]. Ваквите услуги не само што ги подобруваат стабилноста на локалната мрежа и искористувањето на обновливата енергија, туку овозможуваат и дополнителни приходи за заедницата и нејзините членови преку учество на пазарите за помошни услуги. Ова го истакнува силниот потенцијал за стабилност и економска одржливост на ЗОИЕ, кога интеграцијата на ЕВ во заедницата е комбинирана со обновливи извори на енергија.

Сепак, во трудовите [49], [50] и [51] се нагласува дека остануваат повеќе предизвици поврзани со интеграцијата на ЕВ во рамките на ЗОИЕ. Техничките ограничувања, како што се ограничениот капацитет на локалната мрежа и недоволно развиената инфраструктура за полнење, сè уште претставуваат потешкотии за засилено учество на ЕВ во заедниците. Дополнително, постојат правни и пазарни пречки кои произлегуваат од неконзистентните и инертни законски рамки. Ова, заедно со техничките аспекти кои остануваат недорешени (пр. интероперабилност на различни системи на производители на ЕВ), го попречува прифаќањето на V2G технологиите. Евидентни се и проблемите на општественото прифаќање на овие технологии. Голем број потенцијални корисници сè уште се скептични заради високите цени на ЕВ, ограничениот опсег на движење и деградацијата на батериите од двонасочното полнење. Ова ја нагласува потребата од дополнителни механизми за поддршка на широкото прифаќање на ЕВ и поврзаните технологии. Тековните истражувања и пилот-проекти продолжуваат да ги решаваат наведените предизвици, но потребни се понатамошни иновации и координација за целосно да се искористи потенцијалот за флексибилност на ЕВ во ЗОИЕ.

Накратко, во научната литература поврзана со заедници на обновливи извори на енергија и интеграција на електрични возила досега се прикажани следните заклучоци:

- Доказано е дека ЗОИЕ можат да ја зголемат локалната искористеност на електрична енергија од обновливи извори и да ги намалат трошоците, преку соработка меѓу членовите со споделување на произведената енергија, оптимизирање на потрошувачката и координирано користење на заедничката инфраструктура [21-23];
- Развиени се напредни методи за оптимизација и управување со ресурсите на заедницата, вклучувајќи ги и ЕВ [25-31];
- Показано е дека интеграцијата на ЕВ во ЗОИЕ може да ја зголеми флексибилноста на заедницата и да ги намали трошоците за енергија, особено кога се користат механизми за паметно полнење на ниво на заедницата [3-5], [47-51];
- Претходни студии укажуваат дека тарифните системи можат да имаат значително влијание врз економската исплатливост на ЗОИЕ, особено ако се моделирани да го поттикнат учеството и да ги намалат трошоците за членовите, но нивните специфични ефекти сè уште не се целосно истражени. [32-44];
- Показано е дека под соодветни технички, економски и регулаторни услови, ЗОИЕ можат позитивно да придонесат кон подобрување на работата на ДМ, што опфаќа распределба на моќност и оптоварување на мрежата, загуби и напонски прилики. Ова е тесно поврзано со изборот на правилен тарифен систем. Меѓутоа, поради комплексноста на системите, не постои универзално решение, па потребни се дополнителни истражувања во оваа област [45-46].

Во изминатите години, ЗОИЕ го развија својот теоретски потенцијал до ниво на имплементација на пилот-проекти низ повеќе европски земји. Во овој период се идентификувани нови предизвици, како што се потребата од ефикасни тарифни системи, активното учество на членовите и подобро разбирање на влијанието на ЗОИЕ врз работата на мрежата. Досегашните достигнувања ја поставуваат основата за ова истражување, кое има за цел да се справи со некои од отворените празнини и проблеми идентификувани во неодамнешните студии.

1.2. Истражувачки проблем

И покрај значајниот напредок во областа на заедниците на обновливи извори на енергија, интеграцијата на ЕВ и моделирањето на тарифните системи, остануваат неколку клучни нерешени предизвици. Еден од главните предизвици е ограниченото разбирање на влијанието на тарифните системи врз функционирањето на ЗОИЕ. Иако е познато дека динамичките тарифи и трошоците за врвно оптоварување влијаат врз однесувањето на заедницата, постои ограничен квантитативен увид во нивните специфични ефекти. Целта на ова истражување е да идентификува кои тарифни модели најдобро поттикнуваат подобра распределба на оптоварувањето и споделување на енергијата, како и да ги процени компромисите што ги носат. Оперативната сложеност и ограничувањата на мрежата претставуваат значајни предизвици за заедниците и операторите на ДМ, поврзани со координацијата на производството и потрошувачката, полнењето на ЕВ и со справување со физичките ограничувања на електричната мрежа. Некоординираното полнење на ЕВ може да ја оптовари и да предизвика проблеми за ДМ. Истражувањето има за цел да ги испита влијанијата на работата на ЗОИЕ врз ДМ, користејќи анализа на текови на моќност.

Дополнително, недостатокот на механизми за поддршка на внатрешно споделување на енергија ги намалува економските придобивки од соработката во рамките на заедниците. Ќе бидат истражени регулаторни и тарифни модели кои би можеле да ги подобрат придобивките од споделувањето енергија, обезбедувајќи преглед за креаторите на политики на тоа како да поттикнат поголема сопствена потрошувачка и намалени врвни оптоварувања.

Друг предизвик е недоволната искористеност на флексибилноста на ЕВ во периодите кога таа е најпотребна, како што се периодите на високо производство на електрична енергија од фотоволтаични централи. Во оваа докторска дисертација се предлага модел за интегрирање на ЕВ чии сопственици се надворешни учесници во заедницата. Целта е да се одговорот прашања поврзани со техничката изводливост, оптималното распоредување на полнењето и праведноста во распределбата на трошоците и придобивките помеѓу внатрешните и надворешните учесници. Обезбедувањето на придобивки за внатрешните и за надворешните учесници, без притоа да се наруши стабилноста на системот, претставува значаен предизвик во областа на истражувањето.

Ова истражување се занимава со меѓусебно поврзани проблеми кои се клучни за скалабилно и општествено прифатливо формирање и работење на заедниците на обновливи извори на енергија. Со истражување на влијанијата на тарифите, флексибилноста на ЕВ, механизмите за поддршка на споделување енергија, мрежните интеракции и праведноста во оптимизацијата, целта на истражувањето е да придонесе кон поотпорни, поефикасни и поправични енергетски заедници. Тоа треба да помогне ЗОИЕ да преминат од сегашните достигнувања кон улога на трансформативен елемент и пионер во енергетската транзиција.

1.3. Предмет на истражувањето

Предмет на ова истражување е пресекот меѓу паметното управување со заедниците на обновливи извори на енергија и интеграцијата на ЕВ, особено во контекст на различни тарифни системи и социјални аспекти.

Истражувањето се фокусира на ЗОИЕ составени од членови кои поседуваат дистрибуирани енергетски ресурси како што се фотоволтаични производни единици, ЕВ, батериски системи за складирање енергија, топлински пумпи и системи за складирање топлинска енергија. Целта е да се развие и тестира оптимизациски модел кој ги координира тековите на електрична и топлинска енергија во заедницата, при што се зема предвид флексибилноста на полнењето на ЕВ и влијанието на различните тарифни модели. Клучните компоненти на ова истражување вклучуваат:

- Моделирање на внатрешните текови на енергија во ЗОИЕ под различни конфигурации на дистрибуираните енергетски ресурси и нивната флексибилност, вклучувајќи сценарија со и без ЕВ, батериски системи или комбинација од овие технологии.
- Истражување на влијанијата на различните тарифни системи (фиксни и динамички тарифи, тарифи според време на користење, трошоци за врвно оптоварување, намалени мрежни трошоци и премии за сопствена потрошувачка) врз сопствената потрошувачка и економските перформанси на ЗОИЕ, како и влијанијата врз мрежата.

- Испитување на техничкото влијание на споделувањето на енергија и полнењето на ЕВ врз параметрите на ДМ, вклучувајќи ги загубите на енергија, врвните оптоварувања и напонскиот профил.
- Истражување на потенцијалот на ЕВ не само како потрошувачи, туку и како флексибилни ресурси што ја поддржуваат работата на ЗОИЕ и стабилноста на мрежата.

Ова истражување цели да ги обедини областите на оптимизација на електроенергетските системи, тарифните модели и одржливата мобилност, придонесувајќи кон пошироките цели на декарбонизација, модернизација на мрежата и демократизација на енергијата.

1.4. Цели и задачи на истражувањето

Главната цел на ова истражување е да се испитаат техничките и економските перформанси на ЗОИЕ преку развој и примена на оптимизациски модел за нивно управување, кој го искористува потенцијалот на флексибилноста на ЕВ, при различни тарифни системи. Истражувањето има за цел да обезбеди сеопфатна рамка за проценка на тоа како ЗОИЕ можат да ја зголемат и промовираат локалната потрошувачка на енергија од обновливи извори и да имаат позитивно влијание врз ДМ. Дополнително, ќе се анализираат начини на кои тие можат да овозможат исплатливо учество за сопствениците на ЕВ во рамки на ЗОИЕ, како и за надворешни сопственици на ЕВ. За да се постигне ова, истражувањето стреми да ги постигне следните специфични цели:

- Преглед на научната литература и законодавната рамка поврзана со ЗОИЕ, механизмите за споделување на енергија, интеграцијата на ЕВ и тарифните системи за електрична енергија.
- Развој на оптимизациски модел заснован на мешано-целобројно линеарно програмирање⁶ (МЦЛП) на обновлива енергетска заедница што вклучува локално производство, складирање и споделување на електрична и топлинска енергија и флексибилно полнење на ЕВ.
- Моделирање на различни тарифни системи, вклучувајќи фиксни и динамички тарифи, тарифи според време на користење, трошоци за врвно оптоварување и намалување на мрежните трошоци, и проценка на нивното влијание врз работењето и споделувањето енергија во рамките на ЗОИЕ.
- Развој и примена на ограничувања за разрешување на изедначени решенија при полнењето на ЕВ во оптимизацискиот модел. Овие ограничувања ќе бидат воведени во облик на регуларизација на целната функција на оптимизацискиот модел. Нивната цел е да обезбедат избор на оптимални стратегии за полнење во случаи кога повеќе алтернативи даваат ист или сличен трошок. Со тоа се постигнуваат дополнителни технички придобивки како измазнување на кривата на полнење, избегнување на врвни оптоварувања и минимизирање на честото вклучување и исклучување на станиците за полнење на ЕВ, со цел

⁶ Превод на англискиот термин – mixed-integer linear programming (MILP)

продолжување на нивниот работен век и намалување на оперативните загуби.

- Квантификација на техничките ефекти од споделувањето на енергијата и стратегиите за полнење на ЕВ врз ДМ, вклучувајќи ги загубите на енергија, намалувањето на врвните оптоварувања и подобрување на напонскиот профил.
- Проценка на економските и техничките придобивки од стратегија на овозможување надворешни сопственици на ЕВ, кои не се членови на заедницата, да ја користат инфраструктурата за полнење на ЕВ за време на периоди на вишок производство на обновлива енергија.
- Статистичка анализа на влијанието на бројот на ЕВ и на моќноста на станиците за полнење врз сопствената потрошувачка, врвното оптоварување и финансиските заштеди на ЗОИЕ.

1.5. Хипотези

Истражувањето ќе биде спроведено со цел да се докаже важноста на следните хипотези:

Хипотеза 1: Тарифните ценовни сигнали значително влијаат врз начинот на користење на распределените енергетски ресурси во ЗОИЕ, при што различните тарифни структури доведуваат до различни нивоа на оптоварување на мрежата и временска усогласеност на побарувачката со локалното производство.

Хипотеза 2: Тарифните системи што поддржуваат споделување енергија во ЗОИЕ со интегрирани електрични возила овозможуваат намалување на врвните оптоварувања и мрежните загуби, без негативно влијание врз економската исплатливост на заедницата.

Хипотеза 3: Вклучувањето на надворешни корисници во работењето на ЗОИЕ, ја зголемува искористеноста на локално произведената енергија и создава нето економски и енергетски придобивки.

1.6. Методологија на истражувачката работа

Научните методи кои се применети во ова истражување се засноваат на комбинација од оптимизациско моделирање, статистичка анализа и техники на симулација поткрепени со реални податоци. Во студијата се употребени неколку научни методи за развој, валидација и анализа на предложените модели и хипотези.

Клучен елемент на истражувањето е развојот на МЦЛП оптимизациски модел за моделирање на работењето на заедниците на обновливи извори на енергија во различни конфигурации. Моделот вклучува локална потрошувачка и производство на енергија, првенствено од фотоволтаични производни единици, батериски системи за складирање енергија, паметно полнење на ЕВ, топлински пумпи, систем за складирање топлинска енергија, и овозможува споделување енергија меѓу членовите на заедницата, при различни тарифни системи. Целната функција на моделот ги минимизира вкупните трошоци за енергија во заедницата, земајќи ги предвид техничките ограничувања, временски зависните текови на енергија и применетиот тарифен систем. Моделот е имплементиран во програмскиот јазик Python, користејќи ја библиотеката за оптимизација Pyomo.

За да се оцени робусноста и генерализацијата на предложените стратегии, разгледани се различни сценарија кои опфаќаат различни тарифни модели (рамни, динамички, тарифи според време на користење и трошоци за врвно оптоварување), различни конфигурации на ЗОИЕ (сценарија со или без надворешни ЕВ и различни нивоа на пенетрација на дистрибуирани енергетски ресурси) и сезонски промени во оптоварувањето и производството на фотоволтаичните централи.

Исто така, анализирани се техничките влијанија од споделувањето енергија и полнењето на ЕВ врз ДМ преку анализа на текови на моќност. Индикаторите, како што се загубите на енергија во мрежата, напонските профили, врвното оптоварување и повратните текови на моќност, се анализирани преку симулации. Резултатите од оптимизацискиот модел, применет на нисконапонска ДМ со интегрирана ЗОИЕ, особено нето-размените на енергија на секој јазол, се користат како влезни податоци во моделот на мрежата за да се оцени нејзината ефикасност под различни сценарија.

Извршена е статистичка анализа за да се процени влијанието на нивото на застапеност на ЕВ и капацитетот на станиците за полнење, врз клучните технички индикатори за работата на ЗОИЕ, поточно стапките на сопствена потрошувачка и енергетска независност. Употребени се техники на линеарна регресија за да се идентификуваат и квантифицираат врските помеѓу овие фактори и перформансите на ЗОИЕ.

Во истражувањето се употребени реални мерни податоци за да се обезбеди точноста, релевантноста и применливоста на предложениот модел. Вклучувајќи реални профили на потрошувачка, производство и тарифни системи, анализата ги одразува реалните услови за работа на ЗОИЕ.

1.7. Структура

Оваа дисертација е организирана во шест глави:

- **Глава 1:** Во првата глава се претставени воведот и целите на истражувањето, како и научната мотивација за развој на модел за интеграција на ЕВ во рамките на ЗОИЕ. Тука се опфатени и истражувачките хипотези, придонесите и структурата на дисертацијата.
- **Глава 2:** Втората глава дава теоретски и концептуален преглед на темите кои се обработени во оваа дисертација. Разгледани се заедниците на обновливи извори на енергија, нивниот развој во рамките на Европската Унија и улогата на ЕВ во зголемување на флексибилноста и самодоволноста на овие системи. Во оваа глава се анализирани и различните тарифни системи и регулираните трошоци, како и механизмите за поддршка на споделувањето енергија во рамки на ЗОИЕ. Разгледани се законодавните и пазарните рамки во ЕУ, со цел да се дефинираат параметрите што се земаат предвид во оптимизацискиот модел. Потоа претставени се и влијанијата на ЗОИЕ и ЕВ врз ДМ.
- **Глава 3:** Третата глава го презентира развиениот МЦЛП оптимизациски модел, кој ја опишува работата на ЗОИЕ како мултиенергетски систем што вклучува производители-потрошувачи, ЕВ, батериски системи и топлински пумпи. Прикажани се ограничувањата, целната функција, тарифните компоненти, како и нумеричките индикатори за оценување на успешноста на заедницата. Претставени се и регуларизациски компоненти

кои се воведени во целната функција на оптимизацискиот модел со цел добивање на поконзистентни и пореалистични профили на полнење на ЕВ.

- **Глава 4:** Четвртата глава ги презентира резултатите од студија на сценарија која го анализира влијанието на различни тарифни системи врз работењето на ЗОИЕ и врз параметрите на ДМ. Анализата опфаќа осум тарифни сценарија и ги прикажува влијанијата од споделувањето енергија врз индикаторите на ЗОИЕ, како и загубите во мрежата и стабилноста на напонот.
- **Глава 5:** Во петтата глава се претставени две истражувања кои анализираат можности за интеграција на ЕВ во ЗОИЕ. Првото истражување е студија на случај, која ја анализира можноста за вклучување на сопственици на ЕВ како надворешни учесници во резиденцијални ЗОИЕ со цел зголемување на сопствената потрошувачка во периоди на високо производство на електрична енергија од ОИЕ. Второто истражување е статистичка анализа на влијанието на бројот на ЕВ и моќноста на полначите врз енергетските индикатори и врвната ангажирана моќност на ЗОИЕ.
- **Глава 6:** Во шестата глава е даден заклучокот, кој ги сумира главните резултати и научни придонеси на дисертацијата и предлага идни насоки на истражување во областа на оптимизацијата на ЗОИЕ и интеграцијата на ЕВ.

ГЛАВА 2. ЗОИЕ, ТАРИФНИ СИСТЕМИ И ВЛИЈАНИЈА ВРЗ ДИСТРИБУТИВНАТА МРЕЖА

2.1. Заедници на обновливи извори на енергија

Заедниците на обновливи извори на енергија претставуваат колективни енергетски иницијативи управувани од граѓаните, во кои членовите на заедницата заеднички произведуваат, споделуваат и користат енергија од обновливи извори со цел остварување придобивки за заедницата. Овие заедници се насочени кон одржлива енергетска транзиција и унапредување на благосостојбата на граѓаните, нудејќи им на своите членови директни придобивки преку зголемена енергетска ефикасност, финансиски заштеди и демократско учество во енергетскиот систем.

Во својата суштина, ЗОИЕ ја претставуваат „енергетската демократија“ на дело: граѓаните, малите бизниси и локалните институции се здружуваат и стануваат производители-потрошувачи, кои настапуваат заеднички за остварување на целите на групата, преземајќи активна улога во енергетските процеси наместо да бидат пасивни корисници.

Концептот на енергетски заедници добива значителна важност во последнава деценија како клучен дел од напорите за децентрализација и декарбонизација на енергетските системи. Иако различни форми на граѓанско енергетско здружување постоеле и претходно, Европската Унија (ЕУ) за првпат формално го призна и дефинираше овој концепт со усвојувањето на пакетот „Чиста енергија за сите Европејци“ во 2019 година. Со овој пакет се воведени специфични законски дефиниции и законодавни рамки, нагласувајќи ја растечката улога на колективните проекти во процесот на енергетска транзиција.

2.1.1. Правен и регулаторен контекст на ЗОИЕ во ЕУ

Правната рамка на ЕУ Концептот на енергетски заедници е втемелен во законодавството на ЕУ преку две клучни директиви од пакетот „Чиста енергија за сите Европејци“:

1. Директива (ЕУ) 2018/2001 (RED II): Го дефинира терминот „Заедница на обновливи извори на енергија“⁷ [14].
2. Директива (ЕУ) 2019/944 (IEMD): Го дефинира терминот „Граѓанска енергетска заедница“⁸ [52].

Иако слични, овие два ентитета имаат различни карактеристики. Првиот е ограничен исклучиво на обновливи извори на енергија, додека вториот опфаќа поширок опсег на електроенергетски активности. Заедничко за двата модела е потенцирањето на нивната улога како нови, непрофитни учесници на енергетскиот пазар, управувани од граѓани, локални субјекти и мали компании, со примарна цел остварување локални придобивки наместо профит.

⁷ Терминот е превод на англискиот термин – Renewable energy community (REC)

⁸ Терминот е превод на англискиот термин – Citizen energy community (CEC)

2.1.1.1. Дефиниција според RED II (Заедници на ЗОИЕ)

Според член 2(16) од Директивата (ЕУ) 2018/2001, „заедница на обновливи извори на енергија“ е правно лице засновано на отворено и доброволно учество, кое е автономно и под ефективна контрола на членови или акционери лоцирани во близина на проектите за обновлива енергија.

- Членство: Физички лица, мали или средни претпријатија (МСП) и локални власти (вклучително општини). Учесството на приватни компании е дозволено само доколку енергетиката не е нивна примарна стопанска дејност.
- Цел: Обезбедување еколошки, економски или социјални придобивки за членовите или локалната заедница, а не остварување финансиски профит. Ова јасно ги разликува ЗОИЕ од традиционалните енергетски компании.

2.1.1.2. Дефиниција според Директива 2019/944 (Граѓански енергетски заедници)

Дефиницијата за „граѓанска енергетска заедница“ (ГЕЗ) е слична во духот, но со неколку клучни разлики:

- Технолошка неутралност: ГЕЗ немаат ограничување на видот на технологија (не мора да бидат само обновливи), но се ограничени исклучиво на секторот електрична енергија (производство, дистрибуција, снабдување, агрегирање, полнење ЕВ).
- Географска флексибилност: За разлика од ЗОИЕ каде што близината е клучна, ГЕЗ немаат формално ограничување членовите да бидат од иста географска околина.

Европските директиви наложуваат државите-членки да воспостават поволна национална рамка за развој на енергетски заедници. Ова вклучува олеснување на административните постапки, обезбедување недискриминаторен пристап до мрежата и овозможување учество во мерки за поддршка. Законодавецот инсистира на балансиран пристап: заедниците мора да ги исполнуваат своите обврски (како балансирање), но без да бидат неоправдано оптоварени.

Во македонското законодавство, концептот на ЗОИЕ за првпат е системски уреден во Предлог-законот за користење на енергијата од обновливи извори, каде што тие се дефинираат како правни лица основани согласно Законот за задругите, на доброволна основа и со отворено членство [53]. Според Предлог-законот, ЗОИЕ мора да бидат самостојно и заеднички контролирани од своите основачи и/или членови кои имаат живеалиште, престојувалиште или седиште во географска близина на проектот, со цел да се обезбеди реална територијална поврзаност. Законот јасно пропишува дека членови можат да бидат физички лица, микро, мали или средни трговски субјекти и единици на локална самоуправа, а примарната цел на заедницата мора да биде создавање еколошки, економски или социјални придобивки, а не профит. Законот ги уредува правата на ЗОИЕ, вклучително производството, трошењето, складирањето и продажбата на енергија од обновливи извори, распределбата на произведената енергија меѓу членовите и пристапот до енергетските пазари. Со ова се транспонирани одредбите на директивата RED II и е обезбедена формална правна рамка за основање и функционирање на ЗОИЕ во Република Северна Македонија.

2.1.2. Структурни карактеристики на ЗОИЕ

2.1.2.1. Основни типологии на ЗОИЕ

Во практиката, ЗОИЕ се појавуваат во неколку основни форми, во зависност од нивната структура и цел:

- Производствено ориентирани заедници: Фокусирани првенствено на заедничко производство. Најчесто се организирани во форма на задруги, каде што членовите инвестираат и добиваат удел во приходите. Во Германија, на пример, голем дел од ЗОИЕ се организирани како друштва кои управуваат со електрани и ја продаваат произведената енергија на пазарот.
- Потрошувачки ориентирани заедници: Фокусот е на заедничка набавка или користење на енергија за намалување на трошоците. Пример е концептот на колективна сопствена потрошувачка во станбени згради (Франција, Австрија), каде станарите споделуваат енергија од заеднички покривен ФВ систем.
- Мешани заедници (производители-потрошувачи): Најчестиот модел каде што членовите заеднички произведуваат и користат енергија. Заедницата инсталира сопствени производствени капацитети за потребите на членовите, а вишокот го предава во мрежата. Овој модел е силно поддржан од регулативата на ЕУ, овозможувајќи им на членовите да дејствуваат како активни производители-потрошувачи.
- Виртуелни енергетски заедници: Со развојот на паметните мрежи, се појавува концептот каде што членовите не мора да бидат физички поврзани на иста микро-мрежа. Споделувањето се одвива виртуелно преку ДМ, со помош на дигитални платформи за сметководство и алокација на енергијата. Ова овозможува скалабилност и поврзување на членови кои се наоѓаат на различни локации.

2.1.2.2. Учесници и модели на управување

Членови во ЗОИЕ вообичаено се граѓани, локални МСП и субјекти од локалните власти, при што учеството на големи енергетски компании е ограничено со цел да се обезбеди локално управување и недоминантност на ентитети со примарна енергетска дејност. Ова ја гарантира граѓанската природа на заедницата и го зајакнува институционалниот легитимитет. Пристапувањето во ЗОИЕ е недискриминаторно и условено со територијална поврзаност. Членството е доброволно, а регулативата обезбедува дека истапувањето од ЗОИЕ не влијае врз пристапот до основните енергетски услуги надвор од заедницата.

ЗОИЕ можат да бидат организирани како здруженија, задруги или други правни субјекти со ограничен или непрофитен карактер, под услов ефективната контрола да ја задржат дозволените категории членови (граѓани, МСП и локални власти). Управувањето најчесто се врши преку избрани органи (пр. управни одбори или совети), по принципот „еден член – еден глас“ и со високо ниво на транспарентност во донесувањето одлуки.

Иако ЗОИЕ не се формираат со примарна цел максимизација на профитот, тие можат да остваруваат економски придобивки за своите членови, кои се важни како

мотивација за учество и како предуслов за долгорочна одржливост на заедницата. Ваквиот модел на управување обезбедува усогласеност со основните цели на ЗОИЕ, како што се локалната автономија, демократското учество и создавањето на пошироки општествени, економски и еколошки придобивки, наместо исклучиво финансиски поврат.

2.1.2.3. Придобивки од ЗОИЕ

ЗОИЕ се сметаат како клучен инструмент за праведна и одржлива енергетска транзиција, бидејќи нудат широк спектар на енергетски, општествени и економски придобивки:

- Енергетска демократизација и учество на граѓаните: ЗОИЕ ја пренесуваат контролата врз производството, потрошувачката и управувањето со енергијата од големите компании кон самите граѓани. Преку директно вклучување во проекти за обновлива енергија, членовите на заедницата стекнуваат поголема контрола врз сопственото снабдување со енергија, што го зголемува прифаќањето на обновливите технологии. ЗОИЕ овозможуваат вклучување и на маргинализираните групи, со што придонесуваат и кон енергетска праведност.
- Локално производство и енергетска автономија: Локалното производство и потрошувачка на електрична енергија ги намалуваат загубите во преносот, го растоваруваат дистрибутивниот систем и можат да спречат појава на локални загушувања во мрежата. Истовремено, присуството на распределени обновливи извори и можноста за складирање енергија ја зголемуваат енергетската сигурност и отпорност на системот, особено при екстремни услови или прекини во снабдувањето. Дополнително, ваквото локализирано производство создава директни економски придобивки: приходите и заштедите остануваат во заедницата, а инвестициите во обновливи извори и инфраструктура поттикнуваат развој на локални „зелени“ работни места и одржлив економски раст.
- Декарбонизација: ЗОИЕ директно ги намалуваат емисиите на стакленички гасови преку замена на фосилните горива. Дополнително, колективното учество ја зголемува свеста за енергетска ефикасност, што води до поодговорна потрошувачка и дополнително намалување на CO₂ емисиите.
- Социјални придобивки: ЗОИЕ можат да придонесат кон намалување на енергетската сиромаштија преку обезбедување поевтина енергија за ранливите категории. На пример, во енергетската заедница Сан Џовани во Неапол, 20 семејства со ниски приходи добиваат електрична енергија од заеднички ФВ систем по цена за 75% пониска од онаа на универзалниот снабдувач [54]. ЗОИЕ градат чувство на заедништво, ја поттикнуваат граѓанската ангажираност и служат како платформи за едукација и иновации на локално ниво.

2.1.3. Улогата на ЕВ во ЗОИЕ

Енергетската транзиција подразбира не само производство на електрична енергија од ОИЕ, туку и електрификација на други сектори, особено транспортот. Во овој контекст, ЕВ сè повеќе се разгледуваат како составен дел од ЗОИЕ, бидејќи претставуваат потенцијални мобилни складишта на енергија. Европската регулатива

го признава ова спојување на енергетскиот и транспортниот сектор: ГЕЗ и ЗОИЕ имаат право да се занимаваат и со услуги за полнење на електрични возила во рамките на своите активности [55]. Во пракса, интеграцијата на ЕВ во ЗОИЕ се одвива на два начина:

- како потрошувачи: членовите ги полнат своите возила со енергија од заедницата и
- како флексибилен ресурс: батериите на возилата учествуваат во управувањето со енергијата.

2.1.3.1. ЕВ како потрошувачи во заедницата

Брзиот раст на бројот на ЕВ ја зголемува побарувачката за електрична енергија и ја засилува потребата од нивно интелегентно управување. Во рамките на ЗОИЕ, полнењето на ЕВ може да се координира така што максимално ќе се искористи локално произведената енергија од ОИЕ. Преку паметно полнење, возилата можат да се полнат во периоди со вишок енергија од ОИЕ, наместо во време на врвно оптоварување или кога заедницата мора да презема електрична енергија од мрежата. Ова обезбедува двојна корист: пониски трошоци за членовите и намалено оптоварување на мрежата во критичните периоди. Дополнително, воведувањето механизми за поддршка или динамички цени, ги поттикнува членовите да го приспособат полнењето кон периодите на најголемо производство во рамки на ЗОИЕ. Интеграцијата на електромобилноста со локалните ОИЕ се смета за клучна мерка во европските стратегии за намалување на емисиите и подобрување на ефикасноста во урбаните средини [4].

2.1.3.2. ЕВ како складишни и флексибилни единици

Особено интересен аспект е можноста ЕВ да се користат како мобилни батериски системи кои не само што преземаат енергија, туку по потреба и ја враќаат назад во системот. Ова двонасочно полнење, уште познато како V2G, овозможува возилото да предава електрична енергија кон мрежата или кон домаќинството. Во рамките на ЗОИЕ овој концепт прераснува во V2C⁹ (возило до заедница), каде возилото комуницира со заедницата и станува дел од нејзиниот складишен капацитет.

Кога возилата на повеќе членови се приклучени на заедничката инфраструктура, нивните батерии создаваат децентрализиран агрегиран капацитет за складирање. Истражувањата покажуваат дека автомобилите се паркирани околу 95% од времето, што претставува значителен неискористен потенцијал [56]. Во овие периоди, автоматизиран систем може да одлучува кога батеријата ќе предава енергија, а кога да се полни. На тој начин ЕВ се трансформира од пасивно оптоварување во активен флексибилен ресурс, што го олеснува локалното балансирање на производство и потрошувачка.

Пилот-проекти во Европа веќе го демонстрираат ова. Во Обединетото Кралство е реализирана станбена заедница со централно паркиралиште и V2G полначи, каде сите возила придонесуваат за стабилизирање на локалната мрежа и снабдување на заедницата во вечерните часови. Резултатите укажуваат на

⁹ Кратенката V2C доаѓа од англискиот термин – vehicle to community (V2C)

значително намалување на врвното оптоварување, пониски сметки за електрична енергија и подобра искористеност на самите возила [57].

2.1.3.3. Придобивки и имплементации од интеграцијата на EV

Интеграцијата на EV во ЗОИЕ носи повеќе системски придобивки:

- се зголемува локалната употреба на ОИЕ: EV можат да се полнат во периоди на високо производство од ОИЕ, со што се подобрува сопствената потрошувачка и се намалува преземената електрична енергија од мрежата,
- EV придонесуваат за подобро управување со оптоварувањето: паметното полнење ги намалува врвните оптоварувања во критични часови и ја олеснува работата на ДМ,
- ЗОИЕ може да постави заеднички станици за полнење, напојувани од локални ОИЕ, што го зајакнува моделот на децентрализирано снабдување и обезбедува намалени трошоци за енергија на членовите,
- V2G/V2C полнењето нуди дополнителна флексибилност преку користење на батериите на возилата како мобилен складишен капацитет во периоди на недостиг или високо оптоварување. Ова претставува значаен потенцијал ЗОИЕ да ги балансираат локалните варијации во производство и потрошувачка.

Овие придобивки, сепак, бараат соодветна поддршка. Потребна е напредна инфраструктура, стандарди за комуникација и безбедност, како и регулаторни механизми што ќе овозможат возилата да предаваат енергија во мрежата. Дополнително, мора да се внимава на долгорочната состојба на батеријата, бидејќи прекумерната употреба за V2G може да ја забрза нејзината деградација. Сепак, постојат пилот-проекти кои покажуваат дека со оптимално управување е можно значително учество во V2G без негативни последици врз возилото [4].

Со интеграцијата на EV, ЗОИЕ стануваат посложени енергетски системи каде производството, потрошувачката и складирањето се динамично поврзани. Улогата на членовите се проширува, така што тие не се само производители-потрошувачи, туку и добавувачи на флексибилност и балансни услуги. Ова претставува предизвик за традиционалните модели на енергетско планирање, но воедно ја покажува иновативната природа на ЗОИЕ. EV и ЗОИЕ заеднички придонесуваат кон развој на интегриран, нискојаглероден и отпорен енергетски систем во кој граѓаните имаат активна и централна улога.

2.2. Тарифни системи и механизми за поддршка на споделувањето енергија во рамки на ЗОИЕ

Во продолжение се анализирани различните типови на тарифи за електрична енергија и економските инструменти кои се користат за поддршка на ЗОИЕ. Разгледани се различни тарифни системи, кои вклучуваат фиксни, варијабилни, тарифи според време на користење, динамички и тарифи базирани на моќност и нивното влијание врз однесувањето на потрошувачите и производителите-потрошувачи. Понатаму, се испитуваат регулираните трошоци, нивната структура, транспарентност и улога во распределбата на трошоците. Следно, се дискутираат економските механизми за поддршка на ЗОИЕ, како што се нето мерење,

компензациски шеми, повластени тарифи, фискални олеснувања и субвенции, како и институционалните и пазарните предизвици при дизајнирање на тарифи за ЗОИЕ. На крај, се анализира како овие механизми влијаат врз однесувањето на членовите на заедниците (на пр. во однос на сопствената потрошувачка, употребата на батерии и ЕВ). Ова е проследено со краток преглед на практиките во ЕУ, со фокус на: Германија, Австрија и Холандија и компаративна анализа на искуствата.

2.2.1. Типови на тарифни системи за продажба на електрична енергија

Постојат неколку основни типови на тарифни системи за продажба на електрична енергија кои се применуваат во секторот на електрична енергија. Разбирањето на овие тарифни модели е клучно за оцена на нивното влијание врз потрошувачите, производителите-потрошувачи и ЗОИЕ.

2.2.1.1. Фиксни тарифи (павшални наомесџоии)

Овој тип на тарифа подразбира фиксен износ што се плаќа за електричната енергија во определен временски период (пр. месечно), независно од количината на потрошена енергија. За разлика од вообичаените варијабилни тарифи изразени по единица потрошувачка (€/kWh), кај овој модел цената на енергијата е фиксна на периодична основа. Ваквите тарифи се ретки во современите електроенергетски системи и најчесто се применуваат во специфични комерцијални или пилот-шеми.

Ваквите тарифи обезбедуваат предвидливи трошоци за корисниците, но не создаваат ценовен сигнал за рационално користење на енергијата. Во контекст на ЗОИЕ, примената на фиксна цена на енергијата може да го обесхрабри зголемувањето на сопствената потрошувачка, бидејќи економската корист од локално произведената енергија не се рефлектира директно во сметката.

2.2.1.2. Варијабилни тарифи

Варијабилната компонента на тарифата зависи од количеството потрошена електрична енергија. Стандардните енергетски тарифи се изразени во единица цена по единица потрошена енергија (kWh) и можат да бидат рамни (константни) или да зависат од опсегот на потрошувачка (пр. блок-тарифи со една цена за првите 500 kWh потрошена енергија и повисока цена за енергијата потрошена над тоа). Кај класичните рамни тарифи, цената по kWh е иста независно од времето или обемот на користење. Овој модел е лесно разбирлив и неговата примена е едноставна, но тој не ги одразува динамичните трошоци во системот (пр. повисоки трошоци во периоди на високи оптоварувања) и не дава сигнал до потрошувачите да го прилагодуваат начинот на користење на електрична енергија.

2.2.1.3. Тарифи според време на користење

Тарифите според време на користење (ТоU тарифи)¹⁰ воведуваат временска диференцијација на цената на електричната енергија. Обично денот се дели на тарифни зони (ниска тарифа во периоди на пониско оптоварување и висока тарифа во периоди на повисоко оптоварување на мрежата). Целта е потрошувачите да се стимулираат да префрлат дел од потрошувачката во периоди кога побарувачката,

¹⁰ Кратенката ToU доаѓа од англискиот термин – Time of Use (ToU) tariffs

или цената на пазарот е пониска. На пример, ноќните часови или периодите со високо производство од ОИЕ може да имаат пониски цени за електрична енергија, а дневните часови – поскапа. Овој пристап е вообичаен метод за поттикнување на управување со потрошувачката. Истражувањата покажуваат дека ваквите тарифи можат да донесат заштеди за потрошувачите, но истовремено го намалуваат приходот на операторот на мрежата, што укажува на потребата од нивен внимателен дизајн за да се обезбеди финансиската одржливост на системот [58].

2.2.1.4. Динамички тарифи

Динамичките цени претставуваат понатамошна еволуција на ToU тарифите – цените се менуваат многу почесто (пр. на секој час) во согласност со цените на пазарот или состојбата на мрежата. Кај ваквите тарифи, крајните корисници можат да плаќаат цена директно врзана за цената на берзите на електричната енергија во даден час, или пак индексирани според некој индикатор (пр. емисии на CO₂, оптовареност на мрежата и сл.). Целта е пазарните сигнали да стигнат до потрошувачите: на пример, високи цени во периоди на намалено производство да ги поттикнат да ја намалат потрошувачката, додека ниските или негативните цени да поттикнат зголемена потрошувачка или складирање на енергијата.

Динамичките тарифи, особено кога се комбинирани со паметни броила и автоматизација, овозможуваат оптимално користење на енергијата од обновливи извори и поголема флексибилност на потрошувачката, но бараат технолошка подготвеност и свесност кај потрошувачите [59], [58]. Во некои земји од ЕУ (пр. Холандија) веќе постојат понуди за домаќинствата со динамична цена на електричната енергија на часовна основа, следејќи го трендот на либерализација и дигитализација на пазарот.

2.2.1.5. Тарифи базирани на моќност

Овој тип тарифи се заснова на максималната или договорената моќност на потрошувачот и може да се комбинира со пресметка на потрошената енергија. На пример, потрошувачот може да плати согласно неговата највисока измерена моќност во kW (врвна ангажирана моќност) во текот на месецот, или да избере претплатен пакет до одреден капацитет на дозволена моќност. Целта на тарифите базирани на моќност е да го намалат оптоварувањето на мрежата во периодите на врвно оптоварување, поттикнувајќи ги корисниците рамномерно да ја распределат нивната потрошувачка на енергија.

Еден можен пристап се тарифите базирани на претплата, каде потрошувачот се претплатува на одредена максимална моќност. Во случај оваа моќност да е надмината, потрошувачот е обврзан да плати пенали или повисока цена. Истражувањето [60] покажува дека со ваков пристап годишните трошоци за потрошувачите можат да останат речиси непроменети, а истовремено врвните оптоварувања на мрежата значително да се намалуваат. Трошоците за моќност исто така може да се сретнат во облик на двојна тарифа: фиксна ставка по kW договорена моќност и варијабилна по kWh потрошена енергија. Во контекст на енергетски заедници, тарифите за врвна ангажирана моќност можат да поттикнат подобра координација на потрошувачката и инвестирање во уреди за ограничување на моќност или складирање кои би ги намалиле врвните оптоварувања.

2.2.1.6. Влијание на тарифните системи врз однесувањето и мрежните ефекти кај ЗОИЕ

За ЗОИЕ, правилниот избор на тарифен систем или комбинација од тарифни елементи е клучен. На пример, воведувањето на тарифи поврзани со време или моќност во локалните пазари на енергија може значајно да влијае врз профилот на потрошувачка/производство на заедницата. Во [8] се анализирани четири различни дизајни на мрежни тарифи во локални енергетски пазари во Германија и покажано е дека тарифите кои вклучуваат компонента за ангажирана моќност имаат далеку поголем потенцијал за намалување на врвното оптоварување и повратните текови на моќност (за 30–64% намалување на врвните оптоварувања) во споредба со тарифите базирани исклучиво на енергија (8–49% намалување). Ова укажува дека овие тарифи стимулираат ефикасно користење на мрежата, бидејќи членовите на заедницата внимаваат да не ги надминат договорените врвови, за разлика од чисто енергетските тарифи кои не ги наградуваат доволно флексибилните уреди како ЕВ.

2.2.2. Регулирани трошоци за електричната енергија и влијанија врз ЗОИЕ

Крајната цена што ја плаќаат потрошувачите за електричната енергија се состои од два основни дела: цената на електричната енергија и регулираните трошоци поврзани со користењето на електроенергетската мрежа и јавните политики.

Цената на електричната енергија ја одразува вредноста на набавената енергија и може да биде регулирана (на пример во случај на снабдување од универзален снабдувач) или пазарна, формирана од снабдувачот врз основа на неговите трошоци за набавка и пазарните услови. Во даден пазарен модел, потрошувачите плаќаат или регулирана или пазарна цена за енергијата, но не и двете истовремено.

Покрај цената на енергијата, потрошувачите плаќаат и регулирани трошоци, кои се утврдуваат од регулаторните тела или со закон и вообичаено не зависат од пазарните ценовни сигнали. Регулираните трошоци најчесто опфаќаат:

- трошоци за пренос и дистрибуција, дефинирани преку тарифни системи одобрени од регулаторното тело, со цел покривање на трошоците за одржување и развој на мрежата;
- јавни давачки и надоместоци, како што се надоместоци за поддршка на обновливи извори на енергија или други енергетски политики;
- такси и акцизи, вклучително и еколошки давачки;
- данок на додадена вредност (ДДВ), кој се пресметува на збирот од сите претходни компоненти.

Во многу европски држави, уделот на регулираните трошоци во крајната цена е голем. На пример, во Германија, околу 77% од цената на електрична енергија што ја плаќаат домаќинствата се состои од мрежни трошоци, даноци и останати давачки, а само 23% е трошокот за самата енергија. Ова има значајни импликации врз механизмите за стимулирање на флексибилност. Ако доминантен дел од сметката е фиксна давачка по kWh, која не зависи од времето на користење, тогаш воведувањето на динамичка цена на енергијата има ограничен ефект врз сметката на потрошувачите. Со оглед на релативно ниската флексибилност на побарувачката кај домаќинствата, доколку 75% од цената е фиксирана и не се менува со времето, поттикот за промена на навиките е мал.

Транспарентноста на регулираните трошоци е важна за потрошувачите и за заедниците, бидејќи им овозможува да донесуваат информирани одлуки. На пример, исплатливоста на инвестицијата во ФВ панели зависи од тоа колкав дел од сметката за електрична енергија може да се намали. Затоа, регулаторите се стремат сметките за електрична енергија да бидат јасно разделени по компоненти. Пример за тоа е базата на податоци на Eurostat [61], која го покажува просечниот состав на цената за домаќинства: преземена енергија, мрежни трошоци, ДДВ и други даноци (за обновлива енергија, акцизи итн.). Од базата податоци може да се заклучи, дека во 2021 г., на пример, во просек за ЕУ, даноците и таксите учествуваат со значителен удел, а енергетската компонента често е помала од половината од крајната цена.

Начинот на кој регулираните трошоци се структурирани влијае врз тоа кој ги сноси трошоците за одржување на системот. Ако мрежните трошоци се целосно пропорционални на потрошената електрична енергија, тогаш кај домаќинствата или заедниците кои произведуваат сопствена енергија, и на тој начин преземаат помалку од мрежата, значајно се намалува надоместокот за фиксните трошоци на мрежата. Ова поставува прашања за праведноста: дали корисниците кои не произведуваат енергија треба да плаќаат повеќе за да се покријат фиксните трошоци? Овој проблем е познат како ефект на префрлање на трошоци кон непроизводителите. Ако пак, мрежните трошоци се базирани на ангажирана моќност или ако поголемиот дел од нив се фиксни, тогаш учеството во ЗОИЕ, и притоа намалувањето на вкупната потрошувачка, ќе донесе помала финансиска корист за членовите, но истовремено ќе осигура дека сите учесници придонесуваат за одржување на мрежата. Балансирањето, помеѓу стимулирање на локалното производство и потрошувачка на електрична енергија и покривање на трошоците за инфраструктурата, е клучно при дефинирањето на тарифите.

За ЗОИЕ е особено важно како се третира споделената енергија во однос на овие регулирани трошоци. Доколку регулаторот дозволи ослободување или намалување на некои такси за енергијата споделена во рамки на заедницата, тогаш тоа претставува директна финансиска поддршка и ја зголемува економската придобивка од учеството во заедницата. Но, ваквите ослободувања исто така значат дека дел од трошоците на системот остануваат непокриени од тие корисници и мора да се распределат на друго место или да се компензираат со субвенции од државата.

Високиот удел на регулираните трошоци во вкупната цена на електричната енергија може да претставува бариера за поефикасна интеграција на ЗОИЕ, бидејќи ја намалува релативната вредност на нивното флексибилно однесување [40]. Заради тоа, се предлагаат реформи како воведување варијабилност на дел од регулираните трошоци (поврзување на дел од мрежните трошоци со времето или оптоварувањето), или пак специјални тарифи за енергетски заедници, за да се усогласат тарифните сигнали со целите за децентрализација и декарбонизација. Мора да се спречи прелевање на регулираните трошоци: секое ослободување за ЗОИЕ автоматски го зголемува товарот врз останатите крајни потрошувачи. Поттикот за ЗОИЕ е оправдан само доколку не создава финансиски товар за оние кои не се дел од заедницата.

2.2.3. Економски инструменти за поддршка на ЗОИЕ

За забрзување на развојот на ЗОИЕ, покрај соодветни тарифни модели, многу земји применуваат и специјални економски механизми и политики. Овие

инструменти имаат за цел да ги поттикнат инвестициите во локално производство, да го направат споделувањето на енергијата финансиски привлечно и да ја зголемат исплатливоста на проектите на ЗОИЕ. Во продолжение се претставени најчестите форми на поддршка.

2.2.3.1. *Неџо-мерење*

Нето-мерењето¹¹ претставува регулаторен механизам кој им овозможува на производителите-потрошувачи да го предаваат вишокот произведена електрична енергија во ДМ и за тоа да остварат т.н. енергетски кредит. Овој кредит подоцна се користи за компензација на преземената енергија во временски интервали кога сопственото производство не ги задоволува потрошувачките потреби.

Во рамките на класичниот модел на нето-мерење, електроенергетската мрежа практично ја врши функцијата на „виртуелен капацитет за складирање“. За секој киловат-час (kWh) предаден во системот, корисникот добива повратен еквивалент во kWh без дополнителни трошоци или со минимален фиксен надомест [62]. На крајот на пресметковниот период (пр. на месечно или на годишно ниво), корисникот ја подмирува само разликата, односно нето-консумираната енергија. Овој модел уште се нарекува „1:1 модел“ на нето-мерење. Транспарентноста и едноставноста на овој концепт се клучни фактори за раната промоција и масовната прифатеност на ФВ системи во голем број држави.

Иако нето-мерењето долго време служело како ефикасен механизам за стимулирање на децентрализираното производство на енергија, со растечкиот удел на ОИЕ сè поизразени стануваат неговите економски недостатоци. Главната критика е дека класичното нето-мерење не ги одразува вистинските фиксни трошоци за одржување на мрежата, ниту системските давачки што постојат независно од времето на производство или потрошувачка. Како резултат, настанува вкрстено субвенционирање: корисниците со ФВ системи плаќаат помалку мрежни трошоци, а поголем дел од товарот паѓа врз оние кои немаат сопствено производство. Поради овие предизвици, сè поголем број регулаторни тела преминуваат од нето-мерење кон модели на нето-наплата.

2.2.3.2. *Неџо-наплата*

Нето-наплатата¹² претставува пазарно-ориентиран механизам за поддршка на производителите-потрошувачи, каде што физичките текови на енергија и финансиските трансакции се третираат одвоено. За разлика од нето-мерењето, кое се заснова на компензација на енергетски количини (kWh за kWh), нето-наплатата се базира на финансиска компензација во реално време или во куси пресметковни интервали.

Во овој модел, електричната енергија што се презема од мрежата се наплаќа по целосната малопродажна цена (вклучувајќи ги мрежните тарифи, даноците и давачките). Спротивно на тоа, вишокот електрична енергија инјектиран во мрежата се вреднува по посебна, најчесто пониска тарифа (откупна цена), која може да биде фиксна, индексирана според пазарните цени или дефинирана како процент од малопродажната цена. Крајните трошоци за корисникот се пресметуваат како

¹¹ Терминот е превод на англискиот термин – net-metering

¹² Терминот е превод на англискиот термин – net-billing

разлика помеѓу вредноста на преземената енергија и монетарниот кредит остварен од продадената енергија.

Овој пристап овозможува пореално пресликување на реалните системски трошоци и го ублажува проблемот со прелевање на мрежните трошоци врз останатите потрошувачи, што е честа критика на нето-мерењето. Бидејќи продажната цена на вишокот енергија е вообичаено пониска од куповната цена, нето-наплатата создава силен економски сигнал за сопствена потрошувачка. Корисниците се мотивирани да ја трошат произведената енергија локално или да ја складираат во батериски системи, наместо да ја предаваат во мрежата.

Во земји како Грција [63] и Италија [64], применети се шеми на нето-наплата каде што надоместот за предадената енергија е значително понизок од малопродажната цена (пр. околу 70-80% од вредноста). За ЗОИЕ, овој модел значи дека финансиската одржливост директно зависи од способноста на заедницата интерно да ја троши и споделува енергијата меѓу своите членови, наместо да ја предава во ДМ како вишок.

2.2.3.3. Повластѐни тарифи и премии

Повластените тарифи (FiT)¹³ се историски најзначајниот инструмент за поттикнување на користењето на ОИЕ. Овој механизам на производителите им гарантира фиксна откупна цена за секој произведен и предаден kWh електрична енергија во мрежата, најчесто преку долгорочни договори (15–20 години). За енергетските заедници, FiT моделот обезбедува висока сигурност на приходите и го елиминира пазарниот ризик, што беше клучно за раниот развој на граѓанските енергетски проекти.

Сепак, со зголемувањето на конкурентноста на ОИЕ, европските регулативи сè повеќе се насочуваат кон пазарно-ориентирани механизми, како што се повластените премии (FiP)¹⁴. Во овој модел, производителот ја продава енергијата на пазарот и добива дополнителна премија (фиксна или варијабилна) над пазарната цена. Ова бара од ЗОИЕ да бидат поактивни учесници на пазарот или да делуваат преку агрегатори.

Специфична иновација за ЗОИЕ претставуваат премиите за споделена енергија. Илустративен пример е Италија, каде што наместо класична производна субвенција, се доделува експлицитна премија од 110 €/MWh за енергијата што е виртуелно споделена и потрошена во рамките на заедницата [64]. Овој пристап директно ја валоризира сопствената потрошувачка и го стимулира балансирањето на производството и потрошувачката на локално ниво, наместо само производството.

2.2.3.4. Фискални олеснувања

Фискалните инструменти играат клучна улога во подобрувањето на економската исплатливост на проектите на ЗОИЕ преку намалување на даночното оптоварување. Овие мерки најчесто вклучуваат даночни ослободувања за приходите од продажба на енергија, намалени стапки на ДДВ за опрема, или специфични олеснувања на давачките за енергија.

¹³ Кратенката FiT доаѓа од англискиот термин – feed-in tariff (FiT)

¹⁴ Кратенката FiP доаѓа од англискиот термин – feed-in premium (FiP)

Особено значаен механизам за поддршка на ЗОИЕ е намалувањето или ослободувањето од даноци и такси за споделената енергија. Бидејќи крајната цена на електричната енергија содржи висок удел на фискални давачки, нивното елиминирање за енергијата што се разменува внатре во заедницата ја прави локалната енергија значително поконкурентна од мрежната. На пример, во Австрија, регулативата EAG 2021 предвидува дека енергијата споделена во рамките на ЗОИЕ е ослободена од плаќање на одредени давачки (како надоместокот за ОИЕ) и дел од мрежните тарифи [65].

2.2.3.5. Субвенции и грантови

Додека тарифите и фискалните олеснувања обезбедуваат намалување на оперативните трошоци, инвестициските субвенции и грантови се насочени кон намалување на капиталните трошоци и надминување на бариерите во инвестициската фаза. Ова е особено важно за ЗОИЕ, каде што почетните инвестиции за ФВ системи, батериски единици и паметни броила, претставуваат голем финансиски товар за граѓаните и малите бизниси.

Овие инструменти најчесто се реализираат преку национални фондови за енергетска ефикасност или европски програми, нудејќи неповратни средства кои покриваат одреден процент (вообичаено 20–50%) од инвестициските трошоци. Покрај директните грантови, во оваа категорија спаѓаат и инструментите за поволно финансирање, кредити со субвенционирани каматни стапки или државни гаранции издадени од развојни банки (како KfW во Германија).

2.2.3.6. Разлики во ефикасноста и слабоста на различниите инструменти за поддршка

Секој од овие инструменти има свои предности и недостатоци. На пример, нето-мерењето е одлично за иницијален поттик, но на долг рок може да создаде неправедна распределба на мрежните трошоци. Повластените тарифи гарантираат приход, но ако се превисоки, го оптоваруваат буџетот или другите потрошувачи. Премиите за сопствена потрошувачка директно го стимулираат моделот на колективна потрошувачка, но можат да бидат ограничени по обем. Намалувањето на мрежни тарифи за ЗОИЕ го нагласува придонесот на сопствената потрошувачка, но тоа мора да е оправдано со реални заштеди за системот [65].

Во пракса, често се користи комбинација од овие инструменти. На пример, една ЗОИЕ може да користи нето-мерење (или нето-наплата) како оперативен механизам, но истовремено да добие и субвенција за инвестицијата во батерии и да биде ослободена од одредени такси на локално споделената енергија. Државите настојуваат преку ваквите мерки да ги усогласат приватните интереси со пошироките општествени цели: зголемување на уделот на ОИЕ, намалување на емисиите, ангажирање на граѓаните во енергетскиот пазар и ублажување на енергетската сиромаштија. Според анализа на повеќе европски случаи (Австрија, Ирска, Норвешка) [40], законодавните рамки кои овозможуваат економски придобивки за учесниците, главно преку намалување на енергетските такси, позитивно влијаат врз исплатливоста на заедниците. Тоа значи дека добро осмислена комбинација на политики може да генерира доволно заштеди за да ги направи ЗОИЕ финансиски атрактивни, без преголем товар на државниот буџет.

2.2.4. Влијание на тарифните системи врз однесувањето на членовите на ЗОИЕ

Ефикасноста на тарифните системи не зависи само од нивната економска структура, туку и од начинот на кој тие ги менуваат навиките и одлуките на крајните корисници. Во контекст на ЗОИЕ, тарифните сигнали дејствуваат како примарен двигател за промена на профилите на потрошувачка и производство, насочувајќи ги членовите кон оптимално искористување на дистрибуираните енергетски ресурси. Овие механизми кај ЗОИЕ треба да стимулираат сопствената потрошувачка, инвестиции во системи за складирање и управување со полнењето на ЕВ.

2.2.4.1. Стимулирање на сопствената потрошувачка

Основниот ефект на тарифните механизми е да се максимизира сопствената потрошувачка. Кога тарифниот модел го вреднува вишокот предадена енергија по пониска цена од онаа за преземена енергија (како кај моделите на нето-наплата или премија за сопствена потрошувачка), членовите на заедницата се економски мотивирани да ја усогласат својата потрошувачка со периодите на производство.

Ова доведува до промена во однесувањето, позната како поместување на потрошувачката¹⁵, при што корисниците активно ги користат флексибилните потрошувачи (машини за перење, топлински пумпи или бојлери) во часовите со највисоко производство од ОИЕ. Истражувањата покажуваат дека тарифните системи кои ја наградуваат локалната потрошувачка се клучен фактор за економската одржливост на ЗОИЕ [8], [40]. Без вакви стимули, стапката на искористеност на локалните ресурси останува ниска, а зависноста од мрежата висока.

2.2.4.2. Инвестиции во системи за складирање енергија

Тарифните модели директно влијаат врз исплатливоста на инвестициите во батериски системи за складирање енергија. Во системите со нето-мерење (1:1), мрежата функционира како батерија со бесконечно голем капацитет, што ја елиминира потребата за физичко складирање и ги обесхрабрува инвестициите во вакви системи. Спротивно на тоа, примената на динамички тарифи или тарифи според време на користење создава силен економски сигнал за инсталација на батерии.

Во вакво сценарио, членовите на ЗОИЕ ги користат батериите за складирање на вишокот произведена енергија генерирана во периоди на високо производство, односно на ниски цени, а складираната енергија ја користат во часовите кога цените се високи. Дополнително, воведувањето на тарифи базирани на моќност ги поттикнува корисниците да користат батерии за намалување на врвните оптоварувања¹⁶, со што се намалува оптоварувањето на ДМ.

2.2.4.3. Управување со полнењето на електрични возила

ЕВ претставуваат големи потрошувачи, но истовремено нудат голем потенцијал за флексибилност во рамките на ЗОИЕ. Без соодветни тарифни сигнали,

¹⁵ Терминот е превод на англискиот термин – load shifting

¹⁶ Терминот е превод на англискиот термин – peak shaving

полнењето на ЕВ најчесто се одвива веднаш по пристигнувањето дома, што често се совпаѓа со вечерниот врв на потрошувачка, дополнително оптоварувајќи ја мрежата.

Меѓутоа, соодветно дизајнираните динамички тарифи можат да го трансформираат полнењето на ЕВ во алатка за балансирање. Членовите се мотивирани да користат паметни полначи кои го одложуваат полнењето за периодите со ниски цени или вишок локално производство. Истражувањето [66] покажува дека воведувањето на локални пазари на енергија со трошоци за ангажирана моќност може да го намали годишното врвно оптоварување до 39% во заедници со голем број на ЕВ, што потврдува дека корисниците реагираат соодветно на ценовните сигнали.

2.3. Влијанија врз дистрибутивната мрежа

Интеграцијата на распределените обновливи извори, а подоцна и на ЗОИЕ и масовниот продор на ЕВ во нисконапонските мрежи, претставуваат суштинска промена во начинот на работа на дистрибутивните системи. Овие технологии воведуваат нови динамики во тековите на моќност што можат истовремено да создадат придобивки и предизвици за мрежната инфраструктура.

2.3.1. Влијанија на ЗОИЕ врз работата на дистрибутивната мрежа

Во овој дел се разгледуваат клучните влијанија што ЗОИЕ ги имаат врз работата и перформансите на дистрибутивните мрежи.

2.3.1.1. Измазнување на криваџа на оптоварување и соопствена поотрошувачка

Основната функција на ЗОИЕ е агрегација на производители-потрошувачи (домаќинства со ФВ панели, батериски системи итн.) кои го координираат своето производство и потрошувачка за да ја максимизираат локалната сопствена потрошувачка. Со локално консумирање на поголем дел од произведената енергија, ЗОИЕ можат да го измазнат нето-профилот на оптоварување на мрежата и потенцијално да го намалат врвното оптоварување на заедницата.

На пример, преместувањето на флексибилните потрошувачи во пладневните часови, кога производството од ОИЕ е најголемо, може да ги намали вообичаените врвни оптоварувања. Сепак, доколку не се управува внимателно, агресивното поместување на потрошувачката може да создаде нови, непредвидени врвови во други периоди, што може дополнително да го искомплицира управувањето со мрежата.

2.3.1.2. Повратни текови на моќност и регулација на напонот

Високата пенетрација на производители-потрошувачи во една ДМ може да доведе до периоди кога локалното производство ја надминува потрошувачката, предизвикувајќи повратни текови на моќност од нисконапонската кон среднонапонската (СН) мрежа. Ова создава технички предизвици за одржување на стабилноста на мрежата.

Особено критичен е проблемот со покачување на напонот во сончеви денови со ниско оптоварување. Стандардите за квалитет на електрична енергија, како EN 50160 [67], бараат напонот да остане во границите од $\pm 10\%$ од номиналниот, но во

научната литература постојат истражувања кои покажуваат дека во заедници со голем инсталиран ФВ капацитет, напонот на приклучната точка може да ги надмине овие граници [68]. Ова бара од операторот на дистрибутивниот систем да примени напредни методи за регулација на напонот, како користење на регулациони преклопки или инверторска Volt-Var контрола.

2.3.1.3. Локални загушувања во мрежата

Дури и ако ЗОИЕ ја намалат нето-преземената енергија од ДМ, сепак може да дојде до локално загушување во неа. За време на високо производство на енергија од ФВ капацитетите, може да дојде до преоптоварување на трансформаторите или водовите. Стратегиите за висока сопствена потрошувачка може да предизвикаат истовремено полнење или празнење на батериите од членовите, концентрирајќи го оптоварувањето во тесни временски интервали. Тоа укажува на можната потреба од инвестиции во мрежата во области со ЗОИЕ, дури и ако вкупните енергетски текови се намалени.

2.3.1.4. Загуби во мрежата и квалитетот на електричната енергија

Промените во тековите на моќност кои ги воведуваат ЗОИЕ влијаат врз ефикасноста на ДМ и врз квалитетот на електричната енергија. Загубите во линиските спроводници се пропорционални со квадратот на јачината на струјата. Следствено, иако ЗОИЕ може да ја намали вкупната преземена енергија од мрежата, таа сепак може да предизвика периоди на големи струи при споделување енергија или при предавање кон мрежата, со што може делумно да се неутрализираат енергетските придобивки од локалното производство.

Од аспект на квалитетот на напојувањето, големите количини инјектирана моќност од инверторите и нивното истовремено работење, можат да предизвикаат појава на виши хармоници и фликери. Дополнително, нерамномерната распределба на произведената енергија по фази може да резултира со напонска асиметрија. Ова ја нагласува потребата од примена на напредни инвертори со функции за мрежна поддршка (како контрола на реактивна моќност) и строго усогласување со стандардите за квалитет на електричната енергија.

Севкупно, иако ЗОИЕ ја намалуваат нето-побарувачката и придонесуваат кон одржливоста, тие воведуваат комплексни инженерски предизвици: двонасочни текови на моќност, напонски варијации и можни термички преоптоварувања и локални загушувања. Овие појави бараат активно управување со ДМ за да се одржи стабилноста и сигурноста на системот.

2.3.2. Влијанија од полнење ЕВ во дистрибутивни мрежи

Во продолжение се анализираат специфичните ефекти од интеграцијата на електричните возила врз дистрибутивните мрежи.

2.3.2.1. Висок фактор на истовременост и оптоварување

Електрификацијата на транспортот внесува значајни нови оптоварувања во нисконапонски (НН) мрежи. Полнењето на ЕВ се одликува со висок фактор на истовременост, што значи дека честопати голем број возила се полнат во слични

периоди (пр. во раните вечерни часови), што може нагло да го зголеми врвното оптоварување на мрежата.

Во резиденцијални средини, дури и ако истовремено се полни само одреден процент од ЕВ, ДМ сепак се соочува со напрегања. Истражувањата покажуваат дека стандарден дистрибутивен трансформатор од 25 kVA може да биде преоптоварен доколку со номинална моќност истовремено се полнат само 3-4 ЕВ [69]. За разлика од традиционалните куќни апарати, едно ЕВ може да наметне оптоварување од неколку до десетици kW, што претставува значително зголемување на моменталната моќност што мрежата треба да ја поднесе.

2.3.2.2. Пад на напон и квалитет на електрична енергија

Големите оптоварувања од ЕВ можат да предизвикаат значителни падови на напонот, особено на краевите на подолгите водови. Ако повеќе ЕВ истовремено се полнат со висока моќност, падот на напонот може да ги надмине дозволените граници (0,9 p.u.), што може да предизвика проблеми за чувствителните електронски уреди.

Дополнително, ако сите ЕВ реагираат на ист ценовен сигнал (на пр. ниска тарифа во вечерните часови) и започнат со полнење истовремено, може да настане нагол пад на напонот и преоптоварување на мрежата. Ова укажува дека за одржување на стабилноста на напонот, потребно е паметно управување на полнењето на ЕВ.

2.3.2.3. Термички преоптоварувања и стареење на опремата

Директно влијание од неконтролирано полнење на ЕВ е ризикот од термичко преоптоварување. Повторливите преоптоварувања го забрзуваат стареењето на изолацијата на трансформаторите и можат да доведат до предвремени дефекти. Студијата [70][69] предвидува дека до 2035 година, ќе биде потребна надградба на околу 50% од дистрибутивните трансформатори во Калифорнија, заради некоординираното полнење на ЕВ. Термичките напрегања се особено изразени ако трансформаторот е веќе загреан од редовното дневно оптоварување и нема време да се излади пред вечерниот бран на неконтролирано полнење на ЕВ.

2.3.2.4. Управувано (паметно) полнење

Паметното управувано полнење на ЕВ го контролира времето и брзината на полнењето, а кај V2G технологиите и насоката на текот на енергијата. Ова се прави во согласност со состојбите во мрежата или ценовните сигнали. Истражувањата покажуваат дека паметното полнење може значително да ги намали врвните оптоварувања и да ги одложи инвестициите во зајакнување на мрежата, дури и до 50% до 2030 година во сценарија со висока пенетрација на ЕВ [71]. Дополнително, управуваното полнење може да придонесе за стабилизирање на напонот, преку намалување на моќноста на полнење, или кај V2G технологиите преку инјекција на енергија во мрежата во моменти на пад на напон.

Сепак, не сите форми на управувано полнење се подеднакво ефикасни. Едноставните двотарифни системи можат да доведат до зголемено оптоварување ако сите возила започнат со полнење во исто време. Вистински „паметните“ системи се адаптираат на локалните услови во мрежата, различно го распределуваат почетокот

на полнење и често работат преку агрегатор или сигнал од операторот на мрежата. V2G технологијата дополнително овозможува ЕВ да ја поддржат мрежата во периоди на висока побарувачка.

2.3.3. Интеракции помеѓу ЗОИЕ и полнењето на ЕВ

Во идеално сценарио, ЕВ дејствуваат како флексибилни потрошувачи што го апсорбираат вишокот произведена енергија од ОИЕ. ЗОИЕ со вишок производство од ФВ може да го координира полнењето на ЕВ за време на сончевите часови, намалувајќи ги повратните текови на моќност кон мрежата и зголемувајќи ја сопствената потрошувачка. Во трудот [68] е покажано дека со ваква координација, една заедница достигнала 84% годишна сопствена потрошувачка. Дополнително, преку V2G технологиите, ЕВ можат да обезбедат балансирање внатре во заедницата, подобрувајќи ја стабилноста на напонот во локалната мрежа.

Без координација на полнењето на ЕВ, може да се јават временски неусогласености и двојни врвови, односно повратни текови во дневните и зголемена потрошувачка во вечерните часови. Дополнително, може да дојде и до преоптоварување на водовите. На пример, кога еден член предава енергија во мрежата, а друг истовремено полни ЕВ со висока моќност, збирниот проток на струја низ заедничкиот вод може да предизвика локално загушување.

Литературата сугерира дека само преку интегрирано управување со енергијата може да се реализираат целосните придобивки од интеграцијата на ЕВ во ЗОИЕ [4]. Ова подразбира користење на платформи за управување на ЗОИЕ или агрегатори кои го синхронизираат полнењето на ЕВ со производството во заедницата. Европските пилот-проекти потврдуваат дека синергијата е остварлива, но бара дигитална координација и поддршка од регулативата.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ЗОИЕ

Во оваа глава е претставена формулацијата на оптимизациски модел, заснован на мешано-целобројно линеарно програмирање (МЦЛП), кој ги опишува клучните аспекти од работењето на една ЗОИЕ. Моделот ја дефинира структурата и функционирањето на ЗОИЕ, со вклученост на произволни конфигурации на производители-потрошувачи, составени од електрични оптоварувања, локални производни единици, електрични возила, системи за складирање на електрична енергија, топлински пумпи и системи за складирање на топлинска енергија. На тој начин, производителите-потрошувачи можат да преземаат електрична енергија од ДМ за покривање на сопствената потрошувачка, да предаваат вишок произведена енергија во мрежата, или по потреба, да ја споделуваат енергијата меѓусебно. Со комбинирање на производители-потрошувачи со различни карактеристики, преку ваков модел можат да се претстават различни конфигурации на ЗОИЕ. Претставениот модел ја оптимизира интеракцијата меѓу производството, складирањето и користењето на енергијата, во рамки на локалната ДМ што ја опфаќа ЗОИЕ.

Овој оптимизациски модел претставува основна методолошка рамка за сите истражувања спроведени во рамки на оваа дисертација. Понатамошните анализи, проширувања и сценарија се надоврзуваат на овој модел и ги опфаќаат клучните аспекти на функционирањето на ЗОИЕ: влијанието на тарифните системи и регулираните трошоци и интеграцијата и оптималното управување со ЕВ и системите за складирање на енергија.

3.1. Математичка основа на мешано-целобројното линеарно програмирање (МЦЛП)

Мешано-целобројното линеарно програмирање (МЦЛП) претставува класа на оптимизациски проблеми кај кои целната функција и ограничувањата се линеарни, додека дел од оптимизациските променливи се ограничени на целобројни вредности. МЦЛП моделите се широко применувани во енергетските системи поради нивната способност да ги опфатат и континуираните физички процеси (пр. енергетски текови) и дискретните одлуки (пр. вклучување/исклучување на уреди, избор на режими на работа). Во општ случај, канонската форма на еден МЦЛП проблем може да се запише како:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & c^T x + d^T y \\ \text{под услов} \quad & Ax + By \leq b, \\ & x \in \mathbb{R}^n, \\ & y \in \mathbb{Z}^m, \end{aligned} \tag{3.1}$$

каде што x е вектор на континуирани променливи, y е вектор на целобројни променливи, c и d се вектори на трошоци, а A , B и b ги дефинираат линеарните ограничувања на проблемот. Доколку сите целобројни променливи се бинарни, проблемот претставува специјален случај на МЦЛП: бинарно линеарно програмирање.

МЦЛП проблемите генерално припаѓаат на класата NP-тешки проблеми, што значи дека времето за нивно решавање може значително да расте со зголемување на големината на проблемот. Сепак, современите оптимизациски решавачи овозможуваат ефикасно решавање на голем број практично релевантни МЦЛП модели преку напредни алгоритми и техники за редукација на просторот на пребарување.

Во рамки на оваа дисертација, оптимизацискиот модел за ЗОИЕ е формулиран како МЦЛП со цел да се обезбеди прецизно моделирање на дискретните одлуки поврзани со управувањето на електричните возила и складиштата на енергија, при истовремено задржување на линеарноста и компатибилноста со стандардни оптимизациски решавачи.

3.1.1. Стандардни методи за решавање на МЦЛП проблеми

Најшироко применуван метод за решавање на мешано целобројни линеарни проблеми е алгоритмот на разграничување и ограничување¹⁷. Основната идеја на методата се состои во систематско разгранување на просторот на решенија според целобројните променливи и пресметување на горни и долни граници на оптималната вредност преку релаксирани линеарни проблеми. Деловите од просторот на пребарување кои не можат да содржат оптимално решение се елиминираат, со што значително се намалува бројот на разгледувани комбинации.

Современите оптимизациски решавачи го комбинираат методот на разграничување и ограничување со дополнителни техники, како отсекување на рамнини, процедури за претходно решавање и хеуристики за брзо пронаоѓање на добри приближни решенија. Овие техники овозможуваат ефикасно решавање на големи МЦЛП модели кои се среќаваат во практични апликации.

3.2. Концептуална рамка за модел на ЗОИЕ со интеграција на ЕВ

Оптимизацискиот модел развиен во ова истражување го претставува функционирањето на ЗОИЕ како интегриран енергетски систем, составен од повеќе типови членови и различни дистрибуирани енергетски ресурси. Концептуалната рамка има за цел да ги дефинира чинителите, правилата и физичките текови на енергија што го формираат математичкиот опис на заедницата, како и да ги разјасни претпоставките врз кои се гради МЦЛП-моделот.

МЦЛП моделот е имплементиран со користење на Puomo, објектно-ориентирана Python библиотека за математичка оптимизација. Puomo овозможува декларативна формулација на МЦЛП проблеми и нивно решавање преку надворешни комерцијални или отворено-достапни решавачи, без зависност од конкретен алгоритам за решавање.

3.2.1. Членови и ресурси во заедницата

Во моделот, секој член на ЗОИЕ може да има различна комбинација од следните ресурси:

¹⁷ Терминот е превод на англискиот термин – branch-and-bound

- ФВ генератор;
- БССЕ;
- ЕВ и полнач за ЕВ;
- топлинска пумпа;
- систем за складирање топлинска енергија. Овој топлински склад или топлински акумулатор, претставува резервоар што може да апсорбира или ослободува топлина, овозможувајќи временско поместување на топлинската побарувачка.

Членовите може да бидат:

- производители-потрошувачи, кои поседуваат еден или повеќе од наведените ресурси;
- обични потрошувачи, кои немаат сопствено производство, но можат да купуваат и споделуваат енергија во рамки на ЗОИЕ.

Операторот на ДМ го определува максималниот дозволен капацитет на приклучната точка на заедницата, со што се утврдува горната граница за размената на електрична енергија со надворешната мрежа. Сите енергетски трансакции со надворешната мрежа (преземена или предадена енергија) се вршат по утврдена ценовна структура, која ги опфаќа часовните цени на електричната енергија, регулираните трошоци и механизмите за поддршка на сопствената потрошувачка. Овие параметри го определуваат економскиот сигнал што го следи оптимизацискиот модел и претставуваат основа за формирање на внатрешната логика на размената на енергија во ЗОИЕ.

3.2.2. Принципи на споделување на енергија

ЗОИЕ овозможува директно меѓусебно тргување со електрична енергија, при што секој член може да продаде или купи енергија од друг член, по цена која ја определува самата заедница, како внатрешна цена за споделена енергија. Локалното производство на секој член прво ја задоволува неговата сопствена потрошувачка, а само вишокот се нуди за споделување или тргување во рамките на ЗОИЕ.

3.2.3. Претпоставки за енергетските текови

Моделот ги зема предвид следните претпоставки, кои ја дефинираат структурата на енергетските текови во рамки на заедницата и ја обезбедуваат физичката и економската усогласеност на решението:

- Енергетскиот биланс мора да биде задоволен за секој член и за секој час.
- Секој член ги задоволува сопствените потреби преку комбинација од локално производство, складирање, споделена енергија и размена со мрежата.
- Енергијата од ФВ генератори може да биде:
 - потрошена локално,
 - искористена за полнење на ЕВ,
 - складирана во батерија,
 - споделена со други членови,
 - предадена во мрежата.

- Полнењето на ЕВ може да биде флексибилно, ограничено со достапноста на возилото, капацитетот на полначот и потребната состојба на наполнетост.
- За топлинската пумпа и топлинскиот склад се моделира посебен биланс на топлинска енергија.
- МЦПП-структурата наложува сите енергии да бидат моделирани како позитивни променливи. Затоа, наместо една променлива која би можела да се претстави со позитивни и негативни вредности за преземена и предадена енергија, се користат две позитивни променливи, со дополнително ограничување кое спречува нивно истовремено активирање.
- Ограничувањето на капацитетот на приклучната точка се применува врз нето-размената на енергија на целата заедница.
- Размената на енергија во рамки на ЗОИЕ мора да биде билансно усогласена: сумата на споделената енергија предадена во заедницата од сите членови мора да биде еднаква на сумата на споделена енергија преземена од заедницата од сите членови, за еден временски чекор.

3.3. Целна функција на оптимизацискиот модел

Моделот разгледува заедница од обновливи извори на енергија составена од $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ производители-потрошувачи поврзани на ДМ, во рамки на временски опсег T . Моделот ја пресметува цената на електричната енергија врз основа на повеќе тарифни компоненти и регулирани трошоци. Овие компоненти вклучуваат:

- цена на електричната енергија која се плаќа на снабдувачот, со што се опфаќа пазарната цена на електричната енергија;
- цена на споделена електрична енергија, која ја квантифицира финансиската динамика на споделување на вишокот енергија помеѓу членовите на ЗОИЕ;
- регулирани трошоци за размена на електрична енергија со ДМ;
- регулирани трошоци за споделена електрична енергија во рамки на заедницата и;
- трошоци за врвна ангажирана моќност.

Овие компоненти овозможуваат моделирање на различни тарифни системи, вклучувајќи рамни и динамички цени и повеќе видови регулирани трошоци. Оваа флексибилност е клучна затоа што овозможува понатамошни истражувања и споредбени анализи за тоа како различните тарифни системи влијаат врз однесувањето и економската ефикасност на членовите на ЗОИЕ. Вкупниот трошок за секој член на заедницата C_i е претставен со следниот израз:

$$\begin{aligned}
C_i = & \underbrace{C_i^{\text{cap}} \cdot p_i^{\text{max}}}_{\text{трошоци за врвна ангажирана моќност}} + \underbrace{\sum_{t=1}^T (C_i^{\text{b}}(t) \cdot p_i^{\text{b}}(t) - C_i^{\text{s}}(t) \cdot p_i^{\text{s}}(t)) \cdot \Delta t}_{\text{трошоци кон снабдувачот}} \\
& + \underbrace{\sum_{t=1}^T (C_i^{\text{sh,b}}(t) \cdot p_i^{\text{sh,b}}(t) - C_i^{\text{sh,s}}(t) \cdot p_i^{\text{sh,s}}(t)) \cdot \Delta t}_{\text{трошоци за споделена енергија во рамки на ЗОИЕ}} \\
& + \underbrace{\sum_{t=1}^T (C_i^{\text{reg,b}}(t) \cdot p_i^{\text{b}}(t) + C_i^{\text{reg,s}}(t) \cdot p_i^{\text{s}}(t)) \cdot \Delta t}_{\text{регулирани трошоци за електричната енергија разменета со снабдувачот}} \quad (3.2) \\
& + \underbrace{\sum_{t=1}^T \left[(C_i^{\text{reg,sh,b}}(t) - C_i^{\text{prem,sh,b}}(t)) \cdot p_i^{\text{sh,b}}(t) + (C_i^{\text{reg,sh,s}}(t) - C_i^{\text{prem,sh,s}}(t)) \cdot p_i^{\text{sh,s}}(t) \right] \cdot \Delta t}_{\text{регулирани трошоци за споделена енергија во рамки на ЗОИЕ}}
\end{aligned}$$

Во овој израз, за секој член на заедницата i , за временски чекор t :

- $p_i^{\text{b}}(t)$ и $p_i^{\text{s}}(t)$ ги претставуваат количествата на електрична енергија преземена од и предадена во мрежата, соодветно,
- $p_i^{\text{sh,b}}(t)$ и $p_{i,t}^{\text{sh,i}}(t)$ ги претставуваат количествата на електрична енергија преземена од и предадена во заедницата, соодветно,
- p_i^{max} е врвното оптоварување за одбраниот временски опсег,
- $C_i^{\text{b}}(t)$ и $C_i^{\text{s}}(t)$ се цените за преземена и предадена електрична енергија од и во мрежата, соодветно,
- $C_i^{\text{sh,b}}(t)$ и $C_i^{\text{sh,s}}(t)$ се цените за преземена и предадена електрична енергија од и во заедницата, соодветно,
- C_i^{cap} се трошоците за врвната ангажирана моќност на одреден временски интервал,
- $C_i^{\text{reg,b}}(t)$ и $C_i^{\text{reg,s}}(t)$ го претставуваат збирот на сите регулирани трошоци, даноци и давачки за електрична енергија преземена од и предадена во мрежата, соодветно,
- $C_i^{\text{reg,sh,b}}(t)$ и $C_i^{\text{reg,sh,s}}(t)$ го претставуваат збирот на сите регулирани трошоци, даноци и давачки за електрична енергија преземена од и предадена во заедницата, соодветно, и
- $C_i^{\text{prem,sh,b}}(t)$ и $C_i^{\text{prem,sh,s}}(t)$ се премии за споделување на електрична енергија, преземена од и предадена во заедницата, соодветно.

Во моделот е вклучено споделувањето на електрична енергија во рамки на заедницата, при што членот кој презема енергија од заедницата ги компензира останатите членови со плаќање цена $C_i^{\text{sh,b}}(t)$, додека членот кој предава електрична енергија во заедницата е компензиран од заедницата по цена $C_i^{\text{sh,s}}(t)$. Овие цени вообичаено се одбрани така што

$$C_i^s(t) \leq C_i^{\text{sh},s}(t) = C_i^{\text{sh},b}(t) \leq C_i^b(t) \quad (3.3)$$

Вкупниот трошок за електрична енергија за целата ЗОИЕ C_N се пресметува како

$$C_N = \sum_{i=1}^N C_i \quad (3.4)$$

Целната функција (OF) го минимизира вкупниот енергетски трошок што го сноси заедницата C_N

$$\text{OF: } \min C_N \quad (3.5)$$

3.4. Ограничувања на МЦЛП оптимизацискиот модел

Во продолжение се презентирани ограничувањата на МЦЛП оптимизацискиот модел, кои го дефинираат оперативното однесување на заедницата и обезбедуваат физичка конзистентност и усогласеност со техничките ограничувања.

3.4.1. Биланс на електрична енергија

Билансот на електричната енергија за секој член на ЗОИЕ i во секој временски чекор t е даден со следната равенка:

$$\begin{aligned} p_i^{\text{load}}(t) + p_i^{\text{bat, ch}}(t) + p_i^{\text{HP}}(t) + p_i^{\text{EV}}(t) + p_i^s(t) + p_i^{\text{sh},s}(t) \\ - p_i^{\text{PV}}(t) - p_i^{\text{bat, dis}}(t) - p_i^b(t) - p_i^{\text{sh},b}(t) = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

каде за секој производител-потрошувач i , во секој временски чекор t :

- $p_i^{\text{load}}(t)$ ја претставува потрошувачката на електрична енергија од електричните уреди во неговиот објект,
- $p_i^{\text{bat, ch}}(t)$ и $p_i^{\text{bat, dis}}(t)$ ја претставуваат енергијата што се складира, односно се презема од батерискиот систем,
- $p_i^{\text{HP}}(t)$ е потрошувачката на електрична енергија на топлинската пумпа,
- $p_i^{\text{EV}}(t)$ е електричната енергија што се користи за полнење на батеријата на електричното возило и
- $p_i^{\text{PV}}(t)$ е електричната енергија произведена од локалниот фотоволтаичен генератор на производител-потрошувачот.

3.4.2. Споделување на електрична енергија во рамки на ЗОИЕ

Кога производител-потрошувачот i е дел од ЗОИЕ, тој може да разменува енергија со останатите членови, односно да презема електрична енергија од заедницата, додека други членови предаваат кон неа. Како резултат на тоа, производител-потрошувачот i во временски чекор t виртуелно ја намалува сопствената потрошувачка за одредено количество енергија $p_i^{\text{sh},b}(t)$.

Во секој временски чекор t , секој производител-потрошувач i може или да предава, или да презема електрична енергија од мрежата или од заедницата. Математичката формулација на овој услов е:

$$\left(p_i^s(t) + p_i^{\text{sh},s}(t)\right) \cdot \left(p_i^b(t) + p_i^{\text{sh},b}(t)\right) = 0 \quad (3.7)$$

Овој услов обезбедува дека во секој временски чекор t е активен само еден правец на проток на енергија или предавање или преземање. Сепак, бидејќи горниот услов е нелинеарен и не може директно да се вклучи во МЦЛП формулацијата, тој се линеаризира со воведување на бинарна променлива и со примена на big-M методот. Big-M методот овозможува линеаризација на нелинеарни услови со помош на бинарни променливи и голема константа [72]. На овој начин, нелинеарниот комплементарен услов се претвора во еквивалентно множество на линеарни ограничувања, дадени со следните равенки:

$$p_i^s(t) + p_i^{\text{sh},s}(t) \leq x_i(t) \cdot \bar{P}_i^{\text{grid}} \quad (3.8)$$

$$p_i^b(t) + p_i^{\text{sh},b}(t) \leq (1-x_i(t)) \cdot \bar{P}_i^{\text{grid}} \quad (3.9)$$

$$x_i(t) \in \{0,1\} \quad (3.10)$$

Во овие равенки, \bar{P}_i^{grid} го претставува капацитетот на приклучната точка кон ДМ за производител-потрошувачот i , односно најголемата дозволена моќност за предадена или преземена електрична енергија. Истовремено, овој параметар се користи и како „big-M“ константа во линеаризацијата на комплементарното ограничување. Променливата $x_i(t)$ е бинарна променлива, воведена со цел да се обезбеди логичка селекција помеѓу двата можни правци на тек на електрична енергија во секој временски чекор t , односно да се обезбеди дека само едниот од нив може да биде активен во секој даден момент.

Билансот на споделената енергија во рамки на ЗОИЕ е даден со изразот (3.11). Овој израз осигурува дека во секој временски чекор t вкупната количина на преземена електрична енергија е еднаква на вкупната количина на предадена електрична енергија помеѓу членовите на ЗОИЕ.

$$\sum_{i=1}^N p_i^{\text{sh},b} = \sum_{i=1}^N p_i^{\text{sh},s}, \forall t \in T \quad (3.11)$$

3.4.3. Моделирање на електрични возила

Полнењето на електричното возило е моделирано во рамки на МЦЛП оптимизацискиот модел преку следните ограничувања:

$$e_i^{\text{EV}}(t) = e_i^{\text{EV}}(t-1) + \eta_i^{\text{EV}} \cdot p_i^{\text{EV}}(t) \cdot \Delta t, \forall t \in T: t > 1 \quad (3.12)$$

$$e_i^{\text{EV}}(1) = E_i^{\text{EV,start}} \quad (3.13)$$

$$e_i^{EV}(T) = E_i^{EV,des} \quad (3.14)$$

$$0 \leq p_i^{EV}(t) \leq \alpha_i(t) \cdot \bar{P}_i^{EV}(t) \quad (3.15)$$

$$\alpha_i(t) \in \{0,1\}, \alpha_i(t) = \begin{cases} 1, & t_i^{EV,arr} \leq t < t_i^{EV,dep} \\ 0, & \text{во спротивно} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\underline{E}_i^{EV} \leq e_i^{EV}(t) \leq \bar{E}_i^{EV} \quad (3.17)$$

Во овие ограничувања, за секој член на ЗОИЕ i , во секој временски чекор t :

- $e_i^{EV}(t)$ и $e_i^{EV}(t-1)$ го претставуваат количеството енергија складирано во батеријата на ЕВ во тековниот, односно во претходниот временски чекор,
- η_i^{EV} е ефикасноста на полнењето на батеријата на ЕВ,
- $p_i^{EV}(t)$ ја претставува моќноста на полнење на ЕВ во временскиот чекор t ,
- \bar{P}_i^{EV} е максималната моќност за полнење на станицата за полнење на ЕВ,
- $t_i^{EV,arr}$ и $t_i^{EV,dep}$ се времињата на пристигнување и заминување на електричното возило од станицата за полнење,
- $\alpha_i(t)$ е бинарен параметар, кој означува дали ЕВ е присутно на станицата за полнење,
- $E_i^{EV,start}$ го означува почетното ниво на енергија во батеријата при приклучување на ЕВ,
- $E_i^{EV,des}$ го означува посакуваното количество на енергија кое треба да се достигне до крајот на полнењето и
- \underline{E}_i^{EV} и \bar{E}_i^{EV} се минималното и максималното ниво на енергија во батеријата на ЕВ.

3.4.4. Моделирање на батериски систем за складирање енергија

Батерискиот систем за складирање е моделиран преку следните ограничувања:

$$e_i^{bat}(t) = e_i^{bat}(t-1) + \left(\eta_i^{bat,ch} \cdot p_i^{bat,ch}(t) - \frac{p_i^{bat,dis}(t)}{\eta_i^{bat,dis}} \right) \cdot \Delta t, \forall t \in T: t > 1 \quad (3.18)$$

$$e_i^{bat}(1) = E_i^{bat,start} \quad (3.19)$$

$$0 \leq p_i^{bat,ch}(t) \leq y_i(t) \cdot \bar{P}_i^{bat,ch} \quad (3.20)$$

$$0 \leq p_i^{bat,dis}(t) \leq (1 - y_i(t)) \cdot \bar{P}_i^{bat,dis} \quad (3.21)$$

$$y_i(t) \in \{0,1\} \quad (3.22)$$

$$\underline{E}_i^{bat} \leq e_i^{bat}(t) \leq \bar{E}_i^{bat} \quad (3.23)$$

Во овие равенки, за секој член на ЗОИЕ i во секој временски чекор t :

- $e_i^{\text{bat}}(t)$ и $e_i^{\text{bat}}(t - 1)$ ја претставуваат енергијата складирана во батеријата во тековниот и претходниот временски чекор, соодветно,
- $\eta_i^{\text{bat,ch}}$ и $\eta_i^{\text{bat,dis}}$ се коефициентите на ефикасност на полнење и празнење на батеријата,
- $p_i^{\text{bat,ch}}(t)$ и $p_i^{\text{bat,dis}}(t)$ ги претставуваат моќностите со кои батеријата се полни, односно празни во временскиот чекор t ,
- $\bar{P}_i^{\text{bat,ch}}$ и $\bar{P}_i^{\text{bat,dis}}$ се максималните дозволени моќности за полнење и празнење на батеријата, кои во линеаризираните ограничувања се користат и како „big-M“ параметри,
- $\underline{E}_i^{\text{bat}}$ и \bar{E}_i^{bat} се минимално и максимално дозволеното количество енергија складирано во батеријата,
- $E_i^{\text{bat,start}}(t)$ е почетното количество енергија складирано во батеријата (во временскиот чекор $t = 1$ и
- $y_i(t)$ е бинарна променлива која означува дали батеријата се празни или се полни во дадениот временски чекор.

3.4.5. Биланс на топлинска енергија и систем за складирање топлинска енергија

Билансот на топлинската енергија за секој член на ЗОИЕ i во секој временски чекор t е даден со следната равенка:

$$q_i^{\text{load}}(t) + q_i^{\text{TES,ch}}(t) - q_i^{\text{HP}}(t) - q_i^{\text{TES,dis}}(t) = 0 \quad (3.24)$$

каде:

- $q_i^{\text{load}}(t)$ ја претставува побарувачката на топлинска енергија во објектот,
- $q_i^{\text{HP}}(t)$ е топлината произведена од топлинската пумпа и
- $q_i^{\text{tes,ch}}(t)$ и $q_i^{\text{tes,dis}}(t)$ ја претставуваат топлинската енергија складирана во, односно ослободена од системот за складирање на топлинска енергија, соодветно.

Работењето на топлинските пумпи во временски чекор t е моделирано на следниот начин:

$$q_i^{\text{HP}}(t) = \text{COP}_i(t) \cdot p_i^{\text{HP}}(t) \quad (3.25)$$

$$0 \leq q_i^{\text{HP}}(t) \leq \bar{Q}_i^{\text{HP}} \quad (3.26)$$

Во овие равенки, $\text{COP}_i(t)$ го претставува коефициентот на перформанса¹⁸ на топлинската пумпа, а \bar{Q}_i^{HP} го означува нејзиниот топлински капацитет.

Работењето на системот за складирање на топлинска енергија во рамки на МЦЛП моделот е формулирано преку следните равенки:

¹⁸ Терминот е превод на англискиот термин – coefficient of performance (COP)

$$e_i^{\text{TES}}(t) = e_i^{\text{TES}}(t-1) + \left(\eta_i^{\text{TES,ch}} \cdot q_i^{\text{TES,ch}}(t) - \frac{q_i^{\text{TES,dis}}(t)}{\eta_i^{\text{TES,dis}}} \right) \cdot \Delta t, \forall t \in T: t > 1 \quad (3.27)$$

$$e_i^{\text{TES}}(1) = E_i^{\text{TES,start}} \quad (3.28)$$

$$0 \leq q_i^{\text{TES,ch}}(t) \leq z_i(t) \cdot \bar{Q}_i^{\text{TES,ch}} \quad (3.29)$$

$$0 \leq q_i^{\text{TES,dis}}(t) \leq (1 - z_i(t)) \cdot \bar{Q}_i^{\text{TES,dis}} \quad (3.30)$$

$$z_i(t) \in \{0,1\} \quad (3.31)$$

$$\underline{E}_i^{\text{TES}} \leq e_i^{\text{TES}}(t) \leq \bar{E}_i^{\text{TES}} \quad (3.32)$$

каде:

- $e_i^{\text{TES}}(t)$ и $e_i^{\text{TES}}(t-1)$ ја претставуваат енергијата складирана во системот за складирање на топлинска енергија во тековниот и претходниот временски чекор, соодветно,
- $\eta_i^{\text{TES,ch}}$ и $\eta_i^{\text{TES,dis}}$ се коефициентите на ефикасност на полнење и празнење на системот за складирање на топлинска енергија,
- $q_i^{\text{TES,ch}}(t)$ и $q_i^{\text{TES,dis}}(t)$ ги претставуваат топлинските моќности со кои системот за складирање на топлинска енергија се полни, односно празни во временскиот чекор t ,
- $E_i^{\text{TES,start}}$ ја претставува почетната состојба на складираната топлинска енергија во системот,
- $\bar{Q}_i^{\text{TES,ch}}$ и $\bar{Q}_i^{\text{TES,dis}}$ ги претставуваат горните граници на топлинската моќност при полнење и празнење на системот,
- $z_i(t)$ е бинарна променлива воведена која одредува дали во даден временски чекор t системот се полни или се празни и
- $\underline{E}_i^{\text{TES}}$ и \bar{E}_i^{TES} го претставуваат минималното и максималното количество на топлинска енергија што може да се складира во системот за складирање на топлинска енергија.

3.5. Регулација на полнењето на ЕВ

Оптимизацијата на ЗОИЕ често овозможува постоење на повеќе решенија со идентична вредност на целната функција. Овој феномен е особено изразен во сценарија кои вклучуваат полнење на ЕВ, бидејќи различни распореди на потрошувачката и полнењето на ЕВ можат да доведат до ист вкупен трошок или исти технички перформанси [73]. Како последица, моделот може да се однесува неконзистентно и да генерира нестабилни и нерепродуцибилни резултати, што ја отежнува нивната интерпретација и практична примена. Еден начин да се надминат овие „еднакви“ решенија е да се воведат регуларизациски членови со мали тежински фактори во целната функција, кои го насочуваат оптимизаторот кон поконзистентни и попрактични решенија, при што се задржува оптималноста на решението. Во математичката оптимизација, чест пристап е проширување на основната целна

функција со дополнителни членови за пенализација, познати како регуларизациски компоненти, со цел да се влијае на изборот меѓу повеќе еквивалентни оптимални решенија [74], [75], [76], [77]. Во продолжение се формализира пристапот преку математичко дефинирање на оптимизациските променливи и регуларизациските компоненти што се вградуваат во целната функција.

3.5.1. Теоретски основи на регуларизацијата во математичката оптимизација

Регуларизацијата претставува општ концепт во математичката оптимизација и статистичкото моделирање, чија цел е подобрување на својствата на оптимизацискиот проблем и добиените решенија. Таа се применува во ситуации кога оптимизацискиот проблем е недоволно определен, поседува повеќе еквивалентни оптимални решенија или е чувствителен на мали промени во влезните податоци. Во вакви случаи, чистата оптималност според примарната целна функција не е доволна за да се обезбеди стабилно, интерпретабилно или оперативно прифатливо решение.

Во формална смисла, регуларизацијата се воведува преку проширување на оригиналната целна функција со дополнителен регуларизациски член, кој ги вклучува посакуваните својства на решението. Општиот облик на регуларизиран оптимизациски проблем може да се запише како:

$$\min_x f(x) + \lambda \cdot R(x) \quad (3.33)$$

каде што $f(x)$ ја претставува оригиналната целна функција, $R(x)$ е регуларизацискиот член, а $\lambda \geq 0$ е параметар кој го контролира компромисот помеѓу оптималноста според примарната цел и влијанието на регуларизацијата. За $\lambda = 0$, проблемот се сведува на оригиналната, нерегуларизирана формулација.

Регуларизацискиот член $R(x)$ најчесто е конструиран така што ги пенализира решенијата со непосакувани карактеристики, како што се прекумерна варијабилност, често менување на состојбите на непознатите или екстремни вредности кои, иако оптимални од математичка гледна точка, можат да бидат непрактични од оперативен аспект. На овој начин, регуларизацијата овозможува избор на решение кое е не само оптимално, туку и подобро усогласено со физичките, техничките или економските ограничувања на разгледуваниот систем.

Во контекст на мешано-целобројната линеарна оптимизација, регуларизацијата е особено корисна поради честата појава на повеќе оптимални решенија со иста вредност на целната функција. Со воведување на соодветно избран регуларизациски член, се овозможува детерминистички избор помеѓу ваквите решенија, без нарушување на основната оптималност на проблемот. Оттука, регуларизацијата може да се разгледува како механизам за насочување на оптимизацијата кон оперативно пореални и интерпретабилни решенија.

3.5.2. Регуларизирана целна функција и формализација на оптимизацискиот проблем

Нека дефинираме вектор на оптимизациски променливи v . Овој вектор ги содржи сите енергетски текови и состојби на системот во ЗОИЕ кои претставуваат

оптимизациски променливи во оптимизацискиот модел за сите членови i , во сите временски чекори t , и се дефинира како:

$$v = \{ p_i^{EV}(t), p_i^{bat}(t), p_i^{PV}(t), p_i^{grid}(t), e_i^{bat}(t), e_i^{EV}(t), \dots \}, \forall i \in N, t \in T \quad (3.34)$$

Формално, ако оригиналниот проблем има за цел минимизација на некоја функција $f(x)$ во рамки на дозволениот простор $v \in V$, тогаш модифицираната функција на цел се изразува како:

$$\min f(v) + \lambda \cdot r(v) \quad (3.35)$$

каде што:

- V го претставува множеството на сите дозволени вредности на променливите што ги задоволуваат ограничувањата на моделот,
- $r(x)$ ги претставува секундарните преференции,
- $\lambda \ll 1$ осигурува дека примарниот трошок останува доминантен.

Со овој пристап се овозможува единствен избор на решение меѓу повеќе еквивалентни според трошокот, без да се наруши оптималноста на решението.

Со цел да се подобри стабилноста и интерпретабилноста на резултатите од предложениот МЦЛП модел за оптимизација на ЗОИЕ, во целната функција се додаваат две различни линеарни регуларизациски компоненти $r(x)$, насочени кон подобрување на оптимизацијата на полнењето на ЕВ:

1. измазнување на кривата на полнење, со цел да се намалат наглитите варијации на моќноста на полнење и
2. термин за временска пристрасност на полнењето, кој фаворизира порано или подоцнежнo полнење.

Двете компоненти се изразени како линеарни функции од оптимизациските променливи, со што се задржува МЦЛП структурата и компатибилноста со стандардните решавачи. Со насочување на оптимизаторот кон поконзистентни и оперативно пореалистични профили на полнење, овие компоненти ја подобруваат интерпретабилноста и практичната применливост на резултатите, без потреба од нелинеарни реформулации или лексикографска оптимизација. Овој пристап е генерален, скалабилен и лесно применлив во програмски пакети како Puomo, при што се обезбедува независност од избраниот тип на решавач.

3.5.3. Регуларизациски компоненти

Во продолжение се прикажани линеарните регуларизациски компоненти со кои целната функција се проширува за да се добијат оперативно поповолни и пореалистични решенија.

3.5.3.1. Функција за измазнување на кривата на полнење

Оваа регуларизациска компонента има за цел да ја намали варијабилноста на моќноста на полнење на ЕВ во текот на временскиот хоризонт, со што се добива порамномерен и пореалистичен профил на полнење.

$$r_1(v) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=2}^T |p_i^{EV}(t) - p_i^{EV}(t-1)| \quad (3.36)$$

Компонентата $r_1(x)$ ги пенализира големите промени во моќноста на полнење на ЕВ помеѓу два последователни временски чекори, поттикнувајќи измазнети профили на полнење наместо нагли варијации.

3.5.3.2. Функција за временска непристрасност на полнењето

Оваа регуларизациска компонента се користи за контрола на временската распределба на полнењето на ЕВ, со што се овозможува моделирање на преференции за порано или подоцно полнење во рамки на достапниот временски хоризонт.

$$r_2(v) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T t \cdot P_i^{EV}(t) \quad (3.37)$$

Компонентата $r_2(x)$ го пенализира полнењето во подоцнежните временски чекори, со што се создава пристрасност кон порано искористување на достапниот капацитет за полнење. Алтернативно, овој регуларизациски термин може да се преформулира како пристрасност кон подоцно полнење, со заменување на временскиот тежински фактор t со $(T - t)$:

$$r_3(v) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (T - t) \cdot P_i^{EV}(t), \quad (3.38)$$

што го менува стимулот од порано кон подоцно закажување на полнењето.

Притоа, проширената функција на цел на оптимизацискиот модел се изразува како:

$$\text{OF: } \min(C_N(v) + \lambda_s \cdot r_1(v) + \lambda_e \cdot r_2(v)) \quad (3.39)$$

каде што λ_s и λ_e се мали тежински фактори за регуларизација кои ја задржуваат оптималноста на трошоците, но овозможуваат диференцијација меѓу повеќе еквивалентни решенија. Вредностите за овие фактори треба бидат избрани внимателно, така што ќе влијаат врз решението само во случаи со повеќе трошковно еднакви решенија, без значително да ја нарушат основната цел за минимизација на вкупните трошоци. На тој начин, се постигнува измазнет и практично применлив профил на полнење, без компромис во економската ефикасност.

3.5.4. Нумерички резултати и конзистентност при користење различни решавачи

За да се оцени ефектот од регуларизаторот за измазнување, се поставува $\lambda_e = 0$ и се анализира компромисот помеѓу два индикатори на перформанси: индексот на измазнетост на профилот на полнење на ЕВ, PSI¹⁹ и процентуалното зголемување на трошокот, CI_%²⁰. Овие индикатори се пресметуваат при оптималното решение $v^*(\lambda_s)$ од равенката (3.39) за различни вредности на тежинскиот фактор за измазнување λ_s . Индексот PSI ја квантифицира измазнетоста на вкупниот профил на полнење на ЕВ и се базира на вкупната варијација на моќноста на полнење:

$$R(v) = \sum_{t=2}^T |p^{\text{EV}}(t) - p^{\text{EV}}(t-1)|, \quad (3.40)$$

каде $p^{\text{EV}}(t)$ е вкупната моќност на полнење на сите електрични возила во заедницата во временски чекор t :

$$p^{\text{EV}}(t) = \sum_{i=1}^N p_i^{\text{EV}}(t). \quad (3.41)$$

Индикаторите PSI и CI_% се дефинирани како:

$$\text{PSI}(\lambda_s) = 1 - \frac{R(v(\lambda_s)) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, \quad (3.42)$$

$$\text{CI}_{\%}(\lambda_s) = \frac{f(v^*(\lambda_s)) - f(v^*(0))}{f(v^*(0))} \cdot 100, \quad (3.43)$$

каде што:

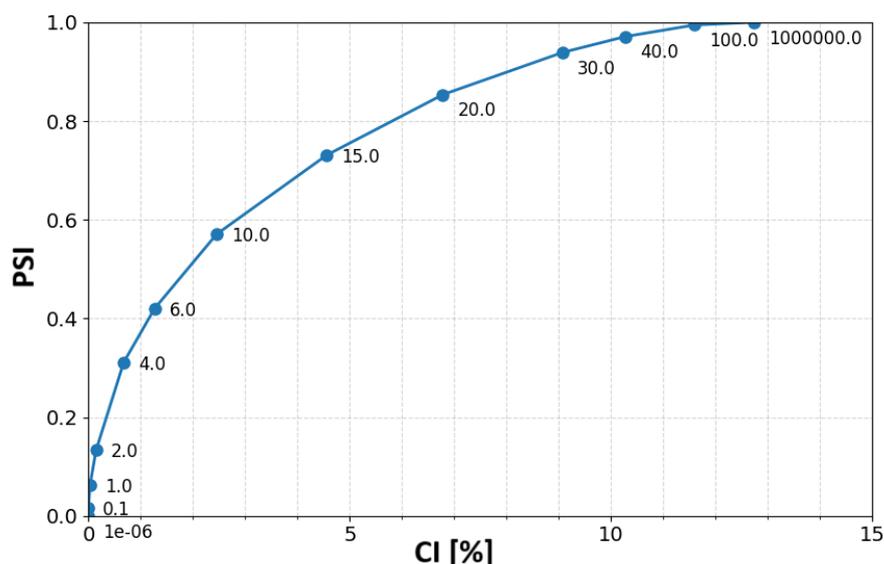
- $f(v^*(0))$ ја претставува основната вредност на трошокот пресметан преку равенката (3.39) кога не се применува регуларизација ($\lambda_s = 0$),
- R_{\min} и R_{\max} се минималната и максималната вкупна варијација на кривата на полнење на ЕВ забележани за сите испитани вредности на λ_s , соодветно, и
- во равенките (3.42) и (3.43), $R(v^*(\lambda_s))$ и $f(v^*(\lambda_s))$ ги означуваат вкупната варијација и трошокот, пресметани за дадена вредност на λ_s во оптималното решение од равенката (3.39).

На Слика 3.1 е прикажан компромисот помеѓу PSI и CI_%. Со зголемување на тежинскиот фактор за измазнување λ_s , вредноста на PSI расте од 0 до 1, додека CI_% почнува да се зголемува над нула. Во почетната фаза, PSI брзо расте од 0 до околу 0,6, што укажува дека профилот на полнење станува значително измазнет со минимално зголемување на трошокот од приближно 3%. Понатаму, PSI постепено се

¹⁹ Кратенката PSI доаѓа од англискиот термин – profile smoothness index (PSI)

²⁰ Кратенката CI доаѓа од англискиот термин – cost increase (CI)

заситува, приближувајќи се до речиси совршено измазнет профил, додека зголемувањето на трошокот се стабилизира на околу 13%. Ова покажува дека значително подобрување на измазнетоста на полнењето може да се постигне со минимален дополнителен трошок, додека понатамошното измазнување е можно со умерена и контролирана пенализација. Со ова се потврдуваат насоките за избор на тежински фактори за регуларизација кои можат да се сретнат во литературата [78]. Типично, овие вредности треба да бидат неколку редови на големина помали од главните ценовни коефициенти. Практичните упатства за нивно избирање препорачуваат нивната вредност да се одбере преку анализа на чувствителност, почнувајќи со вредности во опсег од 0.001 до 0.01 од најмалата ценовна единица.



Слика 3.1. Крива на зависност помеѓу индексот на измазнетост на профилот на полнење на ЕВ (PSI) и зголемувањето на трошокот (CI%) за $\lambda_s \in [10^{-6}, 10^6]$ при $\lambda_e = 0$. Вредностите на соодветните λ_s се прикажани покрај точките на графиконот.

Понатаму, за да се оцени конзистентноста на моделот при користење на различни решавачи, беа споредени распоредите на полнење на ЕВ за хипотетичка ЗОИЕ, добиени со различни решавачи (SCIP, HiGHS, CBC, MOSEK и CPLEX) и за различни комбинации на тежински фактори λ_s и λ_e . Притоа, решавачот Gurobi беше усвоен како референтен и стабилен решавач. Без примена на компонентите за регуларизација, се појавуваат значајни разлики во добиените распореди, иако оптималните вредности на целната функција беа идентични, што го потврдува постоењето на повеќе оптимални решенија. Спротивно на тоа, при примена на предложените регуларизациски компоненти, отстапувањата меѓу резултатите од различните решавачи паѓаат под нумеричката толеранција, со што се обезбедува единствено решение независно од употребениот решавач. Влијанието на регуларизацијата врз трошокот е занемарливо и не ја нарушува економската оптималност.

3.6. Нумерички индикатори

Во продолжение се претставени и објаснети нумеричките индикатори кои се користат за оценување на енергетската ефикасност и оперативната успешност на ЗОИЕ. Овие индикатори овозможуваат квантитативна анализа на степенот на

користење на локално произведената енергија, нејзината распределба меѓу членовите на заедницата и нивната зависност од ДМ. Овие индикатори, поврзани со билансите на потрошувачка и локално производство, произлегуваат од литературата за згради со потрошувачка на енергија близу нула [79].

За дефинирање на овие индикатори, потребно е прво да се дефинираат следниве параметри:

- Моментална побарувачка на енергија или моментална моќност на член од заедницата $p_i^{\text{dem}}(t)$:

$$p_i^{\text{dem}}(t) = p_i^{\text{load}}(t) + p_i^{\text{EV}}(t) + p_i^{\text{HP}}(t) + p_i^{\text{bat, ch}}(t) - p_i^{\text{bat, dis}}(t) \quad (3.44)$$

- Моментална побарувачка на енергија или моментална моќност на заедницата $p_N^{\text{dem}}(t)$:

$$p_N^{\text{dem}}(t) = \sum_{i=1}^N p_i^{\text{dem}}(t) \quad (3.45)$$

- Сопствена потрошувачка на локалното производство за еден член од заедницата $p_i^{\text{sc}}(t)$:

$$p_i^{\text{sc}}(t) = \min(p_i^{\text{dem}}(t), p_i^{\text{PV}}(t)) \quad (3.46)$$

- Колективна сопствена потрошувачка на ЗОИЕ $p_N^{\text{sc}}(t)$:

$$p_N^{\text{sc}}(t) = \min\left(p_N^{\text{dem}}(t), \sum_{i=1}^N p_i^{\text{PV}}(t)\right) \quad (3.47)$$

3.6.1. Стапка на сопствена потрошувачка

Стапката на сопствена потрошувачка (SCR)²¹, ја определува ефикасноста со која заедницата ја користи локално произведената електрична енергија за сопствена потрошувачка. Стапката на сопствена потрошувачка се пресметува како односот меѓу колективната сопствена потрошувачка на ЗОИЕ и вкупно произведената локална енергија:

$$\text{SCR} = \frac{\sum_{t=1}^T p_N^{\text{sc}}(t) \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N p_i^{\text{PV}}(t) \cdot \Delta t} \quad (3.48)$$

Вредностите за SCR можат да бидат во граници $0 \leq \text{SCR} \leq 1$. Поголема вредност на SCR укажува на поголема локална искористеност на произведената енергија во заедницата, зад точката на приклучување.

²¹ Кратенката SCR доаѓа од англискиот термин – self-consumption rate (SCR)

3.6.2. Стапка на енергетска независност

Стапката на енергетска независност (SSR)²² го изразува нивото на енергетска самодоволност на заедницата, односно делот од вкупната потрошена електрична енергија што е обезбеден од локално производство и споделување во рамките на заедницата. Таа се пресметува како количник на колективната сопствена потрошувачка на ЗОИЕ и вкупната потрошена енергија:

$$SSR = \frac{\sum_{t=1}^T p_N^{sc}(t) \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T p_N^{dem}(t) \cdot \Delta t} \quad (3.49)$$

Слично како SCR, вредностите за SSR можат да се движат во опсегот $0 \leq SSR \leq 1$. Висока вредност за SSR укажува на помала зависност од надворешниот снабдувач и поголема енергетска автономија.

3.6.3. Стапка на споделување енергија

Стапката на споделување енергија (ESR)²³ го претставува односот помеѓу количеството енергија споделена меѓу членовите на заедницата и вкупната потрошена енергија во ЗОИЕ. Овој индикатор ја опишува интензивноста на енергетската соработка и степенот на користење на механизмите за споделување во рамки на ЗОИЕ. ESR се пресметува според следната формула:

$$ESR = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N p_i^{sh,b}(t) \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T p_N^{dem}(t) \cdot \Delta t} \quad (3.50)$$

3.6.4. Однос на произведена и потрошена енергија

Односот на произведената и потрошената енергија (GTDR)²⁴ во рамки на ЗОИЕ се пресметува како:

$$GTDR = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N p_i^{PV}(t) \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T p_N^{dem}(t) \cdot \Delta t} \quad (3.51)$$

²² Кратенката SSR доаѓа од англискиот термин – self-sufficiency rate (SSR)

²³ Кратенката ESR доаѓа од англискиот термин – energy sharing rate (ESR)

²⁴ Кратенката GTDR доаѓа од англискиот термин – generation to demand ratio (GTDR)

ГЛАВА 4. ВЛИЈАНИЕ НА ТАРИФНИТЕ СИСТЕМИ ВРЗ РАБОТЕЊЕТО НА ЗОИЕ И ПАРАМЕТРИТЕ НА ДИСТРИБУТИВНАТА МРЕЖА

Во оваа глава е спроведена анализа за влијанието на различните тарифни системи за електрична енергија врз работењето на ЗОИЕ и врз ДМ. Во истражувањето е употребен МЦЛП моделот претставен во Глава 3, кој овде се применува на репрезентативна студија на случај за хипотетичка ЗОИЕ. Целта на анализата е да се оцени влијанието на различни тарифни системи врз техничките индикатори на ЗОИЕ и врз техничките параметри на мрежата, вклучувајќи ги повратните текови на моќност, загубите во мрежата и напонските профили.

Преку оваа анализа, се разгледува заемното дејство меѓу економските механизми и техничките аспекти на работењето на ЗОИЕ, со цел да се добие подлабоко разбирање за начинот на кој тарифните системи влијаат врз нивната ефикасност, стабилност и интеграција во ДМ. Резултатите од анализата обезбедуваат основа за идно подобрување на тарифните модели кои ќе овозможат поголема енергетска флексибилност и поефикасно локално користење на обновливите извори на енергија.

4.1. Опис и поставеност на студијата на случај

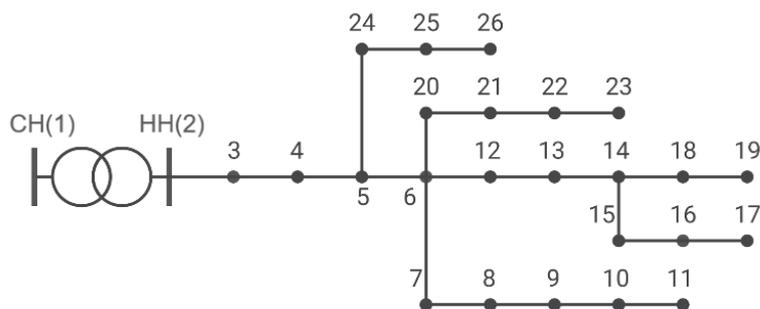
Во продолжение е опишана студијата на случај спроведена со цел да се анализира енергетската динамика на хипотетичка ЗОИЕ. Студијата опфаќа повеќе иновативни аспекти, меѓу кои третирање на ЗОИЕ како мултиенергетски систем, примена на различни тарифни модели, споделување на енергија меѓу членовите на заедницата и анализа на техничките параметри поврзани со ДМ. Посебна предност на оваа студија е нејзината висока репродукцибилност, која овозможува лесна адаптација на моделот за различни регионални контексти преку едноставно прилагодување на влезните податоци за производство од ФВ генератори и цените на електричната енергија.

4.1.1. Конфигурација на ЗОИЕ и дистрибутивната мрежа

Анализирана е хипотетичка ЗОИЕ, која се состои од повеќе потрошувачи или производители-потрошувачи. Секој од нив поседува различна комбинација на ФВ генератори, БССЕ и ЕВ. Заедницата поседува и топлинска пумпа со интегрирано топлинско складиште, која се користи за локално централно греење. Таа е дел од НН ДМ, која опфаќа и потрошувачи кои не се членови на ЗОИЕ. Целта на ова истражување е да се оцени влијанието на различните тарифни системи и стимули врз распределбата на енергијата во рамки на заедницата, а потоа и врз оперативните параметри на ДМ.

Анализирана е радијална НН ДМ со еден напоен јазол и 24 потрошувачки јазли, прикажана на Слика 4.1. Разгледуваната мрежа е конструирана за потребите на оваа студија, при што топологијата и параметрите на водовите и трансформаторот се избрани така што да бидат репрезентативни за типична НН ДМ. Истата мрежна конфигурација е користена и во други истражувања и ваквиот пристап е во согласност со вообичаената пракса во релевантната научна литература [80], [81]. На секој јазол е поврзан различен потрошувач или производител-потрошувач.

Производителите-потрошувачи се куќи со едно домаќинство (SFH)²⁵, куќи со повеќе домаќинства (MFH)²⁶ или станбени згради (AB)²⁷, при што секој објект поседува различна комбинација на ФВ генератор, БССЕ и/или ЕВ со полнач. Покрај нив, во мрежата е вклучено и училиште со 100 kWp ФВ генератор и БССЕ, како и топлинска пумпа со складиште на топлинска енергија. Мрежата дополнително содржи и 10 потрошувачи (кои се SFH, MFH или станбени згради) кои не поседуваат ФВ, БССЕ и ЕВ.



Слика 4.1. Приказ на анализираната ДМ.

Во Табела 4.1 е даден преглед на потрошувачите или производител-потрошувач во секој јазол од мрежата со инсталираните капацитети на ФВ генератор, БССЕ, батеријата на ЕВ и полначот за ЕВ. Топлинската пумпа во јазол 4, која се користи за централно локално греење, има инсталирана електрична моќност од 65 kW, додека системот за складирање на топлинска енергија има капацитет од 260 kWh.

Табела 4.1. Тип на потрошувач во секој јазол и инсталирани капацитети на ФВ генератор, БССЕ, батерија на ЕВ и полнач за ЕВ.

Јазол	Тип	Инсталирана моќност на ФВ (kWp)	Капацитет на БССЕ (kWh)	Капацитет на батеријата на ЕВ (kWh)	Моќност на полначот за ЕВ (kW)
3	AB	0	0	80	11
4	Топлинска пумпа	0	0	0	0
5	Училиште	100	25	0	0
6	SFH	6	6,6	0	0
7	MFH	0	0	60	7
8	AB	15	11,7	70	11
9	SFH	6	0	50	7
10	SFH	0	0	0	0
11	SFH	0	0	60	7
12	SFH	5	6,4	60	7

²⁵ Кратенката SFH доаѓа од англискиот термин – single-family house (SFH)

²⁶ Кратенката MFH доаѓа од англискиот термин – multi-family house (MFH)

²⁷ Кратенката AB доаѓа од англискиот термин – apartment building (AB)

Јазол	Тип	Инсталирана моќност на ФВ (kWp)	Капацитет на БССЕ (kWh)	Капацитет на батеријата на ЕВ (kWh)	Моќност на полначот за ЕВ (kW)
13	MFH	8	0	60	7
14	SFH	3	0	0	0
15	MFH	0	0	0	0
16	SFH	6	0	0	0
17	SFH	0	0	0	0
18	SFH	8	0	50	7
19	SFH	0	0	0	0
20	AB	0	0	0	0
21	MFH	0	0	0	0
22	MFH	10	6,6	80	7
23	SFH	0	0	0	0
24	SFH	6	0	0	0
25	SFH	5	6,4	0	0
26	SFH	0	0	60	7

Хипотетичката ЗОИЕ се состои од 12 резиденцијални производители-потрошувачи, едно училиште и топлинската пумпа за централно греење. За да се оценат придобивките од споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата, студијата разгледува две сценарија:

1. со можност за споделување енергија меѓу членовите и
2. без можност за споделување, каде што целата произведена, но непотрошена енергија од локалните генератори се предава во мрежата.

Останатите 10 потрошувачи не се дел од заедницата и не учествуваат во споделувањето на енергија во ниту едно од сценаријата.

4.1.2. Влезни податоци

Сите влезни податоци користени во анализата се земени за датум 15.3.2021 година на територијата на Австрија. Профилите на потрошувачка на електрична и топлинска енергија за потрошувачите и производителите-потрошувачи се добиени од софтверската апликација nPro [82]. Оваа апликација генерира типични реалистични податоци за потрошувачка на електрична и топлинска енергија за различни типови објекти, за голем број светски држави. Австрија е избрана бидејќи nPro обезбедува висококвалитетни, репрезентативни и технички конзистентни профили за оваа земја, што овозможува реалистична и методолошки стабилна анализа.

Времињата на пристигнување и заминување на ЕВ, заедно со нивните дневни профили на мобилност, се симулирани со употреба на податоци од распределби на веројатност. Дневните патни растојанија потоа се користат за пресметка на состојбата на наполнетост на батеријата на ЕВ при пристигнување. Користените

распределби на веројатност се преземени од [83]. На овој начин се добиваат реалистични и репрезентативни податоци за ЕВ, со цел да се симулира нивното однесување во рамки на оваа студија. Претпоставената просечната потрошувачка на електрична енергија за сите ЕВ е 0,15 kWh/km.

За пресметка на енергијата произведена од ФВ генератори е употребена алатката PVGIS [84], од која се добиени часовни профили на производство, врз основа на базата на податоци за сончево зрачење SARAH-2 [85], при претпоставка на оптимална ориентација и наклон на панелите. Бидејќи временскиот чекор на податочниот сет е 1 час, податоците за потрошувачка се усогласени со истиот временски интервал и усреднети на часовни вредности.

Ценовните компоненти на електричната енергија користени во анализата се преземени од базата на податоци Eurostat, која ги содржи просечните компоненти на цената на електричната енергија за домаќинства за 2021 година [61]. За случаите анализирани во наредното поглавје каде што се користи динамички тарифен систем за енергија, цените на електричната енергија се преземени од ENTSO-E базата на податоци за цени на пазарот ден-однапред [86], за анализираниот датум, 15.3.2021.

Анализите се спроведени за еден репрезентативен 24-часовен период, кој припаѓа на пролетна сезона со умерено производство од ОИЕ и изразена варијабилност и во побарувачката и во пазарните цени на електричната енергија. Овој датум е избран со цел да се избегнат екстремни услови, како што се многу високи ФВ приноси во летниот период или изразено високи оптоварувања во зимски услови. Иако анализата е ограничена на еден ден, добиените резултати се генерализираат, бидејќи тие ја одразуваат суштинската интеракција помеѓу тарифните системи, флексибилноста на потрошувачката и ограничувањата на ДМ. Влијанието на тарифните механизми врз однесувањето на ЗОИЕ е очекувано да се манифестира на сличен начин и во други временски периоди, при различни нивоа на производство и побарувачка.

4.1.3. Анализирани тарифни системи

За да се истражи влијанието на различни тарифни системи врз енергетската динамика и техничките индикатори на ЗОИЕ, како и нивното влијание врз оперативните параметри на ДМ, анализирани се осум различни тарифни системи, дизајнирани за поттикнување на споделувањето енергија во рамки на ЗОИЕ. Од нив, четири сценарија користат рамна тарифа за преземена електрична енергија, додека другите четири применуваат динамичка часовна тарифа што ги рефлектира пазарните цени на електричната енергија ден однапред. Кај двата вида тарифи, тарифните системи се дополнително поделени според механизмот за поддршка на споделувањето енергија:

1. линеарно намалување на мрежните трошоци за споделената енергија,
2. линеарно намалување на мрежните трошоци за споделената енергија, без надомест за електричната енергија предадена во мрежата,
3. линеарно намалување на мрежните трошоци за споделената енергија и трошоци за врвна ангажирана моќност и
4. мрежни трошоци според време на користење (ToU) и намалување на мрежните трошоци за споделена енергија според времето на користење (ToU).

За поедноставување, овие тарифни системи се означени како F1, F2, F3, F4, D1, D2, D3 и D4, каде што буквата „F“ означува рамна²⁸, а „D“ означува динамичка²⁹ тарифа за преземена енергија, додека броевите 1–4 се однесуваат на соодветните механизми за поддршка наведени погоре.

Овие тарифни системи се избрани бидејќи секој од нив претставува различен пристап за стимулирање на споделувањето енергија во рамки на ЗОИЕ. Целта на студијата е да се оцени влијанието на секој тарифен систем врз енергетската динамика на ЗОИЕ и на ДМ, без влијание од надворешните варијации во производството од обновливите извори или побарувачката на потрошувачите. За сите дефинирани сценарија, инсталираните капацитети на ФВ генератори, БССЕ и батериите и полначите на ЕВ, како и електричната и топлинската побарувачка, остануваат константни, со што се овозможува изолирање на влијанијата од различните тарифни системи.

Во ценовната компонента C^b е вклучена цената за преземена електрична енергија, односно пазарниот дел од крајната цена. Компонентата $C^{\text{reg},b}$ ги опфаќа сите регулирани трошоци, кои вклучуваат: мрежни трошоци, данок на додадена вредност (ДДВ), давачки за обновлива енергија и за животна средина, како и други пропишани надоместоци. Кај регулираните трошоци за споделена енергија $C^{\text{reg},sh,b}$, со цел поттикнување на енергетското споделување, во цената се вклучени само половина од мрежните трошоци и ДДВ, додека членовите на ЗОИЕ се ослободени од сите останати регулирани трошоци за енергијата што ја споделуваат.

Во сценаријата D1, D3 и D4, претпоставено е дека динамичките цени за енергија преземена од и предадена во мрежата се еднакви: $C^b = C^s$. Временски зависните регулирани трошоци, во системите F4 и D4, користат двотарифен систем за енергијата преземена од мрежата $C^{\text{reg},b}$ и од заедницата $C^{\text{reg},sh,b}$. Високата тарифа (ВТ) важи во периодот од 17:00 до 23:00 часот, а ниската (НТ) од 23:00 до 17:00 часот следниот ден. За овие две ценовни компоненти е претпоставено следново:

- За $C^{\text{reg},b}$:
 - ВТ ги вклучува ДДВ, даноците за обновлива енергија и животна средина, сите останати давачки, а мрежните трошоци се зголемени и се пресметуваат како 150% од нивната основна вредност,
 - НТ ги вклучува истите даноци и давачки, но само мрежните трошоци се намалени и се пресметуваат како 50% од нивната основна вредност.
- За $C^{\text{reg},sh,b}$:
 - ВТ вклучува ДДВ и 0,8 пати од мрежните трошоци,
 - НТ вклучува ДДВ и 0,4 пати од мрежните трошоци.

Во Табела 4.2 е даден детален преглед на сите ценовни компоненти употребени во секој од тарифните системи. Моделите што користат премии за поттикнување на споделување енергија не се разгледани во оваа анализа, па затоа соодветните компоненти $C^{\text{prem},sh,b} = C^{\text{prem},sh,s} = 0$ не се вклучени во табелата. Регулираните трошоци за предадена енергија кон мрежата и кон заедницата $C^{\text{reg},s} = C^{\text{reg},sh,s} = 0$ во сите сценарија, и затоа исто така не се прикажани во табелата.

²⁸ Ознаката F е одбрана според англискиот термин – flat

²⁹ Ознаката D е одбрана според англискиот термин – dynamic

Табела 4.2. Преглеа на ценовните компоненти за анализираниите тарифни системи.

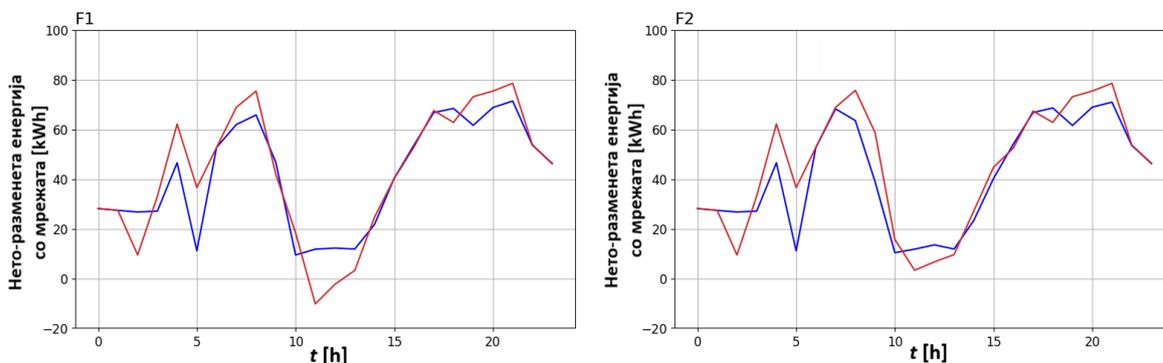
Ценовна компонента	F1	F2	F3	F4	D1	D2	D3	D4
C^b (€/MWh)	74,5	74,5	74,5	74,5	динамичка	динамичка	динамичка	динамичка
C^s (€/MWh)	30	0	30	30	динамичка	0	динамичка	динамичка
$C^{sh,b}$ (€/MWh)	60	60	60	60	60	60	60	60
$C^{sh,s}$ (€/MWh)	60	60	60	60	60	60	60	60
$C^{reg,b}$ (€/MWh)	150,6	150,6	150,6	BT: 184,4 HT: 116,8	150,6	150,6	150,6	BT: 184,4 HT: 116,8
$C^{reg,sh,b}$ (€/MWh)	71,3	71,3	71,3	BT: 91,58 HT: 64,54	71,3	71,3	71,3	BT: 91,58 HT: 64,54
C^{cap} (€/MWh)	0	0	30	0	0	0	30	0

4.2. Резултати и дискусија

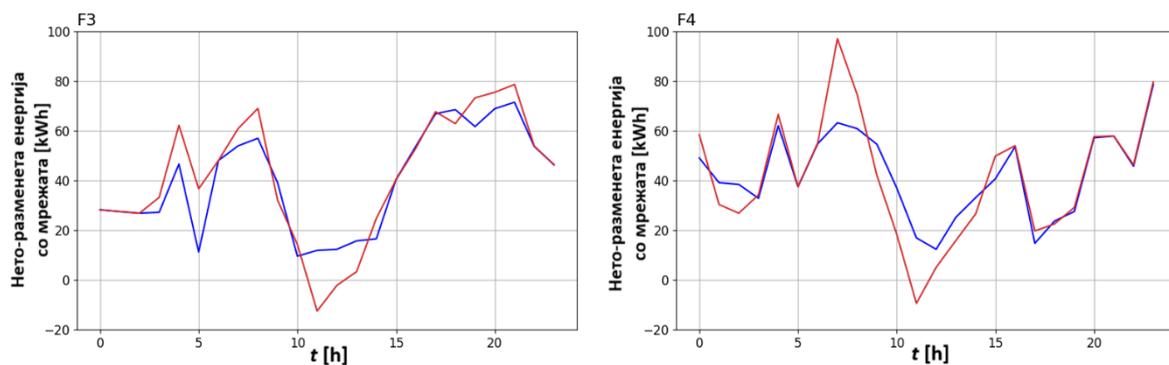
МЦП оптимизацискиот модел претставен во Глава 3 се користи за анализирање на работата на ЗОИЕ под сите претходно дефинирани услови. Моделот овозможува добивање на дневните профили на нето-размена на енергија со ДМ за анализираната заедница. За да се оцени влијанието на дефинираните тарифни сценарија врз оперативните параметри на мрежата, спроведена е анализа на текови на моќност на добиените дневните профили на нето-размена на енергија за секој потрошувач во НН мрежа. Целта на анализата е да се обезбедат подлабоки сознанија за тоа како различните тарифни системи и механизми за споделување на енергија, влијаат врз мрежната динамика, стабилноста и вкупната ефикасност на системот.

4.2.1. Енергетска динамика на ЗОИЕ и технички параметри

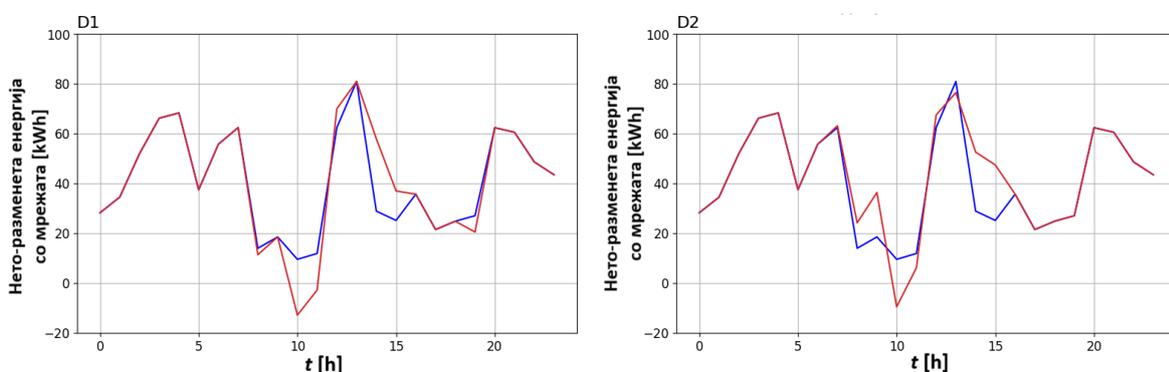
На Слика 4.2-Слика 4.5 се прикажани дневните дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата во рамки на тарифните системи F1, F2, F3, F4, D1, D2, D3 и D4, за двата дефинирани случаи: кога на членовите на ЗОИЕ им е дозволено и кога не им е дозволено споделување на енергија.



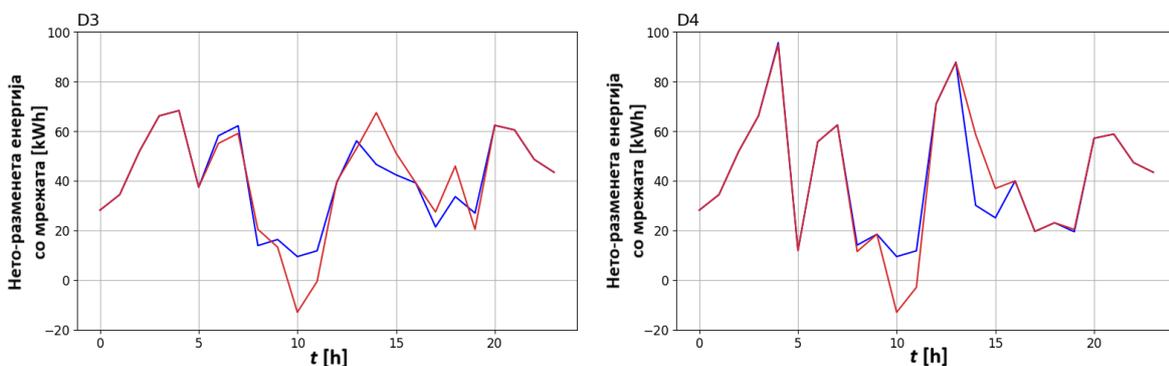
Слика 4.2. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи F1 и F2, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.



Слика 4.3. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи F3 и F4, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.



Слика 4.4. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи D1 и D2, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.

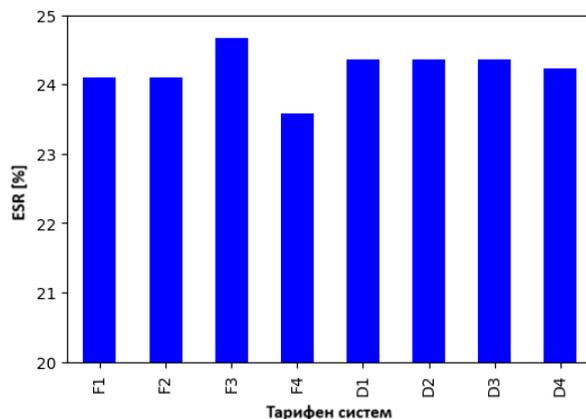


Слика 4.5. Дневни дијаграми на нето-размена на енергија со мрежата за целата анализирана ДМ за тарифните системи D3 и D4, со овозможено (сина боја) и без овозможено (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите на заедницата.

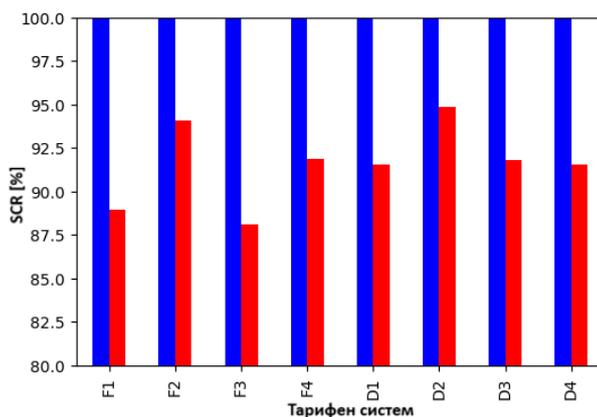
Од резултатите јасно се забележува дека споделувањето на енергија значително придонесува за намалување на врвните оптоварувања и ублажување на појавата на повратни текови на моќност. Ова укажува на позитивното влијание на споделувањето на енергија врз стабилноста и ефикасноста на мрежата, што носи придобивки и за заедницата, и за пошироката мрежна инфраструктура.

На Слика 4.6, Слика 4.7 и Слика 4.8 се прикажани вредностите на стапката на споделување енергија (ESR) во случај кога е овозможено споделување меѓу

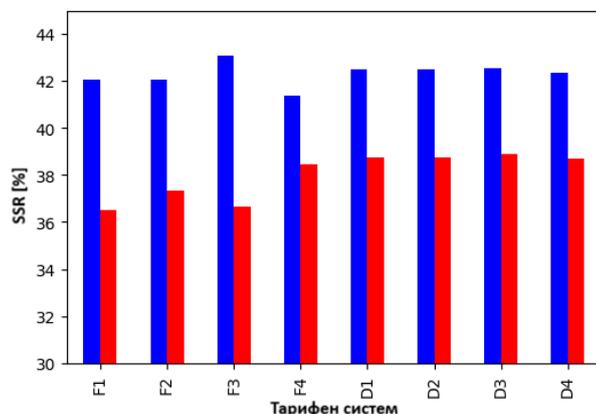
членовите на заедницата, како и стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и стапката на енергетска независност (SSR) за двата случаи: со и без споделување на енергија. Овие индикатори даваат увид во нивото на енергетска независност на ЗОИЕ и во нејзината способност ефикасно да ја користи локално произведената енергија од ОИЕ и во нејзиното ниво на енергетска независност.



Слика 4.6. Стапка на споделување енергија (ESR) за анализираната ЗОИЕ за секој тарифен систем, во случај кога е овозможено споделување на енергија меѓу членовите.



Слика 4.7. Стапка на сопствена потрошувачка (SCR) за анализираната ЗОИЕ при секој тарифен систем, со (сина боја) и без (црвена боја) споделување на енергија меѓу членовите.



Слика 4.8. Стапка на енергетска независност (SSR) за анализираната ЗОИЕ при секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).

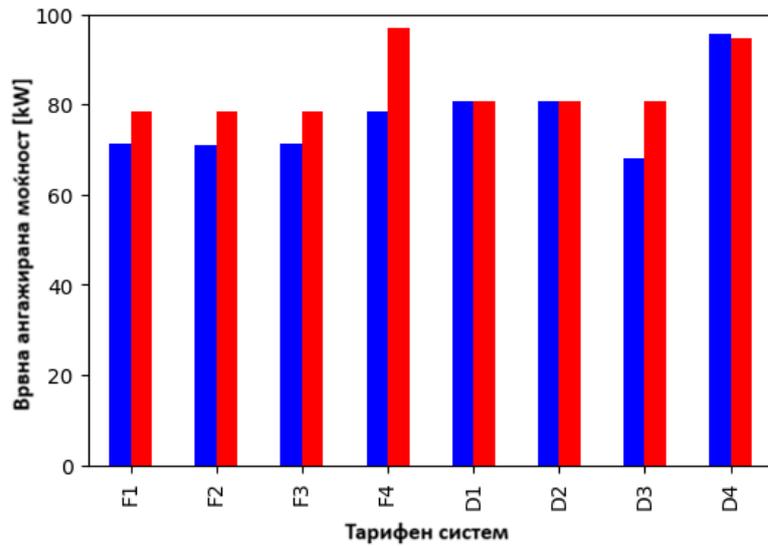
Од прикажаните графици може да се забележи дека тарифните системи кои вклучуваат динамичка цена за енергија, што ја рефлектира дневната пазарна цена, а особено D1, D2 и D3, најмногу ги стимулираат членовите на ЗОИЕ да споделуваат електрична енергија. Тарифниот систем F3, кој користи рамна цена за енергија и трошоци за врвна ангажирана моќност, покажува слична стапка на енергетска независност (SSR) и дури повисока стапка на споделување енергија (ESR), но значително пониска стапка на сопствена потрошувачка (SCR) во споредба со D1–D3. Спротивно на тоа, тарифниот систем F4, кој комбинира рамна цена за енергија со двотарифни регулирани трошоци според време на користење (ToU), покажува слична вредност за SCR, но пониски вредности за ESR и SSR во однос на динамичките тарифи.

Кога е дозволено споделување на енергија, SCR на заедницата е 100% за сите тарифни системи, што може да се заклучи и од дневните дијаграми на нето-размена со мрежата дадени на Слика 4.2-Слика 4.5, каде што заедницата не предава електрична енергија во мрежата во ниту едно сценарио со споделување. Јасно е дека SSR и SCR се значително пониски за сите тарифни системи во случај кога не е дозволено споделување на енергија меѓу членовите.

4.2.2. Оперативни параметри на дистрибутивната мрежа

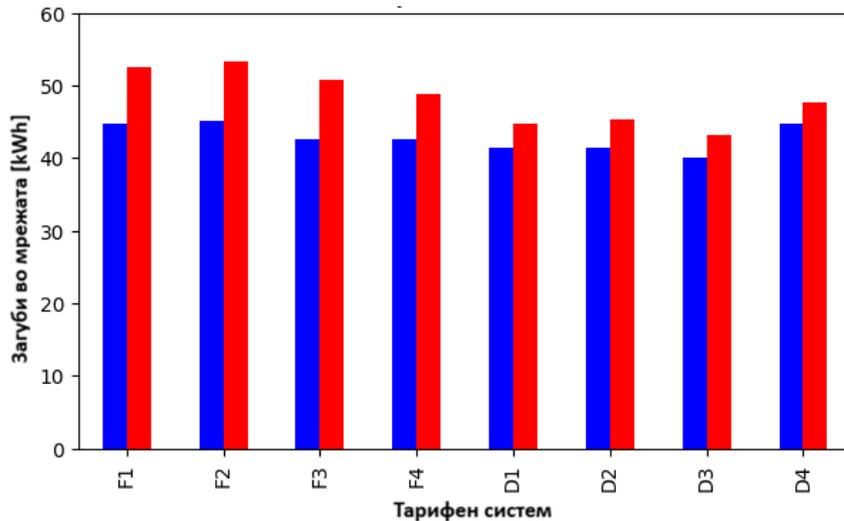
Зголемувањето на сопствената потрошувачка во мрежата може да влијае врз оперативните параметри на системот, како што се стабилноста на напонот, оптоварувањето на системот и загубите. Тарифните системи треба да создаваат поволни услови за повисоко ниво на сопствена потрошувачка, истовремено земајќи ги предвид овие параметри. Во продолжение се прикажани резултатите од анализата на текови на моќност спроведена за ДМ при секој тарифен систем. На Слика 4.9 се прикажани вредностите на врвната моќност за анализираната мрежа, при сите тарифни системи и во двата случаи: со и без овозможено споделување на енергија меѓу членовите на заедницата. Кога е овозможено споделувањето на енергија, динамичките тарифи доведуваат до повисока врвна ангажирана моќност, со исклучок на сценариото D3, кое вклучува трошоци за ангажирана моќност. Во услови без споделување врвната ангажирана моќност останува слична кај рамните и кај динамичките тарифи.

Слично како и кај техничките индикатори на ЗОИЕ поврзани со споделувањето на енергија, динамичките тарифи покажуваат поповолни резултати. Ова е особено изразено кај тарифните системи D1, D2 и D3, при што D3 резултира со најниски загуби од сите анализирани сценарија. Намалувањето на загубите во мрежата претставува значајна придобивка за операторот на ДМ. Прво, помалите загуби значат намалени трошоци за набавка на енергија во мрежата, што директно води до финансиски заштеди. Дополнително, намалувањето на загубите резултира со порамномерно оптоварување на гранките на мрежата, со што се намалува механичкото и топлинското напрегање на инфраструктурата. Ова пак, овозможува одложување на потребата од инвестиции за проширување и зајакнување на ДМ, вклучувајќи изградба на нови капацитети и надградба на постојните. Во суштина, главната придобивка се состои во намалената и одложена потреба за капитални инвестиции, што придонесува за поголема економичност, ефикасност и одржливост во работењето на операторот на дистрибутивниот систем.



Слика 4.9. Врвна ангажирана моќност на анализираната ДМ за секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).

Слика 4.10 ги прикажува загубите во мрежата за анализираниот ден, за секое од разгледаните сценарија, со и без овозможено споделување на енергија меѓу членовите на заедницата. Јасно се забележува дека овозможувањето на споделување на енергија во рамки на заедницата води до намалени загуби во мрежата.

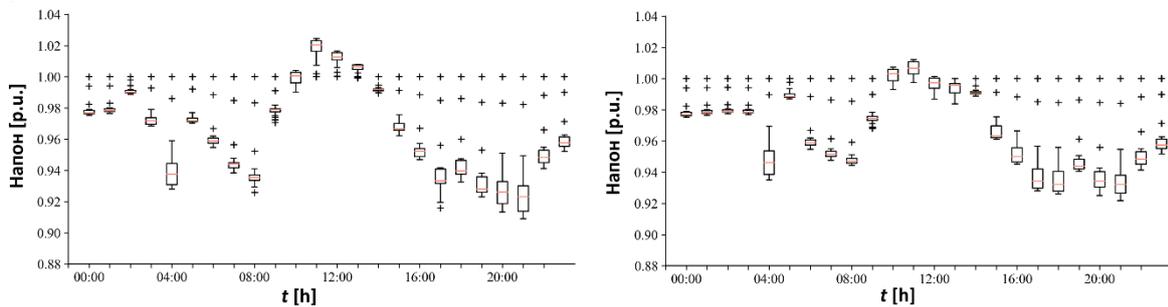


Слика 4.10. Загуби во мрежата во анализираната ДМ за секој тарифен систем, кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата е дозволено (сина боја) и не е дозволено (црвена боја).

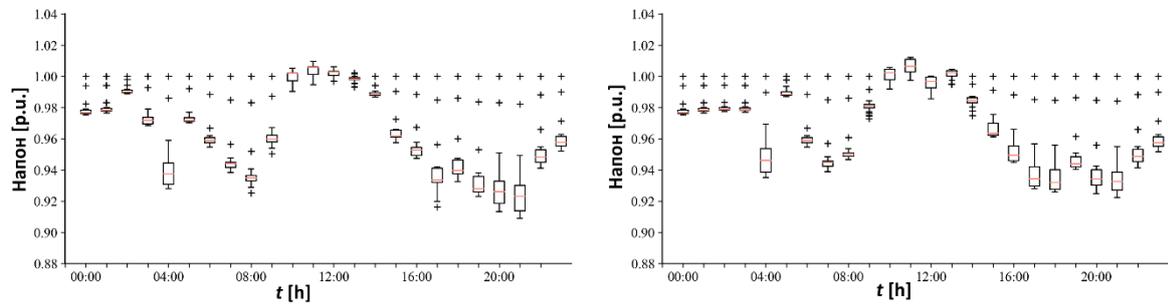
Напонските профили на ДМ за анализираните тарифни системи се прикажани на Слика 4.11-Слика 4.18. Анализата на добиените резултати открива неколку клучни согледувања:

- Сценаријата со овозможено споделување на енергија покажуваат значително поизмазнети напонски профили кај сите тарифни системи во споредба со сценаријата без споделување.

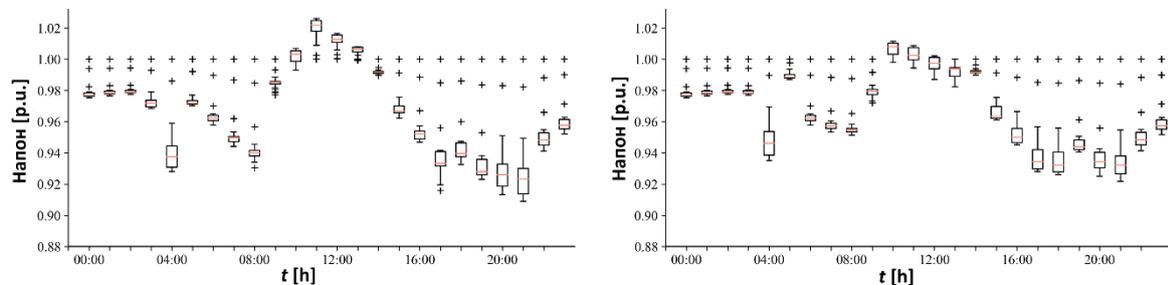
- Кога не е овозможено споделување енергија, кај динамичките тарифни системи (сценарија D1–D4) постои поголем ризик од појава на високи напони во однос на рамните тарифни системи (сценарија F1–F4). Оваа појава се должи на фактот дека динамичките цени ја стимулираат потрошувачката во периоди со пониски цени на енергија, што доведува до повремени високи напони во мрежата. Ова може да се забележи и на Слика 4.9, од каде се гледа дека динамичките тарифи резултираат со поголеми врвни оптоварувања, со исклучок на тарифата D3, која вклучува трошоци за врвна ангажирана моќност.
- Кога е овозможено споделувањето енергија, кај динамичките тарифни системи (сценарија D1–D4) се забележуваат пократкотрајни високи напони во споредба со рамните тарифни системи (сценарија F1–F4).



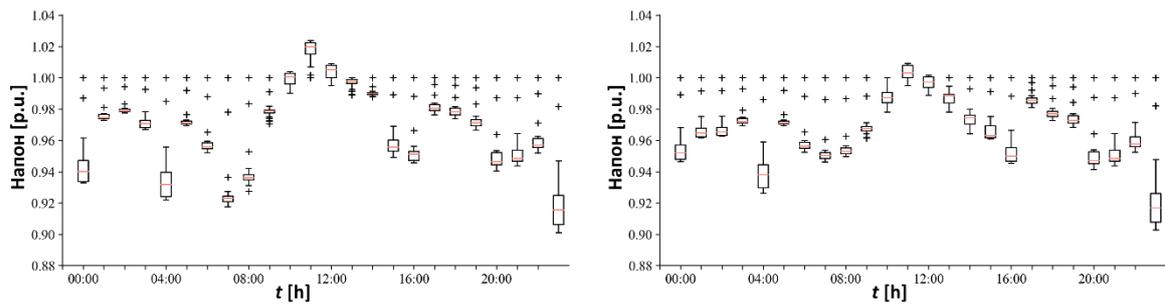
Слика 4.11. Тарифен систем F1: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



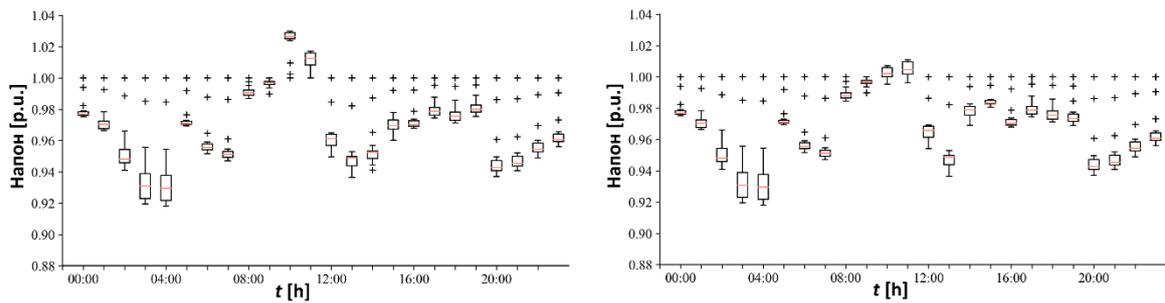
Слика 4.12. Тарифен систем F2: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



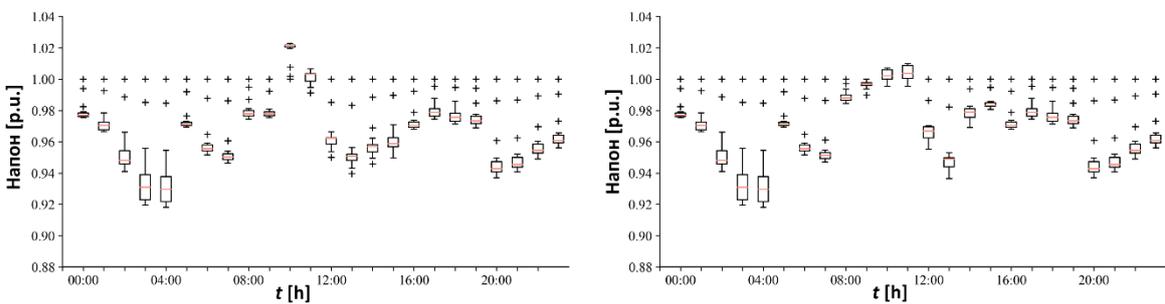
Слика 4.13. Тарифен систем F3: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



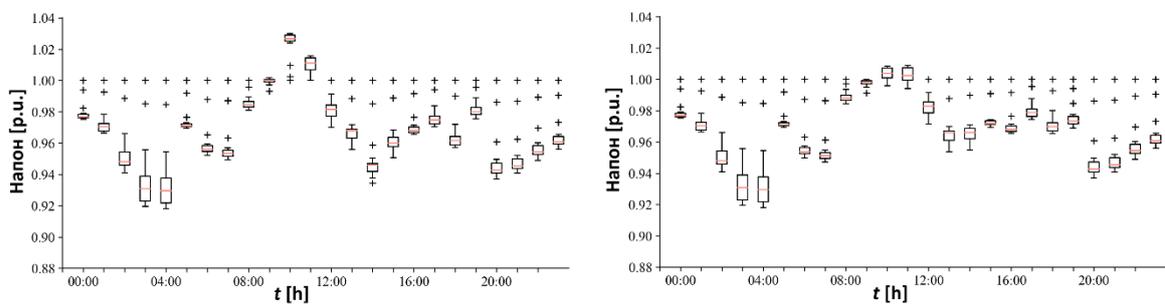
Слика 4.14. Тарифен систем F4: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



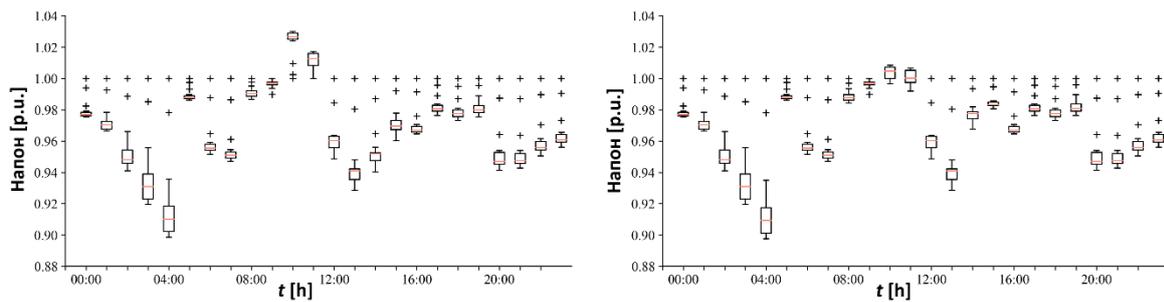
Слика 4.15. Тарифен систем D1: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



Слика 4.16. Тарифен систем D2: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



Слика 4.17. Тарифен систем D3: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).



Слика 4.18. Тарифен систем D4: напонски профил на ДМ кога споделувањето на енергија меѓу членовите на заедницата не е дозволено (лево) и кога е дозволено (десно).

Резултатите од анализата покажуваат дека тарифните системи кои го поддржуваат споделувањето енергија во ЗОИЕ можат значајно да ги подобрат перформансите на заедницата. Овозможувањето на споделување на енергија меѓу членовите дава поволни резултати за сите анализирани параметри и доведува до:

- намалување на врвните оптоварувања,
- намалување повратните текови на моќност,
- намалување на енергетските загуби и
- поизмазнети напонски профили.

Тарифните системи кои вклучуваат динамичка цена на електричната енергија дополнително ги засилуваат овие придобивки, бидејќи создаваат поволни услови за зголемено споделување на енергија во заедницата. Меѓутоа, кога споделувањето не е дозволено, динамичките тарифи доведуваат до поизразени високи напони во однос на рамните тарифи. При овозможено споделување, овие високи напони се пократкотрајни и помалку изразени. Истовремено, врвната ангажирана моќност кај динамичките тарифи се зголемува кога споделувањето е овозможено, со исклучок на тарифата D3, заради присуството на трошок за врвна ангажирана моќност.

Овие резултати сугерираат дека динамичките тарифи треба да се комбинираат со стимули за споделување на енергијата за да се минимизираат негативните технички ефекти и да се максимизираат придобивките за ЗОИЕ. Од анализата може да се заклучи дека тарифните системи кои комбинираат динамичка цена за енергија со надомест за капацитет претставуваат најсоодветен поттик за споделување на енергија во ЗОИЕ, додека истовремено имаат позитивно влијание врз оперативните параметри на ДМ.

ГЛАВА 5. МОЖНОСТИ ЗА ИНТЕГРАЦИЈА НА ЕВ ВО ЗОИЕ

Во оваа глава се презентираат две анализи кои ги истражуваат можностите за интеграција на ЕВ во рамките на ЗОИЕ. Целта на овие анализи е да се прикажат реални и применливи пристапи за подобра искористеност на локално произведената енергија и за подобрување на енергетската флексибилност на ЗОИЕ.

Првото истражување е студија на случај, која ги разгледува импликациите од вклучување надворешни сопственици на ЕВ во ЗОИЕ лоцирани во претежно станбени подрачја. Надворешните корисници ги полнат своите возила преку ден, во периоди со високо производство од ФВ системите, кога возилата на членовите на заедницата вообичаено не се присутни. Овој концепт овозможува подобро усогласување на производството и потрошувачката на електрична енергија во рамки на ЗОИЕ, зголемувајќи ги стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и стапката на енергетска независност (SSR) на заедницата.

Анализата го оценува техничкото влијание врз мрежата, економските ефекти за заедницата и надворешните корисници, како и чувствителноста на резултатите на различните механизми за поддршка.

Во рамки на второто истражување е извршена статистичка анализа на влијанието на бројот на ЕВ и моќноста на полначите врз SCR, SSR и врвната ангажирана моќност. Анализата ги квантифицира зависностите меѓу параметрите на инфраструктурата за полнење и енергетските перформанси на заедницата, што овозможува пообјективно планирање и оптимизација на идните ЗОИЕ.

Двете студии заедно придонесуваат кон подлабоко разбирање на интеракцијата меѓу ЕВ и ЗОИЕ, прикажувајќи дека електричните возила не се само потрошувачи на енергија, туку и интегративен елемент што може да ја зголеми ефикасноста, економската исплатливост и одржливоста на ЗОИЕ.

5.1. Интеграција на надворешни сопственици на ЕВ во резиденцијални ЗОИЕ

Искористувањето на потенцијалот на паметното полнење на електрични возила не е само технолошко прашање поврзано со поставување физичка и дигитална инфраструктура, туку и регулаторно и социјално прашање кое бара создавање соодветни услови за негово практично остварување. Во овој контекст, ЗОИЕ претставуваат погодна рамка за развој на нови бизнис модели, меѓу кои и концептот за споделување на заедничка инфраструктура за полнење на ЕВ со надворешни корисници.

Околу 42% од европските домаќинства имаат ограничени можности за инсталирање приватни полначи [87], што создава побарувачка за алтернативни модели на пристап до инфраструктура за полнење [88]. Ова резултира со појава на комерцијални решенија засновани на споделена или заеднички финансирана инфраструктура [89], како и платформи што овозможуваат приватни сопственици да нудат пристап до своите полначи, како Co Charger [90] и PlugShare [91]. Во рамки на ЗОИЕ, споделувањето на полначи во сопственост на заедницата со надворешни корисници може да создаде заемна економска корист: членовите на заедницата ја

зголемуваат стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и добиваат дополнителни приходи преку механизмите за поддршка на споделувањето енергија, додека надворешните корисници добиваат пристап до поекономично полнење во споредба со комерцијалните станици.

5.1.1. Студија на случај

Спроведена е студија на случај со користење на моделот претставен во Глава 3. Студијата има за цел да анализира хипотетичка ЗОИЕ која претставува станбена зграда со повеќе станови, која се состои од 30 домаќинства, колективен ФВ генератор со инсталирана моќност од 100 kW_p, и 10 полначи за ЕВ. Од овие домаќинства, 10 поседуваат ЕВ. Во текот на работниот ден, дополнителни 5 ЕВ од надворешни корисници ги користат полначите на заедницата. Студијата се фокусира на:

- оценување на стапката на сопствена потрошувачка на заедницата и
- испитување на придобивките од вклучувањето на ЕВ чии сопственици се надворешни учесници во заедницата во процесот на споделување на енергија.

Анализата е спроведена за три различни месеци: февруари, јуни и октомври, избрани така да претставуваат различни временски услови и варијации во побарувачката на енергија во текот на годината. Целта е да се оцени работењето на заедницата под различни сценарија и да се добијат сознанија за нејзината енергетска динамика.

За да се оцени влијанието од вклучувањето на надворешни учесници-сопственици на ЕВ во заедницата, анализата е спроведена за две сценарија:

1. Анализата ги вклучува само профилите на потрошувачка и производство на 30-те домаќинства во рамките на ЗОИЕ. Ова овозможува дефинирање на референтно сценарио за стапката на сопствена потрошувачка и другите енергетски и економски индикатори.
2. Анализата дополнително ја вклучува потрошувачката на електрична енергија за полнење на петте надворешни ЕВ, кои ги користат полначите на заедницата за време на работните часови во денот. Целта е да се квантифицираат придобивките што произлегуваат од нивното вклучување, преку споредба на резултатите од двете сценарија.

Студијата треба да обезбеди докази за применливоста и ефикасноста на предложениот модел во реални услови на функционирање на енергетска заедница. Преку анализа на енергетската динамика на заедницата во периоди кога надворешни сопственици на ЕВ се вклучени во нејзиното работење, и тоа во различни годишни времиња, се прикажуваат потенцијалните придобивки од интеграцијата на дополнителни учесници во насока на зголемување на економската добивка, стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и оптимизација на енергетската размена во рамките на заедницата. За целите на ова истражување, хипотетичката ЗОИЕ е поставена во Холандија, земја која се издвојува како една од европските држави со највисока застапеност на ЕВ [83].

Времињата на пристигнување и заминување на ЕВ, како и дневните растојанија на патување, просечната потрошувачка и капацитетот на батеријата, се

симулирани на ист начин како во 4.1.2, каде што постапката е подетално објаснета. Врз основа на овие податоци е пресметана и количеството на енергија во батериите на ЕВ при пристигнување.

Профилите на потрошувачка на електрична енергија на членовите на заедницата се преземени од базата на податоци [92]. Множеството содржи мерења на потрошувачка на 200 домаќинства добиени од теренска студија со временски интервал од 15 минути. Од овој сет се избрани 30 домаќинства за месеците: февруари, јуни и октомври. Избраните домаќинства имаат годишна потрошувачка меѓу 2500 и 5000 kWh, што ја одразува просечната годишна потрошувачка на европските домаќинства (3700 kWh) [93] и може да се смета како репрезентативна за типични холандски домаќинства.

За пресметка на енергијата произведена од ФВ генератор е употребена алатката PVGIS [84]. Генерирани се часовни профили на производство за главниот град на Холандија, користејќи ги податоци од базата SARAH-2 [85], при претпоставка на оптимална ориентација и наклон на ФВ-панелите. Бидејќи временскиот чекор на податочниот сет е 1 час, податоците за потрошувачка се усреднети на часовни вредности.

Цените на електричната енергија користени во анализата се преземени од базата на податоци Eurostat, која ги содржи просечните компоненти на цената за домаќинства за 2021 година [61]. Вредностите на поединечните ценовни компоненти користени во оваа студија се прикажани во Табела 5.1. Останатите ценовни компоненти кои можат да бидат вклучени во оптимизацискиот модел, како што е прикажано во (3.2), имаат вредност нула и не се вклучени во табелата.

Анализирани се енергетската динамика и економските придобивки на заедницата под два тарифни системи, од кои едниот вклучува механизам за поттикнување на споделувањето енергија. Механизмот за поддршка е во форма на рамно намалување на мрежните трошоци за споделената енергија во рамките на заедницата и е изразен преку ценовната компонента $C^{reg,sh,b}$. Овој тарифен систем одговара на сценариото F1, претставено во поглавје 4.1.3.

Табела 5.1. Ценовни компоненти вклучени во анализата за оваа тарифна система

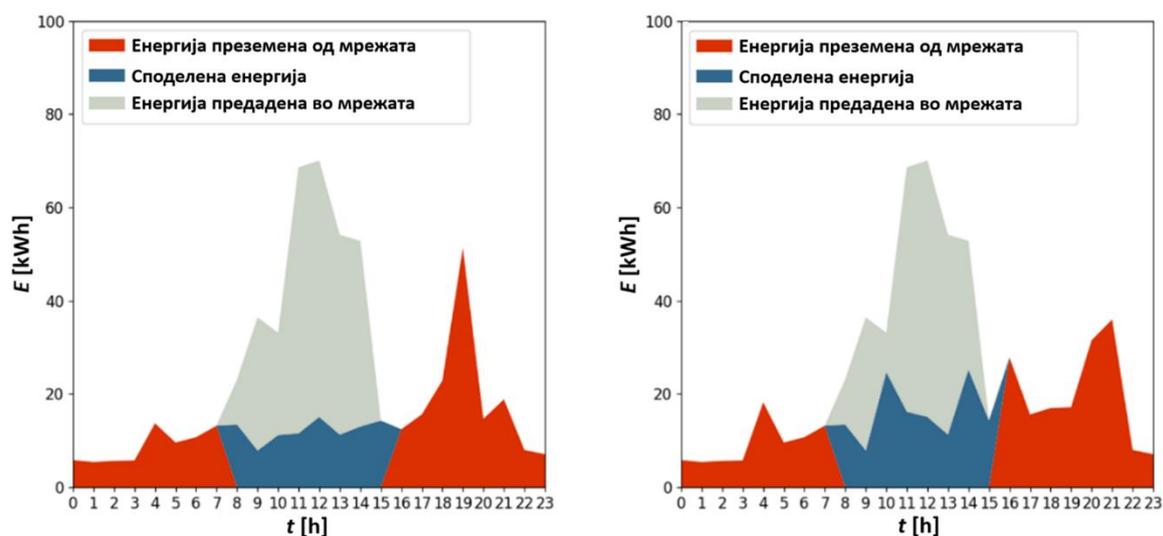
Ценовна компонента	Тарифен систем 1: без механизам за поддршка на споделување енергија (€/MWh)	Тарифен систем 2: намалени мрежни трошоци за споделена енергија (F1) (€/MWh)
C^b	79,2	79,2
C^s	35	35
$C^{sh,b}$	60	60
$C^{sh,s}$	60	60
$C^{reg,b}$	116,6	116,6
$C^{reg,sh,b}$	116,6	55,15

5.1.2. Резултати и дискусија

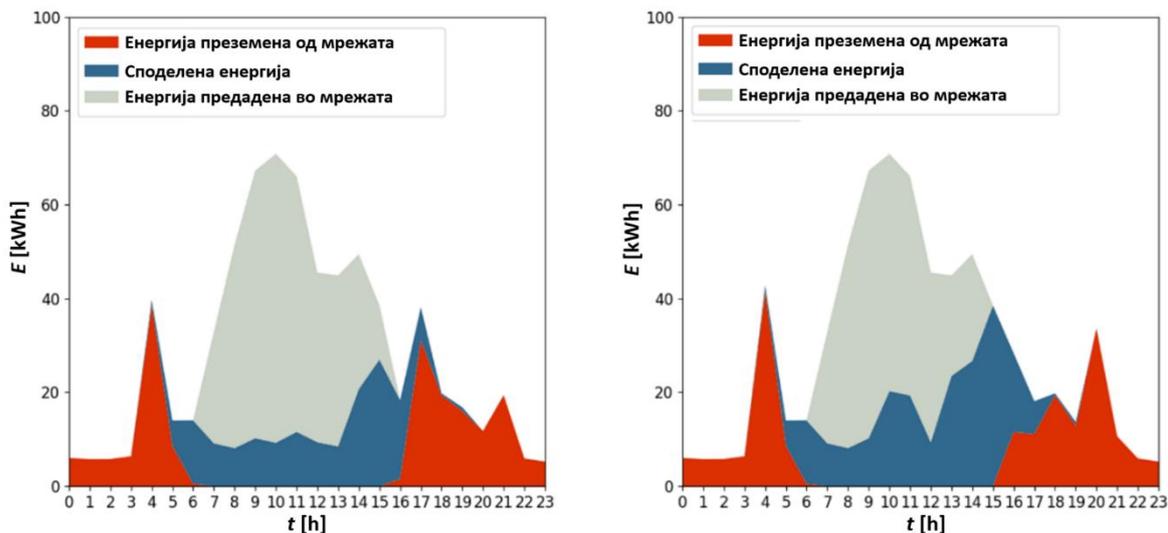
МЦЛП оптимизацискиот модел е имплементиран со користење на програмскиот јазик Python и библиотеката за оптимизација Puomo. Оптималното решение обезбедува податоци за преземената и предадената електрична енергија од и во мрежата за секој член на заедницата и за секој временски чекор од анализата, како и за количината на енергија споделена меѓу членовите на ЗОИЕ. Врз основа на овие резултати и користејќи ги цените од тарифните системи прикажани во Табела 5.1, се пресметуваат вкупните трошоци на заедницата и на надворешните сопственици на ЕВ, што овозможува оценување на економските придобивки во двете сценарија, со и без надворешни учесници, и под два различни тарифни системи.

5.1.2.1. Технички и економски ѓвриаобивки

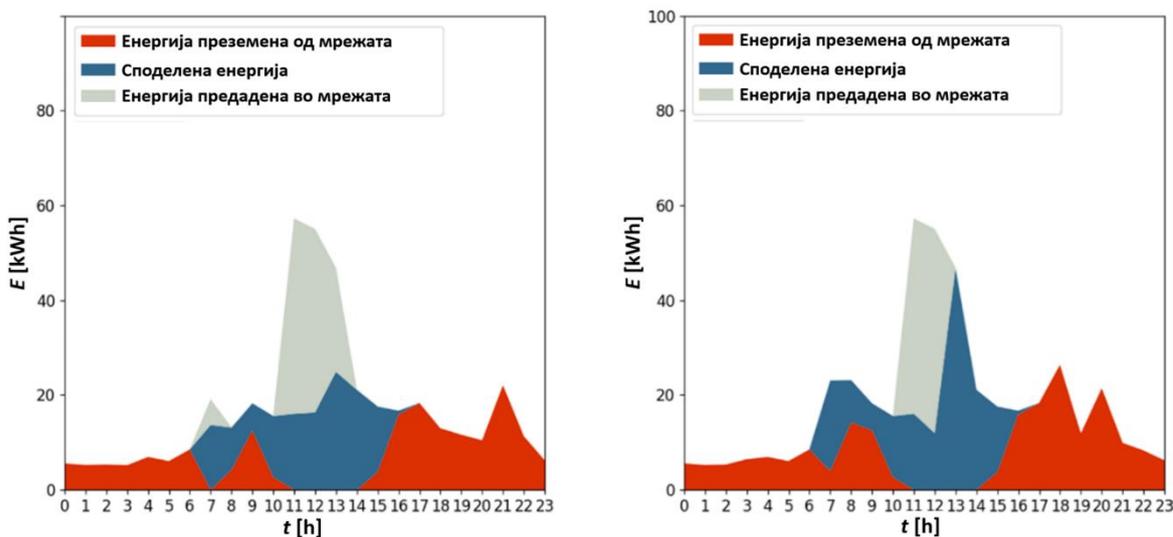
За да се прикаже разликата меѓу двете сценарија и влијанието од полнењето на надворешните ЕВ во текот на денот врз споделената енергија во заедницата, на Слика 5.1-Слика 5.3 се прикажани дневни дијаграми за типичен ден за секој од анализираните месеци. Вкупната потрошувачка на електрична енергија во ЗОИЕ е претставена како збир на црвената и сината област. На левата страна се прикажани дневните дијаграми за сценарио 1 – основното сценарио без надворешни ЕВ, а на десната страна се прикажани дијаграмите за сценарио 2, каде што се вклучени ЕВ од надворешни учесници. Овие дијаграми ги илустрираат разликите во потрошувачката и споделувањето на енергија, овозможувајќи визуелно разбирање на енергетската динамика на заедницата во двете сценарија. Црвената област на графиконите ја претставува енергијата преземена од мрежата, сивата област ја претставува енергијата предадена во мрежата, додека сината област ја претставува енергијата споделена меѓу членовите на заедницата.



Слика 5.1. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во февруари (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).



Слика 5.2. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во јуни (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).



Слика 5.3. Дневен енергетски биланс за типичен ден на енергетската заедница во октомври (лево: сценарио 1, десно: сценарио 2).

Табела 5.2. Сџајка на сојсџвена појшрошвачка (SCR) и сџајка на енерџејска независносџ (SSR) за авејџе анализирани сиенарија.

	Февруари		Јуни		Октомври	
	Сценарио 1	Сценарио 2	Сценарио 1	Сценарио 2	Сценарио 1	Сценарио 2
SCR	0,56	0,69	0,39	0,45	0,61	0,72
SSR	0,23	0,26	0,51	0,54	0,24	0,26

За да се проценат економските придобивки на заедницата, потребно да се воспостави метод за распределба на трошоците за електрична енергија меѓу заедницата и надворешните корисници на ЕВ. За таа цел, се предлага цената на енергијата што надворешниот корисник i ја плаќа на заедницата c_i^{ext} да се

пресметува за одреден временски период, пр. месечно, земајќи го предвид односот меѓу енергијата што ја презел од локалниот генератор на заедницата и вкупната енергија што ја користи за полнење на своето возило, според следниот израз:

$$c_i^{\text{ext}} = \sum_{t=1}^T p_i^{\text{EV}}(t) \left(c_i^{\text{sh,b}}(t) + c_i^{\text{reg,b}}(t) + \left(c_i^{\text{b}}(t) - c_i^{\text{sh,b}}(t) \right) \cdot \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^T p_i^{\text{sh,b}}(t)}{\sum_{t=1}^T p_i^{\text{EV}}(t)} \right) \right) \quad (5.1)$$

Оттука, цената c_i^{ext} за секој од надворешните сопственици на ЕВ е дефинирана така што важи: $c_i^{\text{sh,b}} + c_i^{\text{reg,sh,b}} \leq c_i^{\text{ext}} \leq c_i^{\text{b}} + c_i^{\text{reg,b}}$. На овој начин се обезбедува заемна корист за членовите на заедницата и за надворешните учесници.

Заштедите за двете страни, се пресметани преку споредба на вкупните трошоци за електрична енергија што би ги платиле во двете сценарија, односно:

- трошокот што заедницата и надворешните корисници на ЕВ би го имале кога возилата се полнат на полначите на заедницата и
- трошокот што надворешните корисници на ЕВ би го имале кога би ги полнеле возилата одделно, плаќајќи ја редовната цена на снабдувачот.

Резултатите од оваа анализа се прикажани во Табела 5.3. Од резултатите може да се забележи дека економските придобивки за заедницата се релативно ниски. Сепак, вреди да се истакне дека доколку за членовите на заедницата се воведат олеснувања во однос на даноците и дополнителните давачки за енергијата што ја споделуваат меѓусебно, нивните економски придобивки би се зголемиле значително. Овој аспект е подетално анализиран во продолжение.

Табела 5.3. Вквѝни месечни трошоци за електрична енергија на членовите на заедницата и надворешните учесници за сценаријата 1 и 2, и намалување на трошоците за авѝе гровѝ.

Месец	Сценарио 1		Сценарио 2		Заштеди [%]	
	Трошоци на ЗОИЕ [€]	Трошоци на надворешните учесници (платени на снабдувачот) [€]	Трошоци на ЗОИЕ [€]	Трошоци на надворешните учесници (платени на ЗОИЕ) [€]	Заштеди за ЗОИЕ [%]	Заштеди за надворешните учесници [%]
Февруари	1679,53	198,36	1656,98	186,97	1,34%	5,74
Јуни	1176,51	185,03	1144,68	168,81	2,71%	8,77
Октомври	1675,59	217,71	1656,28	207,30	1,15%	4,78

5.1.2.2. Економски придобивки при намалување на регулираните трошоци

Придобивките од намалувањето на регулираните трошоци за споделената енергија во рамки на енергетските заедници се детално анализирани во [23]. Со цел

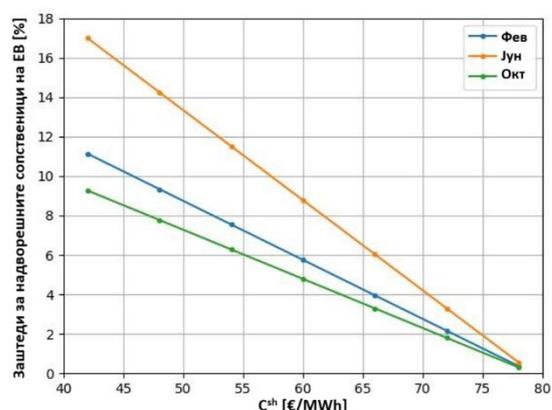
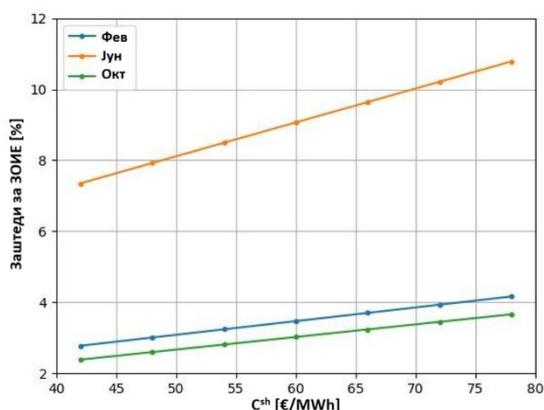
да се истражи овој потенцијал, спроведени се симулации за двете претходно разгледани сценарија, при што тарифниот систем вклучува механизам за поддршка на споделувањето енергија во форма на намалени мрежни трошоци за споделената енергија.

Компонентите на цената на електричната енергија во ова сценарио се идентични со оние во претходното сценарио без механизам за поддршка, со исклучок на ценовната компонента $c^{\text{reg,sh,b}}$, која ја претставува сумата на сите регулирани трошоци за електрична енергија преземена од заедницата, како што е прикажано во Табела 5.1.

Резултатите добиени за овој тарифен систем се прикажани во Табела 5.4. Тие укажуваат на значително зголемување на економските придобивки за заедницата кога се применуваат вакви ослободувања. Овие наоди ја потенцираат можноста за економски придобивки доколку членовите на заедницата се стимулираат да споделуваат енергија преку намалување на трошоците за споделената енергија. Ова претставува важна насока за понатамошно истражување во рамките на енергетските и регулаторните политики.

Табела 5.4. Вквџни месечни трошоци за електрична енергија на членовите на заедницата и надворешните корисници на ЕВ за сценаријата 1 и 2. и намалување на трошоците за оветите жрвџи при примена на рамно намалување на мрежните трошоци за енергијата споделена меѓв членовите на заедницата.

Месец	Сценарио 1		Сценарио 2		Заштеди [%]	
	Трошоци на ЗОИЕ [€]	Трошоци на надворешните учесници (платени на снабдувачот) [€]	Трошоци на ЗОИЕ [€]	Трошоци на надворешните учесници (платени на ЗОИЕ) [€]	Заштеди за ЗОИЕ [%]	Заштеди за надворешните учесници [%]
Февруари	1540,13	198,36	1486,71	186,97	3,47%	5,74%
Јуни	885,41	185,03	805,14	168,81	9,07%	8,77%
Октомври	1524,54	217,71	1481,37	207,30	3,02%	4,78%



Слика 5.4. Анализа на чувствителност на економските придобивки за: (лево) членовите на заедницата и (десно) надворешните корисници на ЕВ, со разгледување на варијации од $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ и $\pm 30\%$ на цената по која членовите на заедницата споделуваат енергија, за трите анализирани месеци.

Дополнително, спроведена е анализа на чувствителност за економските придобивки на членовите на заедницата и надворешните корисници на ЕВ, во однос на варијациите на цената по која членовите на заедницата ја споделуваат енергија. Разгледаните варијации изнесуваат $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ и $\pm 30\%$ од ценовните компоненти $C^{sh,b}$ и $C^{sh,s}$. Резултатите од оваа анализа се прикажани на Слика 5.4 и укажуваат дека економските придобивки на заедницата растат пропорционално со овие ценовни компоненти, додека придобивките на надворешните учесници се намалуваат соодветно.

5.2. Статистичка анализа на влијанието на бројот на ЕВ и моќноста на полначите врз енергетските индикатори на ЗОИЕ

Во ова поглавје е спроведена систематска анализа на влијанието на бројот на ЕВ и моќноста на полначите врз стапката на сопствена потрошувачка (SCR), стапката на енергетска независност (SSR) и врвната ангажирана моќност во рамки на хипотетичка ЗОИЕ. Анализата е спроведена преку симулации на повеќе сценарија со различни нивоа на застапеност на ЕВ и различни капацитети на полначи. Наодите од овие анализи имаат цел да го поддржат оптималното планирање и димензионирање на идните ЗОИЕ.

5.2.1. Регресивна анализа

Оваа студија го истражува влијанието на интеграцијата на електрични возила и инфраструктурата за полнење врз оперативните перформанси на ЗОИЕ. Фокусот е ставен на три клучни индикатори на перформанси:

- стапката на сопствена потрошувачка (SCR),
- стапката на енергетска независност (SSR) и
- врвната ангажирана моќност на заедницата.

Овие индикатори се клучни за проценка на внатрешната ефикасност на енергетските заедници, но и на нивните интеракции со поширокиот електроенергетски систем.

Податочното множество за оваа анализа е добиено симулациски. Употребен е МЦЛП оптимизацискиот модел за да се симулира хипотетичката ЗОИЕ сочинета од 100 домаќинства кои поседуваат ФВ генератори со вкупна инсталирана моќност од 120 kWp. Анализирани сценарија варираат според:

- N_{EV} – застапеноста на електрични возила (0–50 возила, во чекори од 5);
- $P_{ch,max}$ – максималната моќност на полначите (3,7 kW; 7,4 kW; 11 kW; 22 kW);
- дванаесет стохастички профили на мобилност на електричните возила (случајни времиња на пристигнување и заминување и дневни енергетски потреби).

Ова резултира со 528 различни набљудувања за вредностите на трите горенаведени индикатори. Во статистичката анализа спроведена понатаму, независни променливи се бројот на електрични возила и моќноста на полначите, додека зависните променливи се SCR, SSR и врвната ангажирана моќност.

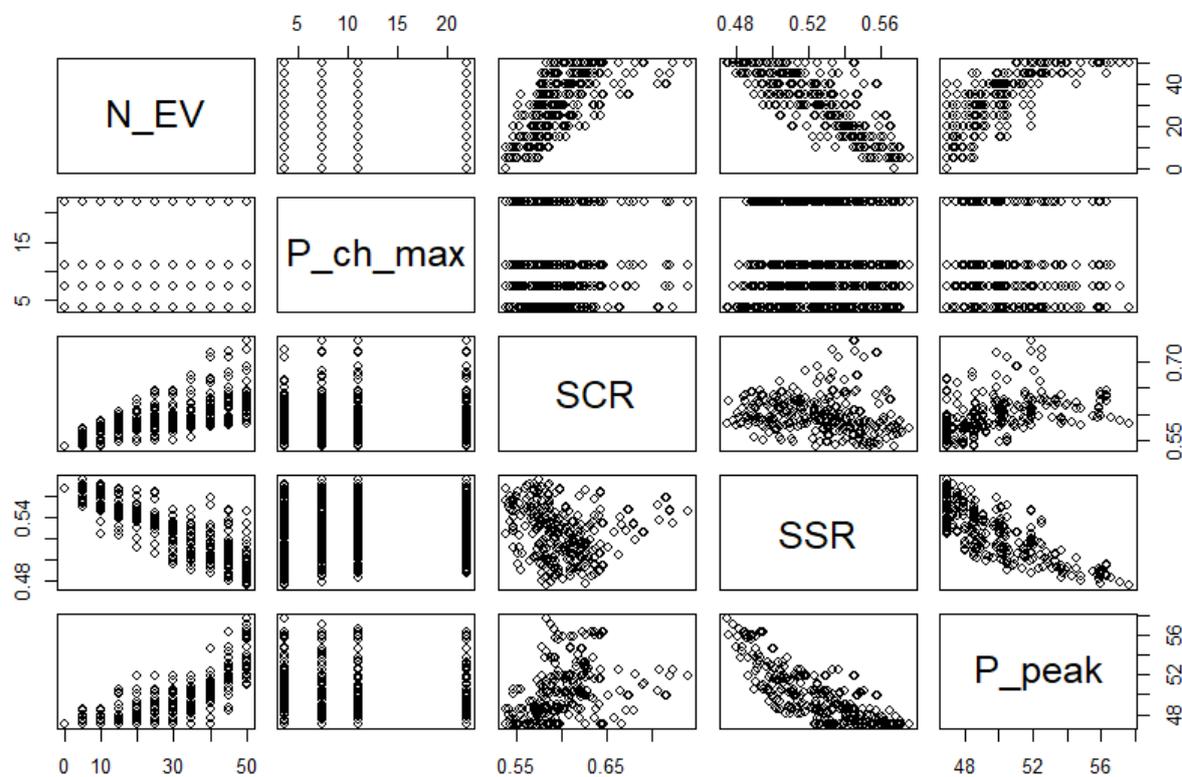
Статистичката анализа спроведена во рамките на ова истражување е извршена со користење на програмскиот јазик R.

5.2.1.1. Дескриптивни статистики и аналитички тестови

Секој примерок содржи податок за бројот на ЕВ вклучени во заедницата, врвната моќност на полнење на полначите изразена во kW и трите индикатори за перформансите на ЗОИЕ наведени погоре. Вредностите за SCR и SSR се пропорции во граници од 0,47-0,74, додека врвната ангажирана моќност P_{max} се движи во граници од 47-58 kW. Дескриптивните статистики за овие податоци се прикажани во Табела 5.5, а граfiците на корелација меѓу сите променливи се прикажани на Слика 5.5.

Табела 5.5. Дескриптивни статистики за зависните и независните променливи

Променлива	Минимум	Прв квантил	Медијана	Средна вредност	Трет квантил	Максимум
N_{EV}	0	10	25	25,0	40	50
$P_{ch,max}$	3,7	6,5	9,2	11,0	13,8	22,0
SCR	0,538	0,552	0,583	0,587	0,608	0,739
SSR	0,475	0,511	0,533	0,532	0,554	0,575
P_{max}	47,0	47,0	48,5	49,2	50,5	57,7



Слика 5.5. Корелација меѓу бројот на електрични возила, моќноста на полначите, стапката на сопствена потрошувачка (SCR), стапката на енергетска независност (SSR) и врвната ангажирана моќност

Пред процената на регресивните модели, изведени се низа дијагностички проверки. Прво, спроведена е корелацииска анализа и анализа на факторите на инфлација на варијансата (VIF). Корелацииската анализа потврдува дека не постои корелација помеѓу независните променливи, додека вредностите за факторот на инфлација на варијансата се $VIF = 1$ за двете независни променливи, што потврдува дека нема мултиколинеарност во моделот.

Потоа се поставени основните регресивни модели со примена на методот на најмали квадрати за секоја од зависните променливи и испитани се класичните регресиски претпоставки. Графиците на остатоците и тестот на Шапиро–Вилк укажуваат на отстапувања од нормалноста. Тестот на Бројш–Паган открива изразена хетероскедастичност. Статистиките на Дарбин–Ватсон имаат вредности блиску до нула (<2), што укажува на силна позитивна автокорелација на остатоците. Овој резултат е очекуван, со оглед на тоа дека податочното множество содржи секвенцијално генерирани оперативни точки. Резултатите од овие испитувања се дадени во Прилог 1.

5.2.1.2. Регресивни моаели и инференција

За надминување на идентификуваните проблеми се применети две стратегии. Прво, бидејќи SCR и SSR се вредности ограничени во интервалот $[0,1]$, врз нив е извршена логит-трансформација, со што променливите се пресликуваат на целата реална права и се овозможува поголема стабилност на варијансата на остатоците. Слично, бидејќи врвното оптоварување е строго позитивно и покажува десна асиметрија, применета е природна логаритамска трансформација, што ја намалува хетероскедастичноста.

Конечните спецификации на регресивните модели се:

$$\ln \frac{SCR}{1 - SCR} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{EV} + \beta_2 \cdot P_{ch,max} + \varepsilon \quad (5.2)$$

$$\ln \frac{SSR}{1 - SSR} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{EV} + \beta_2 \cdot P_{ch,max} + \varepsilon \quad (5.3)$$

$$\ln P_{max} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{EV} + \beta_2 \cdot P_{ch,max} + \varepsilon \quad (5.4)$$

Во овие равенки, коефициентите β_1 и β_2 ја изразуваат маргиналната промена на зависната променлива при зголемување на бројот на електрични возила и максималната моќност на полначите, соодветно. Коефициентот β_0 го претставува константниот член на моделите, а ε го претставува стохастичкиот член кој ги опфаќа ненабљудуваните фактори и случајните отстапувања.

Второ, за статистичката инференција се употребени HC3 стандардни грешки робусни на хетероскедастичност, кои овозможуваат корекција на променливата варијанса на остатоците. Со овие постапки се обезбедува валидност на интервалите на доверливост и p -вредностите. Резултатите од моделите се дадени во Табела 5.6, која ги прикажува вредностите на коефициентите, робусните стандардни грешки, нивоата на значајност и коефициентите на детерминација.

Интервалите на доверливост и t -тестовите покажуваат дека бројот на EV има силно позитивен и статистички значаен ефект врз SCR, негативен и значаен ефект

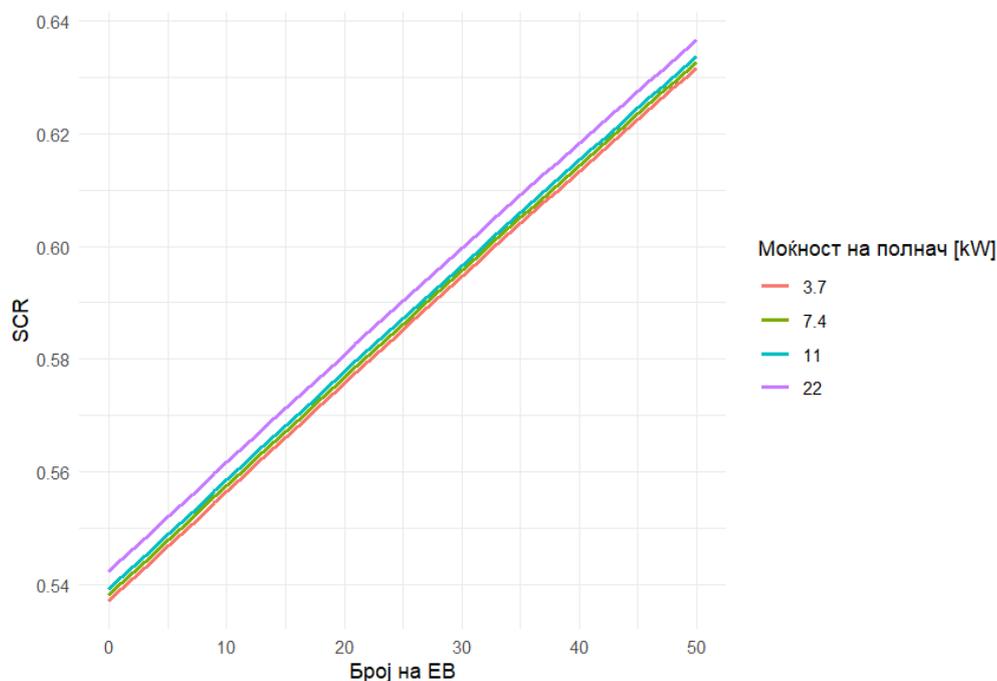
врз SSR, како и позитивен ефект врз врвното оптоварување, додека моќноста на полначите нема значајно влијание врз SCR, но има позитивно и значајно влијание врз SSR и негативно, умерено значајно влијание врз врвното оптоварување.

Табела 5.6. Резултати од регресијата со робусни HC3 стандардни грешки: (логит/лог-трансформирани модели)

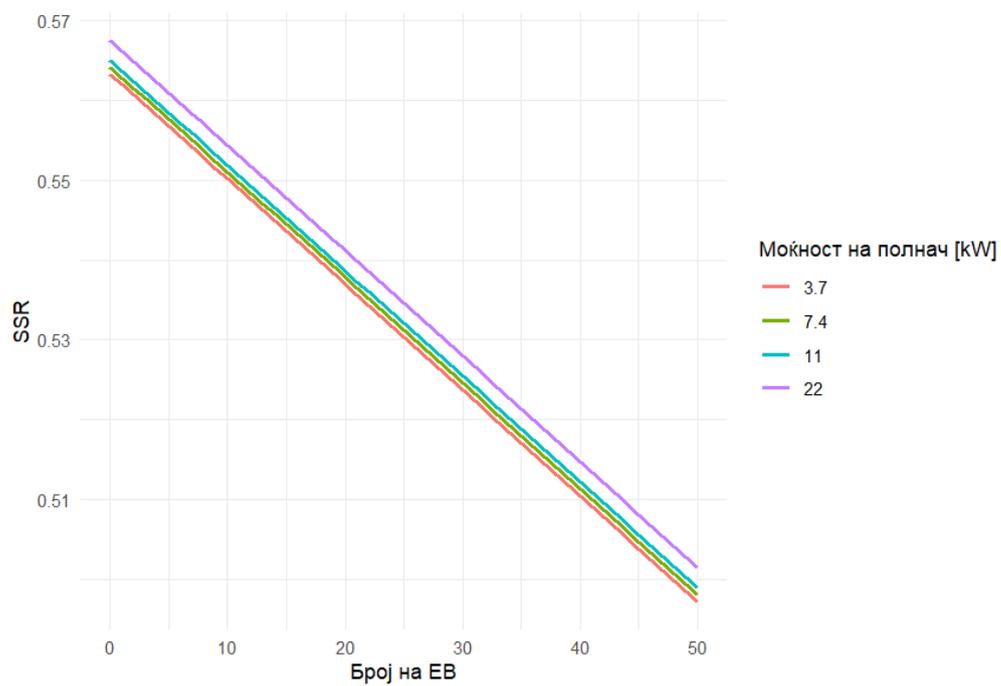
Параметар	SCR (logit)	SSR (logit)	Врвна ангажирана моќност (log)
β_0	0,144***	0,251***	3,841***
	(0,010)	(0,005)	(0,003)
β_1	0,0078***	-0,0053***	0,00236***
	(0,0003)	(0,00015)	(0,00009)
β_2	0,0012	0,00092**	-0,00042*
	(0,0007)	(0,00035)	(0,00020)
Примероци	528	528	528
R ²	0,56	0,70	0,57

Робусни HC3 стандардни грешки во заградите. + $p < 0,1$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

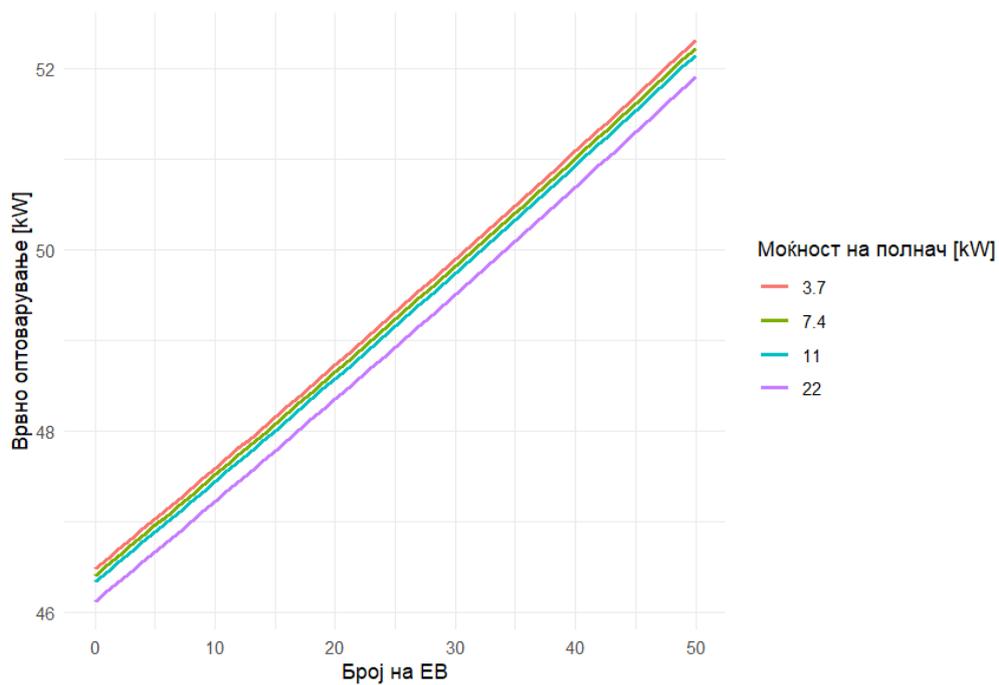
Графиконите на Слика 5.6-Слика 5.8 ги прикажуваат предвидените вредности на SCR, SSR и врвното оптоварување во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите. Од нив јасно се забележува дека бројот на ЕВ претставува доминантна независна променлива, при што SCR расте, SSR опаѓа, а врвното оптоварување се зголемува речиси линеарно со зголемување на нивната застапеност. Разликите помеѓу кривите за различни вредности на моќноста на полначите се релативно мали и се манифестираат како благо паралелно раздвојување, што укажува дека таа има секундарно влијание врз анализираниите индикатори во споредба со ефектот од бројот на ЕВ.



Слика 5.6. Предвидена стапка на сопствена потрошувачка (SCR) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите



Слика 5.7. Предвидена стапка на енергетска независност (SSR) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите



Слика 5.8. Предвидено врвно оптоварување (kW) во зависност од бројот на ЕВ, при различни максимални моќности на полначите

5.2.2. Дискусија на резултатите

Регресивната анализа покажува конзистентни и статистички робусни врски помеѓу интеграцијата на електрични возила, капацитетот на полначите и перформансите на симулираната енергетска заедница.

За поинтуитивна интерпретација на резултатите од анализата, применети се инверзни трансформации на оние употребени во моделите врз зависните променливи. За стапките на сопствена потрошувачка (SCR) и енергетска независност (SSR), кои се моделирани во логит-форма: $\text{logit}(p) = \ln \frac{p}{1-p}$, маргиналниот ефект на независната променлива x врз оригиналната величина е даден со:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \beta \cdot p \cdot (1 - p) \quad (5.5)$$

каде што p е оригиналната пропорција, а β е соодветниот коефициент на логит-скалата. Оваа формула покажува како мала промена на x се преведува во промени во процентните поени на SCR или SSR при просечните вредности.

За врвната ангажирана моќност, која беше трансформирана како $\log(y)$, обратната трансформација е поедноставна:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \beta \cdot y \quad (5.6)$$

така што влијанието на промената на независната променлива x врз оригиналната величина изразена во kW е еднаков на соодветниот коефициент β помножен со просечната врвна ангажирана моќност.

Зголемената застапеност на електрични возила во ЗОИЕ има силно позитивно влијание врз стапката на сопствена потрошувачка (SCR). Коефициентот $\beta_1 = 0,0078$, при просечна вредност на SCR од 0,587, се преведува во просечно зголемување на истата од околу 0,19 процентни поени по дополнително возило. Практично, додавањето на десет ЕВ ја зголемува SCR за речиси два процентни поени, што потврдува дека ЕВ делуваат како флексибилни потрошувачи кои ефикасно можат да го апсорбираат вишокот на произведена сончева енергија. Коефициентот $\beta_2 = 0,0012$ не покажува статистичка значајност, што укажува дека за зголемена стапка на сопствена потрошувачка, поголема улога има бројот на возила, отколку нивната моќност на полнење. Овие резултати се илустрирани на Слика 5.6.

За стапката на енергетска независност (SSR), проценетиот коефициент $\beta_1 = -0,0053$, што одговара на просечно намалување од околу 0,13 процентни поени по дополнително возило, при просечна вредност на SSR од 0,532. Така, десет дополнителни ЕВ ја намалуваат SSR за приближно 1,3 процентни поени. Ова го отсликува фактот дека иако електричните возила помагаат во искористување на локално произведената енергија, тие истовремено ја зголемуваат вкупната побарувачка. Капацитетот на полначите пак, има позитивен и статистички значаен ефект: секој дополнителен kW моќност на полнење ја зголемува SSR за околу 0,02 процентни поени. Ова сугерира дека инфраструктурата за полнење со повисок капацитет овозможува подобро усогласување на полнењето на ЕВ со локалното

производство на енергија, со што се подобрува SSR. Овие наоди се јасно визуелизирани на Слика 5.7: SSR опаѓа со зголемување на застапеноста на ЕВ, но расте со зголемувањето на моќноста на полначите.

За врвното оптоварување, коефициентот $\beta_1 = 0,00236$ укажува на зголемување од околу 0.12 kW по возило, при просечно врвно оптоварување од 49,2 kW. Практично, заедница со десет повеќе ЕВ може да очекува пораст на врвното оптоварување од околу 1,2 kW. Моќноста на полначите пак, покажува спротивен ефект: негативниот коефициентот $\beta_2 = -0,00042$ одговара на намалување на врвното оптоварување од приближно 0,02 kW по kW инсталирана моќност на полнење. Овие резултати се прикажани сликовито на Слика 5.8, која покажува дека врвното оптоварување стабилно расте со бројот на ЕВ, но се намалуваат со зголемувањето на моќноста на полнење.

Високата пенетрација на ЕВ, без соодветно димензионирана инфраструктура за полнење, може да предизвика повисоки врвни оптоварувања и пониски стапки на локална употреба на енергијата. Со правилно дизајнирана инфраструктура, ЕВ стануваат средство за поефикасна интеграција на ОИЕ и за намалување на стресот врз мрежата. Овие резултати се клучни за политиките на ЕУ, насочени кон развој на енергетски заедници и поголемо усвојување на ЕВ, бидејќи укажуваат на конкретните инфраструктурни услови неопходни за да се постигнат планираните енергетски и економски ефекти.

ГЛАВА 6. ЗАКЛУЧОК

Оваа докторска дисертација претставува истражување на интеграцијата на ЕВ во ЗОИЕ, со цел зголемување на оперативната флексибилност, економската ефикасност и техничката стабилност на локалните енергетски системи. Развиен е МЦЛП модел што го опишува оперативното однесување на ЗОИЕ и овозможува квантитативно оценување на ефектите од различни тарифни системи, стимули и стратегии за управување со енергијата, врз перформансите на заедницата и врз оптоварувањето на ДМ. Моделот ги опфаќа електричните и топлинските процеси, вклучувајќи батериски и термални системи за складирање, со што се моделираат внатрешните енергетски текови, распределбата на енергија меѓу членовите и размената со ДМ.

Резултатите добиени од анализите со примена на овој модел покажуваат дека дизајнот на тарифните системи и регулаторните механизми имаат суштинско влијание врз начинот на кој функционираат ЗОИЕ. Во студијата на случај спроведена за репрезентативна нисконапонска ДМ, се покажува дека тарифите со динамички цени за електричната енергија, заедно со трошоците за врвна ангажирана моќност, создаваат најповолни услови за зголемување на сопствената потрошувачка, енергетска независност и поефикасно споделување на енергија во ЗОИЕ. Кога споделувањето енергија меѓу членовите на заедницата е дозволено, тоа доведува до намалени врвни оптоварувања, пониски загуби во мрежата и поизмазнети напонски профили, што директно придонесува за подобрена стабилност и поефикасно користење на ДМ.

Анализите покажуваат дека механизмите за поддршка на споделувањето енергија, како намалени регулирани трошоци или прецизно структурирани даночни олеснувања, можат значително да ја подобрат економијата на ЗОИЕ, без да ги влошат клучните технички индикатори. Овие резултати укажуваат на јасни услови под кои економската одржливост на заедниците се зголемува и може да се поддржи со соодветни регулаторни механизми.

Втората група на истражувања, во рамки на оваа дисертација, се фокусира на интеракцијата меѓу ЕВ и ЗОИЕ, при што се анализираат нови модели на користење и управување со полнењето на електричните возила. Првата студија покажува дека овозможувањето дневно полнење на ЕВ од корисници кои не се членови на заедницата води до повисока стапка на сопствена потрошувачка и поцелосно искористување на локалното ФВ производство, особено во периодите со вишок енергија. Ваквиот пристап создава нови можности за развивање бизнис модели базирани на економијата на споделување, при што членовите на заедницата можат да остваруваат дополнителни приходи, а надворешните корисници да добијат пристап до поевтина и поодржлива услуга за полнење.

Втората студија, базирана на статистичка анализа на симулациски податоци, ја квантифицира зависноста меѓу бројот на ЕВ, моќноста на полначите и клучните индикатори на ЗОИЕ. Зголениот број возила и повисоките моќности ја подобруваат сопствената потрошувачка (SCR) и енергетската независност (SSR) на ЗОИЕ, но истовремено ја зголемуваат врвната ангажирана моќност. Ова бара јасни стратегии за ограничување на оптоварувањата и временска координација на полнењето, за да се максимизираат економските придобивки на заедницата без да се наруши техничката стабилност на мрежата.

Резултатите од овие студии се засновани на конкретен временски период и конкретни пазарни услови. Динамичната природа на пазарите на електрична енергија и достапноста на ОИЕ можат потенцијално да влијаат врз добиените резултати, па затоа изведените заклучоци важат во контекст на анализираните периоди. Ограничувања на истражувањето произлегуваат од идеализираните пазарни услови и претпоставеното идеално однесување на потрошувачите во оптимизацискиот модел. Јасното наведување на овие претпоставки обезбедува поголема прецизност и транспарентност на спроведените анализи. Затоа, следен чекор во ова истражување е вклучување на стохастички параметри во моделот со цел да се опфатат неодреденостите поврзани со пазарните услови, производството од ОИЕ, како и потрошувачката и однесувањето на сопствениците на ЕВ. Ова претставува природен следен чекор во развојот на моделот кон поголема реалистичност и применливост во динамични енергетски услови.

Сумирано, резултатите од оваа дисертација потврдуваат дека ЗОИЕ можат да играат централна улога во енергетската транзиција, особено преку интеграцијата на ЕВ како флексибилни потрошувачи, кои можат да обезбедат балансирање на производството и потрошувачката на локално ниво. Примената на оптимизацискиот модел предложен во оваа дисертација овозможува квантитативна анализа на интеракциите меѓу економските и техничките параметри на локалните енергетски системи и обезбедува основа за дизајн на регулаторни и пазарни механизми кои го поддржуваат нивното ширење и одржливост. Истражувањето придонесува кон научното знаење за оптимизација на ЗОИЕ, нагласувајќи ја интеграцијата на ОИЕ, ЕВ и производители-потрошувачи за максимизирање на ефикасноста, економичноста и одржливоста. Идните студии треба да ги испитаат факторите што влијаат врз долгорочната скалабилност и да предложат решенија за регулаторните, политичките и економските предизвици за ЗОИЕ.

6.1. Валидација на истражувачките хипотези

Врз основа на развиениот оптимизациски модел, спроведените симулации и анализи на студиите на случај, може јасно да се сумира валидацијата на поставените истражувачки хипотези.

Хипотеза 1 е потврдена преку компаративната анализа на различни тарифни системи претставена во Глава 4, при што резултатите покажуваат дека ценовните сигнали од тарифите значително го менуваат начинот на користење на распределените енергетски ресурси во ЗОИЕ. Различните тарифни модели доведуваат до различни нивоа на оптоварување на ДМ и различен степен на временска усогласеност помеѓу побарувачката и локалното производство, што директно ја потврдува зависноста меѓу тарифниот дизајн и оперативното однесување на заедницата.

Хипотеза 2 е потврдена преку анализите на сценаријата со овозможено споделување енергија, механизми за поддршка на споделувањето и интегрирани електрични возила во Глава 4. Резултатите покажуваат дека ваквите тарифни системи доведуваат до намалување на врвните оптоварувања и загубите во мрежата, без негативно влијание врз економската исплатливост на ЗОИЕ.

Хипотеза 3 е потврдена преку истражувањето презентирани во Глава 5.1 кое ја анализираат интеракцијата на ЗОИЕ со надворешни корисници на ЕВ.

Овозможувањето полнење на ЕВ на надворешни корисници води до зголемена искористеност на локално произведената енергија, повисока сопствена потрошувачка и создавање на нето економски и енергетски придобивки, со што се оправдуваат дополнителните инвестиции и организациски ангажмани.

Со цел да се обезбеди јасна и прегледна синтеза на истражувачките резултати, во Табела 6.1 е прикажана поврзаноста помеѓу поставените истражувачки хипотези, применетата методологија, анализираниите студии на случај и клучните резултати, како и нивниот научен придонес.

Табела 6.1. Поврзаност помеѓу хипотезите, методите и клучните резултати

Хипотеза	Методологија	Клучни резултати	Научен придонес
X1	МЦЛП оптимизација, тарифни сценарија	Промена на оптоварувањето на мрежата и усогласеноста побарувачка–производство	Влијание на тарифен дизајн врз ЗОИЕ
X2	Сценарија со споделување енергија	Намалени врвни оптоварувања и загуби без негативно економско влијание	Тарифна поддршка на флексибилност
X3	Моделите со надворешни корисници	Повисока SCR, нови приходи	Нови бизнис модели за ЗОИЕ

6.2. Придонес

Целта на ова истражување е да придонесе кон научната литература и практичниот развој на ЗОИЕ, со фокус на интеграцијата на ЕВ и тарифните системи. Придонесите опфаќаат оптимизација на работата на ЗОИЕ, моделирање на тарифите и нивното влијание врз ДМ. Специфичните придонеси на оваа дисертација се:

1. Развиен е сеопфатен оптимизациски модел, кој ја опишува динамиката на ЗОИЕ, вклучувајќи го локалното производство, складирање и споделување енергија, како и флексибилното полнење на ЕВ и овозможува моделирање на различни тарифни системи. Моделот овозможува детална анализа на оптимизацијата на трошоците, балансирањето на енергијата и интеракцијата со ДМ.
2. Преку компаративни симулации, истражувањето обезбедува квантитативни докази за тоа како различни тарифни механизми, како што се динамичките цени, тарифите според време на користење, трошоците за врвно оптоварување и намалувањето на мрежните трошоци, влијаат врз однесувањето на ЗОИЕ и врз нивните технички и економски перформанси. На тој начин, се пополнува јазот во литературата за врската помеѓу тарифните модели и техничката ефикасност на ЗОИЕ.
3. Клучен придонес е интеграцијата на флексибилното полнење на ЕВ (за членови на заедницата, но и за надворешни сопственици на ЕВ) во моделите за оптимизација на ЗОИЕ. Истражувањето ги проценува условите при кои ЕВ можат да понудат флексибилност, да ја зголемат сопствената потрошувачка на обновлива енергија во ЗОИЕ и да го намалат оптоварувањето на мрежата.

4. Истражувањето обезбедува нови сознанија за влијанието на работата на ЗОИЕ врз ДМ, вклучувајќи ги загубите на енергија во мрежата, врвните оптоварувања, напонскиот профил и повратните текови на моќност. Овие резултати треба да им помогнат на операторите на дистрибутивните мрежи да ја оценат компатибилноста на ЗОИЕ со мрежата, при различни сценарија и тарифни системи.

Истражувањето придонесува кон теоретско разбирање и практична имплементација на енергетски заедници кои се економски и технички одржливи, усогласени со принципите на одржливост, децентрализација и декарбонизација на електроенергетскиот сектор.

Научните придонеси на оваа докторска дисертација се поткрепени со вкупно осум научни трудови, од кои четири се објавени во меѓународни научни списанија со фактор на влијание и четири се објавени како трудови на меѓународни научни конференции. Дел од овие трудови претставуваат директна основа за поединечни поглавја од дисертацијата, додека останатите се тематски поврзани и придонесуваат кон поширокиот научен контекст и еволуцијата на истражувањето.

Глава 4 од дисертацијата е директно базирана на резултатите презентирани во [Труд 1], каде што се анализира влијанието на различни тарифни структури врз оперативните параметри на енергетските заедници и врз ДМ, вклучувајќи ги врвните оптоварувања, загубите на моќност и напонските профили.

Глава 5.1 се темели на концептуалната и методолошката рамка презентирана во [Труд 2] и [Труд 3], каде што е разработен модел за споделено полнење на електрични возила во рамки на резиденцијални ЗОИЕ и е анализирана неговата примена од технички и економски аспект, вклучувајќи ја интеракцијата со локалното фотоволтаично производство.

Оптимизацискиот модел презентираан во Глава 3 претставува проширена и унапредена верзија на моделската рамка воведена во [Труд 1], при што во дисертацијата моделот е дополнет со нови компоненти, регуларизациски термини и понапредна формализација на интеракцијата помеѓу ЗОИЕ, електричните возила и ДМ. Ова проширување овозможува подлабока и посистематска анализа на улогата на тарифните механизми, споделувањето енергија и флексибилноста од страна на ЕВ.

[Труд 4][Труд 1] и [Труд 5] се тесно поврзани со темата на дисертацијата и ја обработуваат улогата на тарифните механизми, регулираните трошоци и складирањето на енергија во енергетските заедници. Иако резултатите од овие трудови не се директно презентирани во дисертацијата, тие обезбедуваат значајна теоретска и методолошка подлога и го поткрепуваат научниот контекст во кој е развиено истражувањето.

[Труд 6], [Труд 7], [Труд 8] имаат подалечна, но концептуално релевантна поврзаност со дисертацијата, при што се разгледуваат аспекти како квантификација и правичност на споделувањето енергија, како и статистичка анализа на влијанието на регулираните трошоци врз економските ефекти од енергетските заедници. Овие трудови ја одразуваат еволуцијата на истражувачките активности на кандидатот и придонесуваат кон поширокото научно разбирање на ЗОИЕ и механизмите за нивно функционирање.

6.3. Примена на резултатите од истражувањето

Резултатите од ова истражување имаат практична примена за повеќе чинители во електроенергетскиот сектор, вклучувајќи регулаторни тела, оператори на дистрибутивни системи, снабдувачи на електрична енергија и енергетски заедници, како и за академската заедница.

За операторите на дистрибутивните системи, резултатите обезбедуваат квантитативен увид во влијанието на ЗОИЕ врз техничките индикатори на мрежата, како што се врвните оптоварувања, напонскиот профил, загубите на енергија и повратните текови на моќност. Овие сознанија можат да се искористат при дефинирање на техничките критериуми и ограничувањата за интеграција на нови ЗОИЕ и флексибилни оптоварувања, како што се електричните возила.

Од регулаторен и пазарен аспект, истражувањето нуди основа за дизајн на тарифни системи кои го поттикнуваат споделувањето енергија, флексибилноста и активното учество на крајните потрошувачи, при што се одржува техничката стабилност на мрежата. Овие резултати можат да придонесат кон усогласување на националните енергетски политики со релевантните директиви на Европската Унија, особено Директивата (ЕУ) 2018/2001.

За самите ЗОИЕ, наодите од истражувањето овозможуваат избор на технички и економски оптимални конфигурации и го истакнуваат потенцијалот на електричните возила како флексибилни ресурси за зголемување на сопствената потрошувачка и подобрување на влијанието врз мрежата.

6.4. Насоки за идни истражувања

Идните истражувања може да се насочат кон продлабочување и проширување на предложениот модел во неколку насоки:

- Вклучување на стохастички параметри во моделот со цел да се опфатат неодреденостите поврзани со ФВ производството, потрошувачката и однесувањето на сопствениците на ЕВ,
- Развивање на динамички модели на управување со полнење (пр. закажување во реално време или ден-однапред) со примена на предиктивни методи и машинско учење за подобра прилагодливост кон пазарните услови,
- Проширување на економската анализа со вклучување на социјални и регулаторни аспекти, како на пример, праведна распределба на трошоците и придобивките меѓу членовите на заедницата.
- Валидирање на моделот со реални податоци од постојни пилот-проекти за ЗОИЕ и развивање на унифициран пристап за калибрација на моделите во различни географски и регулаторни контексти.

Овие насоки создаваат основа за понатамошно унапредување на моделите за оптимизација на ЗОИЕ, како и за поефикасна интеграција на ЕВ во идните одржливи енергетски системи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Ahmed, A. Ali, A. D'Angola, "A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations", *Sustainability* 16(5), 2024, pp. 1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>
- [2] L. Neij et al., "Energy communities—lessons learnt, challenges, and policy recommendations", *Oxford Open Energy* 4, 2025. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiaf002>
- [3] M. Mirzaei, M. Eslami, M.J. Shahbazzadeh, A. Khajehzadeh, "Enhancing flexibility in a residential energy hub through integrating electric vehicle and energy saving programs", *Scientific Reports* 15, 2025, pp. 12660. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97527-w>
- [4] J. Menyhart, "Electric Vehicles and Energy Communities: Vehicle-to-Grid Opportunities and a Sustainable Future", *Energies* 18(4), 2025, pp. 854. <https://doi.org/10.3390/en18040854>
- [5] F. Hao, "Impact of electric vehicle charging demand on clean energy regional power grid control", *Energy Informatics* 8(83), 2025. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00538-0>
- [6] R.M. Johannsen, P. Sorknæs, K. Sperling, P.A. Østergaard, "Energy communities' flexibility in different tax and tariff structures", *Energy Conversion and Management* 288, 2023, pp. 117112. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117112>
- [7] A. Gautier, J. Jacqmin, J.C. Poudou, "The Energy Community and the Grid", CESifo Working Paper, No. 10254, *Center for Economic Studies and ifo Institute (CESifo)*, Munich, 2023. <https://hdl.handle.net/10419/271898>
- [8] S. Schreck, R. Sudhoff, S. Thiem, S. Niessen, "On the Importance of Grid Tariff Designs in Local Energy Markets", *Energies* 15(17), 2022, pp. 6209. <https://doi.org/10.3390/en15176209>
- [9] J.C. Martins, M.D. Pinheiro, "Energy Communities and Electric Mobility as a Win–Win Solution in Built Environment" *Energies* 17(12), 2024, pp. 3011. <https://doi.org/10.3390/en17123011>
- [10] N.C. Onat, M. Kucukvar, "A systematic review on sustainability assessment of electric vehicles: Knowledge gaps and future perspectives", *Environmental Impact Assessment Review* 97, 2022, pp. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106867>
- [11] M. Krug, et al., "Implementing European Union Provisions and Enabling Frameworks for Renewable Energy Communities in Nine Countries: Progress, Delays, and Gaps", *Sustainability* 15, 2023, pp. 8861. <https://doi.org/10.3390/su15118861>
- [12] A. Mohsenimanesh, C. McNevin, E. Entchev, "EV and Renewable Energy Integration in Residential Buildings: A Global Perspective on Deep Learning, Strategies, and Challenges", *World Electric Vehicle Journal* 15, 2025, pp. 603. <https://doi.org/10.3390/wevj16110603>
- [13] J. Lowitzsch, C.E. Hoicka, F.J. van Tulder, "Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 122, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>
- [14] European Parliament, "Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources," 2018. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng> [Пристапено на 12.8.2025]
- [15] T. Morstyn and M.D. McCulloch, "Peer-to-Peer Energy Trading", *Analytics for the Sharing Economy: Mathematics, Engineering and Business Perspectives*, Швајцарија, Springer Cham, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35032-1>
- [16] J. Abdella and K. Shuaib, "Peer to peer distributed energy trading in smart grids: A survey," *Energies* 11(6), 2018. <https://doi.org/10.3390/en11061560>
- [17] O. Jogunola et al., "Comparative analysis of P2P architectures for energy trading and sharing", *Energies* 11(1), 2018. <https://doi.org/10.3390/en11010062>
- [18] W. Tushar et al., "Peer-to-peer energy systems for connected communities: A review of recent advances and emerging challenges," *Applied Energy* 282(A), 2021 pp. 116131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116131>

- [19] S.N. Islam, "A Review of Peer-to-Peer Energy Trading Markets: Enabling Models and Technologies", *Energies* 17(7), 2024, pp. 1702. <https://doi.org/10.3390/en17071702>
- [20] S. Suthar, S.H.C. Cherukuri, N.M. Pindoriya, "Peer-to-peer energy trading in smart grid: Frameworks, implementation methodologies, and demonstration projects", *Electric Power Systems Research* 214(A), 2023, pp. 108907. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108907>
- [21] A. Cosic, M. Stadler, M. Mansoor, M. Zellinger, "Mixed-integer linear programming based optimization strategies for renewable energy communities", *Energy* 237, 2021, pp. 121559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121559>
- [22] F.D. Minuto, A. Lanzini, "Energy-sharing mechanisms for energy community members under different asset ownership schemes and user demand profiles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168, 2022, pp. 112859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112859>
- [23] V.Z. Gjorgievski, B. Velkovski, F.D. Minuto, S. Cundeva, N. Markovska, "Energy sharing in European renewable energy communities: impact of regulated charges", *Energy* 281, 2023, pp. 128333. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128333>
- [24] V.Z. Gjorgievski, S. Cundeva, G.E. Georghiou, "Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review", *Renewable Energy* 169, 2021, pp. 1138-1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>
- [25] G. Tsousoglou, J.S. Giraldo, N.G. Paterakis, "Market mechanisms for local electricity markets: a review of models, solution concepts and algorithmic techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 156, 2022, pp. 111890. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111890>
- [26] E. Fernandez, M.J. Hossain, S.M. Nawazish Ali, V. Sharma, "An efficient P2P energy trading platform based on evolutionary games for prosumers in a community", *Sustainable Energy, Grids and Networks* 34, 2023, pp. 101074. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101074>
- [27] M. Moncecchi, S. Meneghello, M. Merlo, "A game theoretic approach for energy sharing in the Italian renewable energy communities", *Applied Sciences* 10(22), 2020, pp. 8166. <https://doi.org/10.3390/app10228166>
- [28] M. Khojasteh, M. Faria, Z. Vale, "A distributed robust ADMM-based model for the energy management in local energy communities", *Sustainable Energy, Grids and Networks* 36, 2023, pp. 101136. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101136>
- [29] R. Li, X. Yan, N. Liu, "Hybrid energy sharing considering network cost for prosumers in integrated energy systems", *Applied Energy* 323, 2022, pp. 119627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119627>
- [30] M. Zatti et al., "Energy communities design optimization in the Italian framework", *Applied Sciences* 11(11), 2021, pp. 5218. <https://doi.org/10.3390/app11115218>
- [31] B. Gu, et al., "A data-driven stochastic energy sharing optimization and implementation for community energy storage and PV prosumers", *Sustainable Energy, Grids and Networks* 34, 2023, pp. 101051. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101051>
- [32] D. Frieden et al., "Are we on the right track? Collective self-consumption and energy communities in the European Union", *Sustainability* 13(22) (2021) 12494. <https://doi.org/10.3390/su132212494>
- [33] D. Frieden, A. Tuerk, C. Neumann, S. D'Herbement, J. Roberts, "Trends and challenges in the transposition of the EU framework", *Collective self-consumption and energy communities: Trends and challenges*, Compile project, 2020. <https://www.rescoop.eu/uploads/rescoop/downloads/Collective-self-consumption-and-energy-communities.-Trends-and-challenges-in-the-transposition-of-the-EU-framework.pdf> [Пристапено на 12.8.2025]
- [34] C. Ines, P.L. Guilherme, M.G. Esther, G. Swantje, H. Stephen, H. Lars, "Regulatory challenges and opportunities for collective renewable energy prosumers in the EU", *Energy Policy* 138, 2020, pp. 111212. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111212>
- [35] R. Moura, M.C. Brito, "Prosumer aggregation policies, country experience and business models", *Energy Policy* 132, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.053>
- [36] M. Stentati, S. Paoletti, A. Vicino, "Optimization of energy communities in the Italian incentive system", *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe 2022*. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960513>

- [37] E. Cutore, R. Volpe, R. Sgroi, A. Fichera, Energy management and sustainability assessment of renewable energy communities: the Italian context, *Energy Conversion and Management* 278, 2023, pp. 116713. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116713>
- [38] F. Braeuer, M. Kleinebrahm, E. Naber, F. Scheller, R. McKenna, “Optimal system design for energy communities in multi-family buildings: the case of the German Tenant Electricity Law”, *Applied Energy* 305, 2022, pp.117884. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117884>
- [39] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. BDEW-Strompreisanalyse January 2020; Haushalt und Industrie: Berlin, Germany, 2020. https://www.bdew.de/media/documents/20200107_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2020.pdf [Пристапено на 12.9.2023]
- [40] M. Maldet, et al., Trends in local electricity market design: regulatory barriers and the role of grid tariffs, *J. Clean. Prod.* 358, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131805>
- [41] Y.C. Tsao, V.T. Linh, “A new three-part tariff pricing scheme for the electricity microgrid considering consumer regret”, *Energy* 254(C), 2022, pp. 124387. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124387>
- [42] J. Radl, A. Fleischhacker, F.H. Revheim, G. Lettner, H. Auer, “Comparison of profitability of PV electricity sharing in renewable energy communities in selected European countries”, *Energies* 13(19), 2020, pp. 5007. <https://doi.org/10.3390/en13195007>
- [43] S. Viti, A. Lanzini, F.D. Minuto, M. Caldera, R. Borchiellini, “Techno-economic comparison of buildings acting as single-self consumers or as energy community through multiple economic scenarios”, *Sustainable Cities and Society* 61, 2020, pp. 102342. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102342>
- [44] J. Stute, M. Kühnbach, “Dynamic pricing and the flexible consumer – Investigating grid and financial implications: a case study for Germany”, *Energy Strategy Reviews* 45, 2023, pp. 100987. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100987>
- [45] A. Dimovski, M. Moncecchi, M. Merlo, “Impact of energy communities on the distribution network: an Italian case study”, *Sustainable Energy, Grids and Networks* 35, 2023, pp. 101148. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101148>
- [46] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, H. V. Poor, “Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview”, *IEEE Transactions on Smart Grid* 11(4), 2020, pp. 3185. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657>
- [47] A.C. Lazaroiu, M. Roscia, G.C. Lazaroiu, P. Siano, “Review of Energy Communities: Definitions, Regulations, Topologies, and Technologies”, *Smart Cities* 8(1), 2025. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010008>
- [48] Á. Manso-Burgos, D. Ribó-Pérez, I. Aparisi-Cerdá, T. Gómez-Navarro, H. Madani, “Optimising flexibility in highly electrified energy communities: A Mediterranean perspective”, *Applied Energy* 395, 2025, pp. 126172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126172>
- [49] J. Menyhart, “Overview of Sustainable Mobility: The Role of Electric Vehicles in Energy Communities”, *World Electric Vehicle Journal* 15(6), 2024, pp. 275. <https://doi.org/10.3390/wevj15060275>
- [50] N.M. Manousakis, P.S. Karagiannopoulos, G.J. Tsekouras, F.D. Kanellos, “Integration of Renewable Energy and Electric Vehicles in Power Systems: A Review”. *Processes* 11(5), 2023, pp. 1544. <https://doi.org/10.3390/pr11051544>
- [51] R. Barreto, P. Faria. Z. Vale, “Electric Mobility: An Overview of the Main Aspects Related to the Smart Grid”, *Electronics* 11, 2022, pp. 1311. <https://doi.org/10.3390/electronics11091311>
- [52] European Parliament, “Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU”, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng> [Пристапено на 11.12.2025]
- [53] Министерство за енергетика, рударство и минерални сировини на Р.С. Македонија, „Предлог на закон за користење на енергија од обновливи извори“, 1.8.2025. https://ener.gov.mk/Default.aspx?item=pub_regulation&subitem=view_reg_detail&itemid=111834 [пристапено на: 11.12.2025]

- [54] Clean Air Task Force, “Clean energy from the ground up: Energy communities in the European Union”, 21.3.2024. <https://www.catf.us/resource/clean-energy-ground-up-energy-communities-european-union/> [Пристапено на: 11.12.2025]
- [55] A. Wierling, V.j. Schwanitz, J.P. Zeiss, et al. “A Europe-wide inventory of citizen-led energy action with data from 29 countries and over 10000 initiatives”, *Scientific Data* 10, 2023, pp. 9. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01902-5>
- [56] J. Morfeldt, D.J.A. Johansson, “Impacts of shared mobility on vehicle lifetimes and on the carbon footprint of electric vehicles”. *Nature Communications* 13, 2022, pp. 6400. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33666-2>
- [57] J. Meiers, G. Frey, “A Case Study of the Use of Smart EV Charging for Peak Shaving in Local Area Grids”, *Energies* 17(1), pp. 47. <https://doi.org/10.3390/en17010047>
- [58] J. Haapaniemi, V. Tikka, O. Räisänen, J. Haakana, J. Lassila, “Impact Analysis of Power Based Tariff-Driven Peak Load Shaving on Electricity Distribution Networks and Distribution Business”, *IET Generation, Transmission & Distribution* 19, 2025, pp. 70036. <https://doi.org/10.1049/gtd2.70036>
- [59] J. Freier, V. von Loessl, "Dynamic electricity tariffs: Designing reasonable pricing schemes for private households", *Energy Economics* 112, 2022, pp. 106146. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106146>
- [60] S. Bjarghov, H. Farahmand, G. Doorman, “Capacity subscription grid tariff efficiency and the impact of uncertainty on the subscribed level”, *Energy Policy* 165, 2022, pp. 112972. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112972>
- [61] Eurostat. “Electricity prices components for household consumers - annual data (from 2007 onwards)”. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204_c/ [Пристапено на: 15.5.2025].
- [62] G. C. Christoforidis et al., “A model for the assessment of different Net-Metering policies,” *Energies* 9(4), 2016, pp. 262. <https://doi.org/10.3390/en9040262>
- [63] I.-M. Chatzigeorgiou, D. Kitsikopoulos, D. A. Papadaskalopoulos, A.-G. Chronis, A. Xenaki, G.T. Andreou, “Optimal PV Sizing and Demand Response in Greek Energy Communities Under the New Virtual Net-Billing Scheme”, *Energies* 18(19), 2025, pp. 5082. <https://doi.org/10.3390/en18195082>
- [64] A. Tatti, S. Ferroni, M. Ferrando, M. Motta, F. Causone, “The Emerging Trends of Renewable Energy Communities’ Development in Italy”, *Sustainability* 15(8), 2023, pp. 6792. <https://doi.org/10.3390/su15086792>
- [65] B. Fina, H. Fechner, “Transposition of European Guidelines for Energy Communities into Austrian Law: A Comparison and Discussion of Issues and Positive Aspects”, *Energies* 14, 2021, pp. 3922. <https://doi.org/10.3390/en14133922>
- [66] J. Ramsebner, A. Hiesl, R. Haas, “Efficient Load Management for BEV Charging Infrastructure in Multi-Apartment Buildings”, *Energies* 13 (22), 2020, pp. 5927. <https://doi.org/10.3390/en13225927>
- [67] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems” – EN 50160:2010, 2010.
- [68] S. Mocci, S. Ruggeri, F. Pilo, “Low-Voltage Renewable Energy Communities’ Impact on the Distribution Networks”, *Energies* 18, 2025, pp. 126. <https://doi.org/10.3390/en18010126>
- [69] S. Shao, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, “Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4), 2011, pp. 624-631. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2164583>
- [70] Y. Li, A. Jenn, “Impact of electric vehicle charging demand on power distribution grid congestion”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* 121(18), 2024, pp. 2317599121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2317599121>
- [71] Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Regulatory Assistance Project. “Distribution grid planning for a successful energy transition – focus on electromobility”, 2019. https://www.agora-verkehrswende.org/fileadmin/Projekte/2019/EV-Grid/AgoraRAP2019_VerteilnetzausbauElektromobilitaet_EN.pdf.pdf [Пристапено на 5.11.2025]

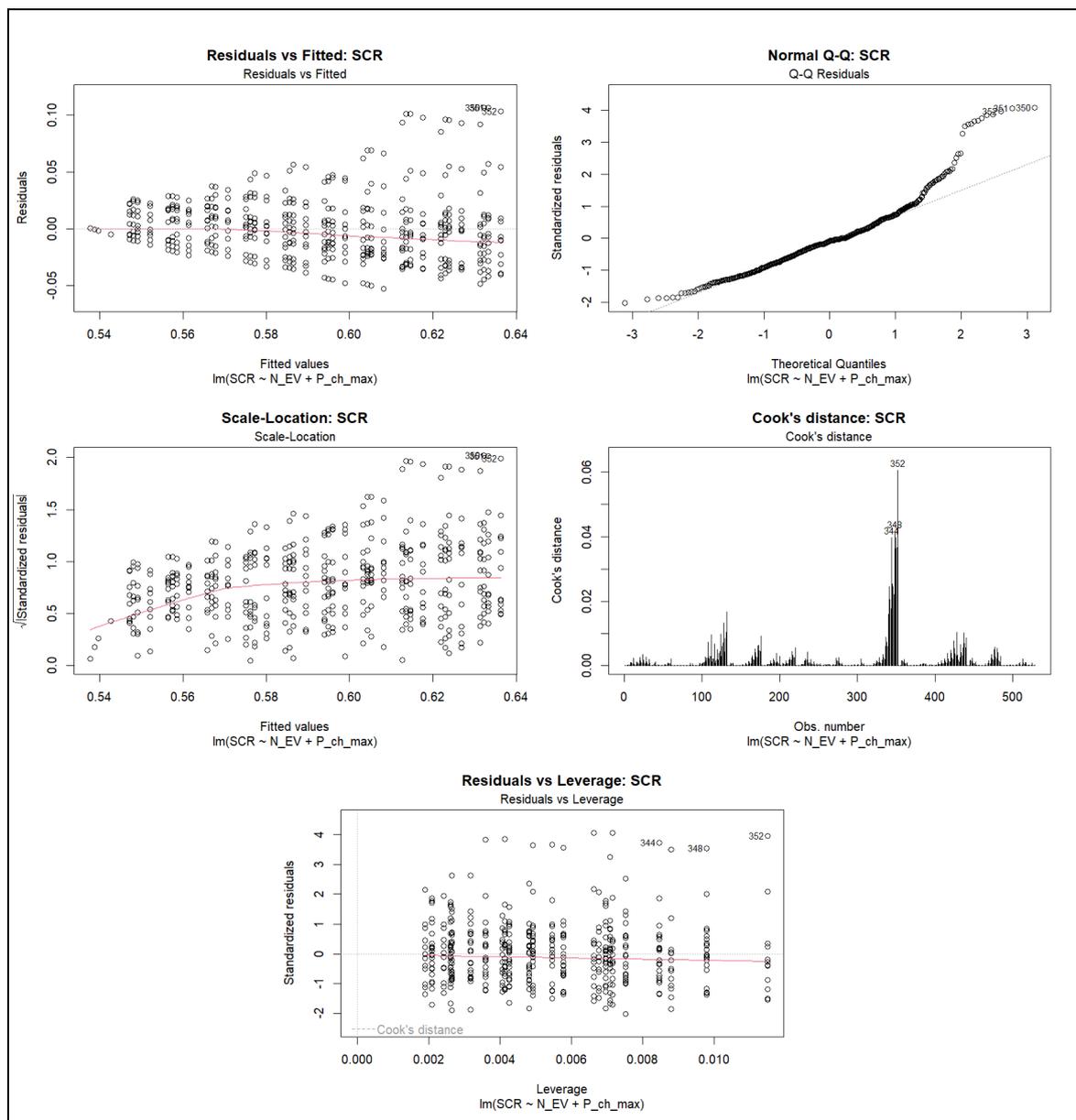
- [72] M. Cococcioni, L. Fiaschi, “The Big-M method with the numerical infinite M”, *Optimization Letters*. 15(1), 2021, pp. 2455–2468. <https://doi.org/10.1007/s11590-020-01644-6>
- [73] T. Kull, B. Zeilmann, G. Fischerauer, “Modular Model Composition for Rapid Implementations of Embedded Economic Model Predictive Control in Microgrids”, *Applied Science* 11(22), pp. 10602, 2021. <https://doi.org/10.3390/app112210602>
- [74] J. F. Franco, M. J. Rider, R. Romero, “A mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging coordination problem in unbalanced electrical distribution systems”, *IEEE Transactions on Smart Grid* 6(5), pp. 2200–2209, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2394489>
- [75] C. Viteri, D. Taylor, M. Leamy, “Smart Charging of Electric Vehicle Fleets”, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Research Report, 1.9.2024. <https://escholarship.org/uc/item/6d64d2tk> [Пристапено на 10.12.2025]
- [76] M. Salani, A. Giusti, G. Di Caro, A.E. Rizzoli, L.M. Gambardella, “Lexicographic multi-objective optimization for the unit commitment problem and economic dispatch in a microgrid”, *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, Manchester, UK, 2011, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2011.6162806>
- [77] E. Dudkina, C. Scarpelli, V. Apicella, M. Ceraolo, E. Crisostomi, “Optimised centralised charging of electric vehicles along motorways”, *Sustainability* 17(12), pp. 5668, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17125668>
- [78] R. Epp, F. Schmid, P. Jenny, “Hierarchical regularization of solution ambiguity in underdetermined inverse and optimization problems”, *Journal of Computational Physics: X* 13, pp. 100105, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcpx.2022.100105>
- [79] R. Luthander, A.M. Nilsson, J. Widén, M. Åberg, “Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency”, *Applied Energy* 250, pp. 748–759, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.058>
- [80] N.S. Kelepouris, A.I. Nousedilis, A.S. Bouhouras, G.C. Christoforidis, “Optimal scheduling of prosumer's battery storage and flexible loads for distribution network support. IET Generation Transmission & Distribution 17(7), pp. 1491–1508, 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12759>
- [81] G.C. Kryonidis, E.O. Kontis, A.I. Chrysochos, C.S. Detnoulas, G.K. Papagiannis, “A Coordinated Droop Control Strategy for Overvoltage Mitigation in Active Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Smart Grid* 9(5), pp. 5260–5270, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2685686>
- [82] M. Wirtz, “nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks”, *Energy* 268, pp. 126575, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126575>
- [83] A. Almutairi, S. Alyami, “Load profile modeling of plug-in electric vehicles: Realistic and ready-to-use benchmark test data”, *IEEE Access* 9, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072982>
- [84] Joint Reserach Centre of the European Comission. PVGIS n.d. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [Пристапено на: 15.9.2025]
- [85] SARAH-2 Solar Radiation Data - The Joint Research Centre: EU Science Hub https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-data-download/sarah-2-solar-radiation-data_en [Пристапено на: 15.9.2025]
- [86] European Network of Transmission System Operators for Electricity ENTSO-E. Day-ahead prices. <https://transparency.entsoe.eu/> [Пристапено на: 15.9.2025]
- [87] D. Trinko, N. Horesh, E. Porter, J. Dunkley, E. Miller, T. Bradley, “Transportation and electricity systems integration via electric vehicle charging-as-a-service: A review of techno-economic and societal benefits”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 175, 2023 pp. 113180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113180>
- [88] M. Kubli, S. Puranik, “A typology of business models for energy communities: Current and emerging design options”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 176, 2023, pp. 113165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113165>

- [89] V. Azarova, J.J. Cohen, A. Kollmann, J. Reichl, “The potential for community financed electric vehicle charging infrastructure”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 88, 2020, pp. 102541. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102541>
- [90] Co Charger, (n.d.). <https://co-charger.com/> [Пристапено на: 15.8.2025]
- [91] PlugShare, (n.d.). <https://www.plugshare.com/> [Пристапено на: 15.8.2025]
- [92] A. Beyertt, P. Verwiebe, S. Seim, F. Milojkovic, J. Müller-Kirchenbauer, “Felduntersuchung zu Behavioral Energy Efficiency Potentialen von privaten Haushalten”. <https://zenodo.org/record/3855575> [Пристапено на: 15.9.2025]
- [93] ODYSSEE-MURE. Sectoral profile-households: Electricity consumption per dwelling. <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/electricity-consumption-dwelling.html> [Пристапено на 15.9.2025]

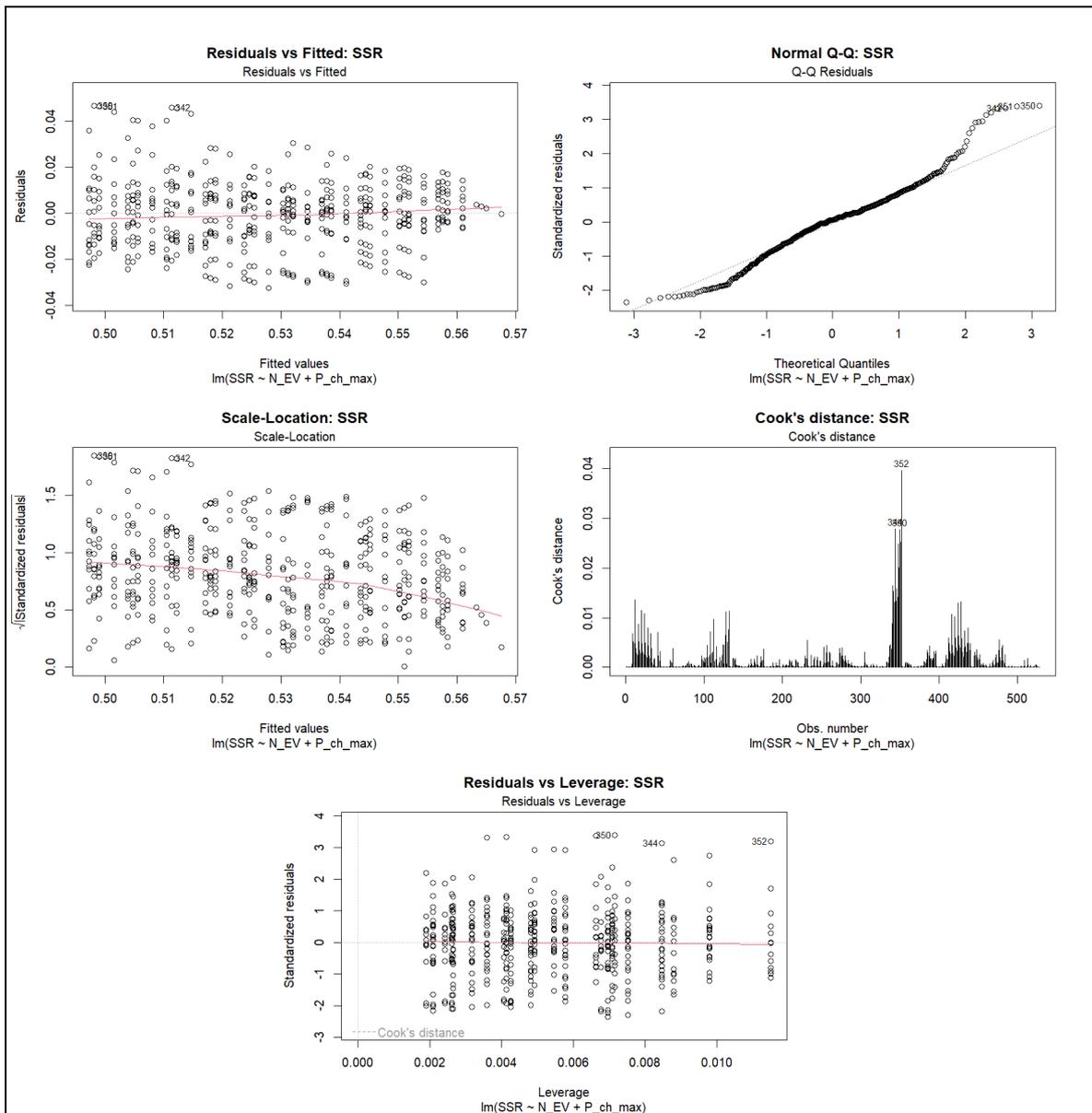
ПРИЛОГ 1. РЕЗУЛТАТИ ОД СТАТИСТИЧКИ ТЕСТОВИ

Табела П1.1. Резултати од аналитичките тестови за илустрирана зависна променлива

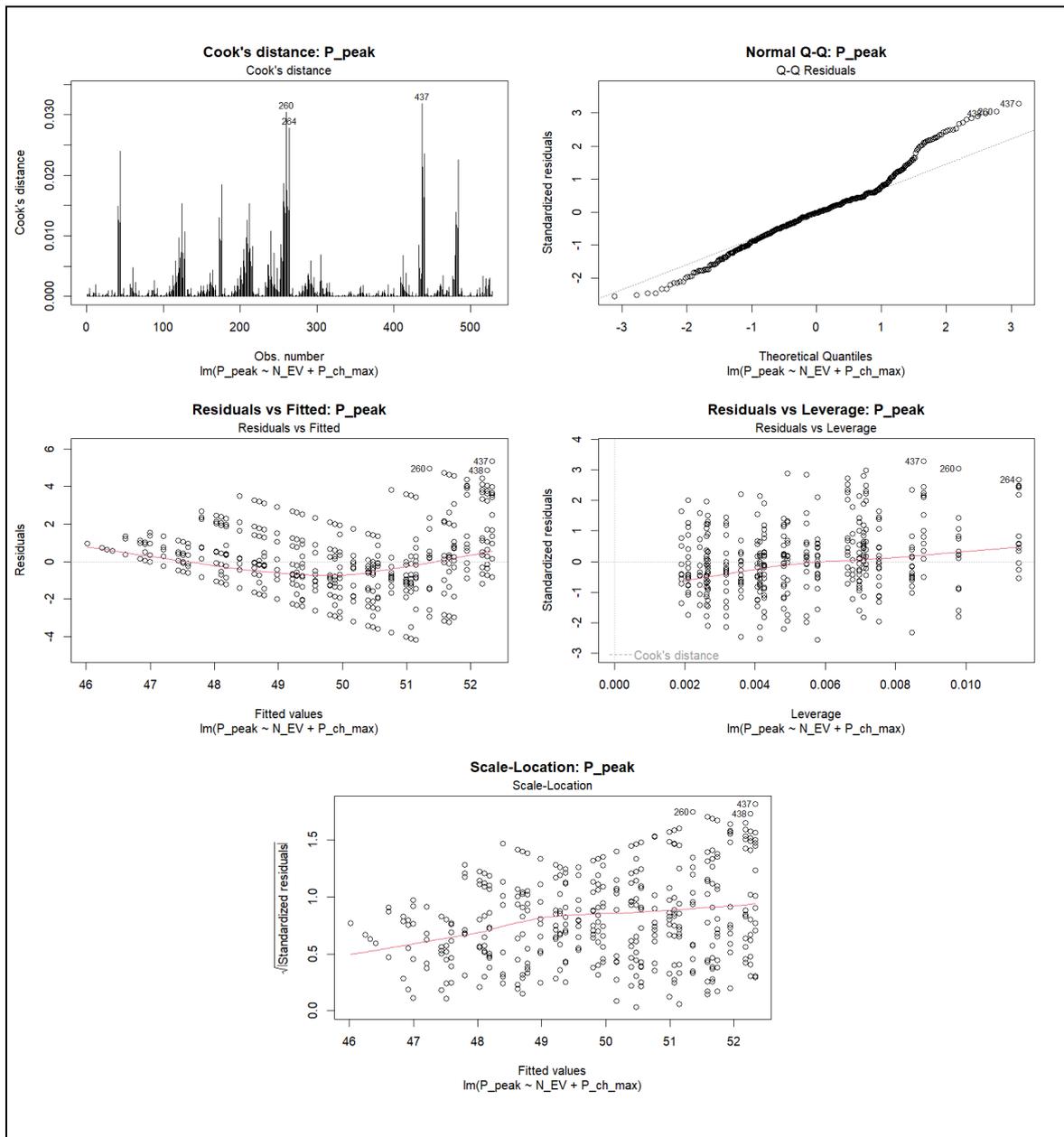
Зависна променлива	Durbin-Watson (DW)	Autocorr. (lag 1)	p (DW)	Breusch-Pagan (BP) χ^2 (df=2)	p (BP)	NCV Score χ^2 (df=1)	p (NCV)
SCR	0,117	0,942	<0,001	51,19	$7,65 \cdot 10^{-12}$	128,10	$< 2,2 \cdot 10^{-16}$
SSR	0,163	0,918	<0,001	34,51	$3,20 \cdot 10^{-8}$	49,74	$1,75 \cdot 10^{-12}$
Врвна ангажирана моќност	0,217	0,891	<0,001	89,85	$< 2,2 \cdot 10^{-16}$	123,24	$< 2,2 \cdot 10^{-16}$



Слика П1.1. Дијагностички графичи за регресиониот модел на SCR



Слика П1.2. Дијагностички графици за регресиониот модел на SCR



Слика П1.3. Дијагностички графици за регресиониот модел на SCR

БИОГРАФИЈА

Бодан Велковски е роден на 24.4.1994 година во Скопје, каде што го завршил своето основно и средно образование со одличен успех. Во учебната 2012/2013 година се запишал на редовни студии на Факултетот за електротехника и информациски технологии (ФЕИТ) при Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, на студиската насока Електроенергетика, автоматизација и обновливи извори на енергија (ЕАОИЕ). Во септември 2016, на истиот факултет се стекнува со диплома на дипломиран инженер по електротехника и информациски технологии со средна оцена 9,10. Во октомври 2016 година се запишал и на постдипломски студии на ФЕИТ, на студиската насока Метрологија и менаџмент на квалитет. Во мај 2020 година ја одбрал својата магистерската работа, стекнувајќи се со звање магистер по електротехника и информациски технологии од областа на метрологија и менаџмент на квалитет, со средна оцена на положените испити 10,00. Во текот на додипломските и магистерските студии, тој бил ангажиран како демонстратор за лабораториски вежби по повеќе предмети од областа на електричните машини и електричните мерења.

Во периодот од јануари 2017 до декември 2020 година, Бодан Велковски бил вработен во компанијата „ДТК Смарт-тек“ ДОО Скопје, каде што работел на развој и имплементација на хардверско-софтверски решенија за управување со електрична енергија и развој на едукативни материјали за потребите на средното стручно образование, а од 2018 г. е и управител на истата. Од декември 2020 година, Велковски е вработен на Факултетот за електротехника и информациски технологии како асистент по предмети од областа на електротехниката, каде активно учествува во наставниот процес, изведува лабораториски и аудиториски вежби, учествува во подготовка на наставни материјали и активно се вклучува во научноистражувачки и апликативни активности на факултетот. Во октомври 2021 година се запишал на докторски студии на истиот факултет, каде го насочува своето истражување кон областите на обновливи извори на енергија, енергетски заедници, интеграција на електрични возила и оптимизација на енергетски системи.

Во текот на досегашната академска и истражувачка кариера, кандидатот се јавува како автор и коавтор на повеќе од дваесет научни трудови објавени во меѓународни конференции и списанија, а дел од нив и во реномирани списанија со фактор на влијание. Тој учествувал како истражувач на шест меѓународни и национални проекти финансирани од европски програми како Interreg IPA Adrion, Erasmus+ и EUKI. Дополнително, кандидатот се јавува како коавтор на една книга и на едно поглавје во книга и е носител на еден национален патент.

ПУБЛИКАЦИИ

- [Труд 1] **B. Velkovski**, V. Z. Gjorgievski, D. Kothona, A. Bouhouras, S. Cundeva, N. Markovska, “Impact of tariff structures on energy community and grid operational parameters”, *Sustainable Energies, Grids and Networks* 38, pp. 101382, 2024. **IF=5,6**. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101382>
- [Труд 2] **B. Velkovski**, V. Z. Gjorgievski, B. Markovski, S. Cundeva, N. Markovska, “A framework for shared EV charging in residential renewable energy communities”, *Renewable Energy* 231, pp. 120897, 2024. **IF=9,1**. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120897>
- [Труд 3] **B. Velkovski**, V. Z. Gjorgievski, B. Markovski, S. Cundeva, N. Markovska, “A framework for shared EV charging in residential renewable energy communities”, *18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Croatia, 2023.
- [Труд 4] V. Z. Gjorgievski, **B. Velkovski**, B. Markovski, S. Cundeva, N. Markovska, “Energy community demand-side flexibility: Energy storage and electricity tariff synergies”, *Energy* 313, pp. 134078, 2024. **IF=9,4**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134078>
- [Труд 5] V. Z. Gjorgievski, **B. Velkovski**, F. D. Minuto, S. Cundeva, N. Markovska, “Energy sharing in European renewable energy communities: Impact of regulated charges”, *Energy* 281, pp. 128333, 2023. **IF=9,4**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128333>
- [Труд 6] V. Z. Gjorgievski, D. Josifovski, K. Hadzi-Velkova Saneva, **B. Velkovski**, B. Markovski, S. Cundeva, N. Markovska, “The impact of regulated charges and solar potential on cost savings from energy sharing: a statistical analysis”, *18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Croatia, 2023.
- [Труд 7] V. Z. Gjorgievski, **B. Velkovski**, S. Cundeva, “Quantification of the Shared Energy in Energy Communities”, *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Novi Sad, Serbia, 2022.
- [Труд 8] V. Z. Gjorgievski, **B. Velkovski**, S. Cundeva, “Fairness of Sharing Renewable Energy Between Prosumers”, *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Novi Sad, Serbia, 2022.