



УНИВЕРЗИТЕТ „Св. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ – СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ



м-р Владимир Ѓоргиевски

**РАЗВОЈ НА МЕТОД ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ
СО ЕНЕРГИЈА: ВИРТУЕЛНА НЕТО-НАПЛАТА**

- ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА –

Скопје, 2021 година

Ментор:

Проф. д-р Снежана Чундева

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје,
Факултет за електротехника и информациски технологии

Членови на комисијата:

Проф. д-р Марија Кацарска

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје,
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р Мирко Тодоровски

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје,
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р Димитар Димитров

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје,
Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф. д-р Џорџ Георгиу

Универзитет во Кипар,
Факултет за електротехника и компјутерски науки,
Истражувачки центар за одржлив развој - ФОС

Датум на одбрана:

Датум на промоција

Научна област:

Електротехника

„Најправедни се оние правила кои сите би ги прифатиле и
тогаш кога не ја знаат моќта што би ја стекнале од нив“.

Џон Ролс

Посветено на мојата фамилија.

Благодарност

Изминативе три години се чувствував привилегирано што можам слободно да истражувам. На многумина ја должам мојата благодарност за тоа чувство. Посебно се заблагодарувам на мојот ментор, проф. д-р Снежана Чундева, за тоа што ми помогна да го дефинирам фокусот на истражувањето, но и за укажаната помош во обликувањето на докторскиот труд, за конструктивните консултации, ведриот хумор и неретките потсетувања да земам здив. Искрена благодарност упатувам и кон колегите од Институтот за електротермија, електрично заварување и електричен сообраќај на Факултетот за електротехника и информациски технологии при Универзитетот Св. „Кирил и Методиј“ – Скопје, и тоа на проф. д-р Марија Кацарска, проф. д-р Весна Арнаутовски-Тошева, доц. д-р Благоја Марковски, м-р Бодан Велковски и м-р Љупчо Карајановски, за тоа што создадоа пријатна работна средина и имаа разбирање кога ми беше најпотребно. Посебно сум благодарен на проф. д-р Марија Кацарска, за нејзиното тусторство, за темелните корекции на докторскиот труд и за тоа што беше коректив на мојата работа како млад асистент и истражувач.

Во текот на мојата кариера, сум имал среќа да соработувам со луѓе кои несебично ми подале рака. Меѓу нив, изразувам особена благодарност до проф. д-р Наташа Марковска, за тоа што го постави темелот на мојот професионален идентитет и за тоа што ми помогна да се изградам како истражувач. Се заблагодарувам и на проф. д-р Мирко Годоровски за конструктивните научни дискусии и за укажаната отвореност околу административните работи на докторската дисертација. На проф. д-р Димитар Димитров му благодарам за укажаната поддршка во текот на студиите и за тоа што ме вклучи во дел од неговите истражувања. Мојата дисертација не би ја имала оваа форма без посветеното внимание од проф. д-р Џорџ Георгиу, кому сум благодарен за остроумните насоките и совети. За дискусијата околу преводот на терминот „peer-to-peer energy trading“ сум благодарен на проф. д-р Александра Крколева-Матеска, а за реализацијата на дел од графичките илустрации ѝ благодарам на Надица Панковска. На Деканатот, колегите и службите на Факултетот им благодарам за соработката и поддршката што ми ја пружија додека работев на дисертацијата.

Работејќи на дисертацијата, искусив низа успеси и разочарувања. Не би сакал да замислам како би изгледало тоа искуство без мојата фамилија и моите пријатели. Посебно сум благодарен на мојот татко, Зоран, мојата мајка, Соња, мојата сестра, Ева и мојата вереница, Ангела, за тоа што беа мојата мотивација, причина, надеж и радост.

Владимир

м-р Владимир Ѓоргиевски

РАЗВОЈ НА МЕТОД ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ СО ЕНЕРГИЈА: ВИРТУЕЛНА НЕТО-НАПЛАТА

АПСТРАКТ:

Крајните корисници на електрична енергија сè почесто се групираат во енергетски заедници, со цел здружено да произведуваат, дистрибуираат, продаваат, споделуваат и складираат енергија. Оваа дисертација се фокусира на енергетски заедници чиишто членови меѓусебно споделуваат енергија и нуди метод кој тоа го овозможува, наречен виртуелна нето-наплата. Предложениот метод ја третира заедницата како потрошувач-производител кому му се наплаќа согласно стандардниот метод за нето-наплата, но истовремено ја распределува колективната придобивка меѓу членовите на заедницата, во реално време, пропорционално на нивниот придонес. Својствата на предложениот метод се анализирани со помош на теорија на кооперативни игри и голем број на симулации базирани на реални мерни податоци. Предложена е теоретска рамка, базирана на три дефиниции и три индикатори, со цел да се квантифицира праведноста на предложениот метод. Со примена на оваа рамка, методот е спореден со пет постоечки методи од релевантната научна литература. Резултатите покажуваат дека предложениот метод нуди најмал компромис меѓу праведноста и пресметковната комплексност, затоа што е базиран на меритократски принципи, ги намалува нееднаквостите на исплатите и нуди решенија што се слични со решенијата добиени со помош на теоријата на кооперативни игри. Дополнително, дисертацијата нуди темелна статистичка анализа на билансите на моќност и енергија на енергетски заедници и потрошувачи-производители, од којашто се извлекуваат информации за факторите што влијаат на економските заштеди во енергетските заедници.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ:

теорија на кооперативни игри, енергетски заедници, споделување на енергија, стапка на сопствена потрошувачка.

Vladimir Gjorgievski, MSc.

DEVELOPMENT OF A COMMUNITY-BASED ENERGY SHARING METHOD: VIRTUAL NET-BILLING

ABSTRACT

In recent years, end-consumers have increasingly been grouping in energy communities in order to jointly generate, distribute, sell, share or store energy. This thesis focuses on facilitating energy sharing within such communities and proposes a community-based energy sharing method called virtual net-billing. The proposed method treats the energy community as a single prosumer whose electricity bill is calculated using net-billing, but simultaneously distributes the jointly generated surplus among the members of the community in real time, based on their individual contribution. The properties of the proposed method are explored analytically, using cooperative game theory, and through a large number of computer simulations based on real-world data. A theoretical framework, consisted of three mutually non-exclusive definitions and three numerical indicators, is proposed, in order to quantify the fairness of the virtual net-billing. Using this framework, the method is compared to five existing energy sharing methods from the scientific literature based on cooperative game theory and peer-to-peer market mechanisms. The results indicate that virtual net-billing provides the lowest trade-off between fairness and computation complexity, since it is meritocratic, results in minimised inequalities and is notably faster than the widely used game theoretic solutions. Moreover, the thesis offers a thorough statistical analysis of the energy balances of the individual prosumers and the energy community, thus deriving statistically significant correlations that can be used to estimate self-consumption and its components. These values are essential for estimating the economic effects of energy sharing on the community and other actors in the energy sector.

KEYWORDS

cooperative game theory, community energy, energy sharing, peer-to-peer, self-consumption

Публикации

- [ТРУД 1] V. Z. Gjorgievski, S. Cundeva, G.E. Georghiou, “Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review”. *Renewable Energy*, vol. 169, p. 1138-1156, 2021 (**IF = 8,004**)
- [ТРУД 2] V. Z. Gjorgievski, N.G. Chatzigeorgiou, V. Venizelou, G.C. Christoforidis, G.E. Georghiou, G.K. Papagiannis, “Evaluation of Load Matching Indicators in Residential PV Systems-the Case of Cyprus”. *Energies*, vol. 13(8), p.1934, 2020. (**IF = 2,702**)
- [ТРУД 3] V. Z. Gjorgievski, S. Cundeva, Natasa Markovska, G.E. Georghiou, “Virtual net-billing with proportional fair sharing: a computationally efficient method for real-time energy sharing in communities”, 16th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Dubrovnik, 2021
- [ТРУД 4] V. Gjorgievski, S. Cundeva, “The effects of residential battery storage on grid impact indicators”, IEEE Milan PowerTech, 2019
- [ТРУД 5] V. Gjorgievski, K. Demerdziev, B. Velkovski, V. Shokarovski, D. Dimitrov, S. Veleva, M. Kacarska, “Simulation Based Approach for Determining the Battery Control Strategy of a PV and Battery Pilot System”, 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), IEEE, Varna, 2019
- [ТРУД 6] V. Gjorgievski, S. Cundeva, “Implications of Residential Battery Charge and Discharge Rates on Self-consumption and Peak Power Exchange”, 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), IEEE, Varna, 2019
- [ТРУД 7] V. Gjorgievski, A. I. Nousedilis, E. O. Kontis, G. C. Kryonidis, G. A. Barzegkar-Ntovom, S. Cundeva, G. C Christoforidis, G. K Papagiannis, “Sizing of Electrical and Thermal Storage Systems in the Nearly Zero Energy Building Environment-A Comparative Assessment”, 2019 1st International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED), IEEE, 2019
- [ТРУД 8] V. Gjorgievski, D. Dimitrov, M. Kacarska, “On the Effectiveness of Three Battery Control Strategy Formulations for Residential PV Applications”, ETAI 2018 Conference, Struga, 2018

Содржина

Публикации	viii
Содржина.....	ix
Листа на табели.....	xiii
Листа на слики.....	xv
Номенклатура.....	xvii
АКРОНИМИ	xvii
МАТЕМАТИЧКИ СИМБОЛИ	xix
Глава 1 Вовед.....	1
1.1 ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ.....	2
1.2 ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА	2
1.3 ИСТРАЖУВАЧКИ ПРОБЛЕМ	9
1.4 ХИПОТЕЗИ	10
1.5 ПРИДОНЕС	10
1.6 СТРУКТУРА.....	11
Глава 2 Теоретска рамка за анализа на енергетски заедници	13
2.1 ПОТРЕБНИ ПРЕДУСЛОВИ ЗА ФОРМИРАЊЕ НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	13
2.2 ЧЛЕНОВИ НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	14
2.2.1 Потрошувач	14
2.2.2 Давател на енергетски услуги	14
2.2.3 Иницијатор.....	15
2.3 ВИДОВИ ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	16
2.4 ЕВРОПСКА ПРАВНА РАМКА ЗА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	18
2.5 КВАНТИФИЦИРАЊЕ НА ПРИДОБИВКИТЕ ОД ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ.....	22
2.6 ПРАВЕДНОСТ ВО ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	25
Глава 3 Математичко моделирање на енергетски биланси и трошоци на енергетски заедници	27
3.1 БИЛАНС НА МОЌНОСТ НА ПОТРОШУВАЧ-ПРОИЗВОДИТЕЛ БЕЗ БАТЕРИЈА	28
3.2 БИЛАНС НА МОЌНОСТ НА ПОТРОШУВАЧ-ПРОИЗВОДИТЕЛ СО БАТЕРИЈА	29

3.2.1	Управување на батерија со стратегија „ <i>target zero</i> “	30
3.2.2	Управување на батерија со стратегија „ <i>minimize power</i> “	31
3.2.3	Управување на батерија со стратегија „ <i>minimize energy</i> “	32
3.3	БИЛАНС НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА НА ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА	32
3.4	НУМЕРИЧКИ ИНДИКАТОРИ.....	35
3.4.1	Стапка на сопствена потрошувачка	35
3.4.2	Стапка на енергетска независност.....	35
3.4.3	Однос на произведена и потрошена енергија	36
3.4.4	Веројатност на загуба на товар.....	36
3.4.5	Фактор на дневна потрошувачка на енергија.....	36
3.5	ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ТРОШОК ЗА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА	37
3.5.1	Трошок на индивидуален потрошувач-производител.....	37
3.5.2	Трошок на енергетска заедница	37
Глава 4 Постоечки методи за колективно директно тргување со енергија		38
4.1	МЕТОДИ ЗА РАСПРЕДЕЛБА НА КОЛЕКТИВЕН ТРОШОК.....	38
4.1.1	Еднаква распределба на колективен трошок	39
4.1.2	Пропорционална распределба на колективен трошок	40
4.2	МЕТОДИ ЗА РАСПРЕДЕЛБА НА КОЛЕКТИВНА ПРИДОБИВКА	40
4.2.1	Виртуелно нето-мерење	40
4.2.2	Методи базирани на теорија на кооперативни игри.....	41
4.3	ЦЕНОВНИ МЕХАНИЗМИ ЗА ЛОКАЛНИ ПАЗАРИ НА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА	46
4.3.1	Механизам за делење на колективна сметка.....	47
4.3.2	Механизам на средна цена	48
4.3.3	Механизам на количник на понуда и побарувачка.....	49
Глава 5 Метод за виртуелна нето-наплата.....		51
5.1	ФОРМУЛАЦИЈА НА ВИРТУЕЛНА НЕТО-НАПЛАТА	52
5.2	ПРАВИЛО НА ПРОПОРЦИОНАЛНА РАСПРЕДЕЛБА	53
5.3	АНАЛИЗА НА МЕТОДОТ ЗА ВИРТУЕЛНА НЕТО-НАПЛАТА СО ПОМОШ НА ТЕОРИЈА НА КООПЕРАТИВНИ ИГРИ	57
5.3.1	Суперадитивност.....	60
5.3.2	Стабилност.....	61

Глава 6 Примена и својства на предложениот метод.....	65
6.1 КОРИСТЕНИ ПОДАТОЦИ ЗА АНАЛИЗА НА МЕТОДОТ	66
6.2 СПОРЕДБА НА МЕТОДОТ СО ПЕТ МЕТОДИ ОД ЛИТЕРАТУРАТА	67
6.2.1 Енергетска заедница со три члена	67
6.2.2 Енергетска заедница со пет члена	69
6.2.3 Енергетска заедница со десет члена	70
6.3 ПРАВЕДНОСТ НА МЕТОДОТ	71
6.3.1 Статистичка анализа на голем број енергетски заедници.....	73
6.4 ПРЕСМЕТКОВНА ЕФИКАСНОСТ НА МЕТОДОТ	76
6.5 ДИСКУСИЈА НА РЕЗУЛТАТИТЕ	77
Глава 7 Анализа на билансите на моќност на потрошувачи-производители и енергетски заедници	81
7.1 КОРИСТЕНИ ПОДАТОЦИ ВО СТАТИСТИЧКАТА АНАЛИЗА	82
7.2 СТАТИСТИЧКА АНАЛИЗА НА ИНДИКАТОРИТЕ ЗА БИЛАНСИТЕ НА ПОТРОШУВАЧКА И ЛОКАЛНО ПРОИЗВОДСТВО	82
7.2.1 Домаќинства со фотоволтаичен генератор	83
7.2.2 Домаќинства со фотоволтаичен генератор и батерија	86
7.2.3 Енергетски заедници.....	89
7.3 АПРОКСИМАЦИЈАТА НА СОПСТВЕНАТА ПОТРОШУВАЧКА	92
7.3.1 Апроксимација на стапката на сопствена потрошувачка SCR на домаќинства со фотоволтаичен генератор.....	93
7.3.2 Апроксимација на стапката на сопствена потрошувачка SCR на енергетска заедница	95
7.3.3 Апроксимација на сопствената потрошувачка $E_{sc,N}$ во енергетска заедница.....	96
7.3.4 Апроксимација на сопствена потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$ во енергетска заедница	97
7.4 РЕЛЕВАНТНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ЗА ПРЕДЛОЖЕНИОТ МЕТОД.....	98
Глава 8 Заклучок.....	100
8.1 ПРИДОНЕСИ ВО ОБЛАСТА НА ИСТРАЖУВАЊЕ	101
8.2 ПРИМЕНА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	103
8.3 НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	104
Литература.....	105

Листа на табели

ТАБЕЛА 1.1 ПРЕГЛЕД НА РЕЛЕВАНТНАТА НАУЧНА ЛИТЕРАТУРАТА ШТО СЕ ЗАНИМАВА СО ПРАВЕДНОСТ ВО ДИРЕКТНОТО ТРГУВАЊЕ СО ЕНЕРГИЈА	6
ТАБЕЛА 2.1 КЛАСИФИКАЦИЈА НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ СПОРЕД РАЗЛИЧНИ СВОЈСТВА.....	17
ТАБЕЛА 2.2 ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА ЗА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ КЛАСИФИЦИРАНИ СПОРЕД ПРИМЕНЕТАТА ТЕХНОЛОГИЈА.....	18
ТАБЕЛА 2.3 ЗАЕДНИЧКИ ПРИНЦИПИ НА ОБНОВЛИВИ И ГРАЃАНСКИ ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	19
ТАБЕЛА 2.4 РАЗЛИЧНИ ПРИНЦИПИ НА ОБНОВЛИВИ И ГРАЃАНСКИ ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	20
ТАБЕЛА 2.5 АВТОНОМИЈА, ДЕЈНОСТ, ПРАВА И ОБВРСКИ ЗА ОБНОВЛИВИ И ГРАЃАНСКИ ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	21
ТАБЕЛА 2.6 ИНДИКАТОРИ ЗА КВАНТИФИЦИРАЊЕ НА ПРИДОБИВКИ ОД ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	23
ТАБЕЛА 6.1 АКРОНИМИ ЗА СПОРЕДЕНИТЕ МЕТОДИ ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ	65
ТАБЕЛА 6.2 СУМАРНИ СТАТИСТИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ДОМАЌИНСТВАТА ОД БАЗАТА „PESAN STREET“	66
ТАБЕЛА 6.3 ИСПЛАТИ НА ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА ПРЕСМЕТАНИ СО ШЕСТЕ МЕТОДИ ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ ИЗРАЗЕНИ ВО US\$ ($N = 3$)	67
ТАБЕЛА 6.4 ЕНЕРГЕТСКИ БИЛАНС НА АНАЛИЗИРАНАТА ЗАЕДНИЦА ($N = 3$) ..	68
ТАБЕЛА 6.5 ИСПЛАТИ НА ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА ПРЕСМЕТАНИ СО ШЕСТЕ МЕТОДИ ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ ИЗРАЗЕНА ВО US\$ ($N = 5$)	69
ТАБЕЛА 6.6 ЕНЕРГЕТСКИ БИЛАНС НА АНАЛИЗИРАНАТА ЗАЕДНИЦА ($N = 5$) ..	70
ТАБЕЛА 6.7 ИСПЛАТИ НА ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА ПРЕСМЕТАНИ СО ШЕСТЕ МЕТОДИ ИЗРАЗЕНИ ВО US\$ ($N = 10$).....	71
ТАБЕЛА 6.8 СУМАРНИ СТАТИСТИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ПОТРЕБНО ПРЕСМЕТКОВНО ВРЕМЕ (СЕКУНДИ)	76
ТАБЕЛА 6.9 ПРОСЕЧНИ ВРЕМИЊА ЗА ПРЕСМЕТКА ПО БРОЈ НА ЧЛЕНОВИ ВО ЗАЕДНИЦА (СЕКУНДИ).....	77
ТАБЕЛА 6.10 СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА НА МЕТОДИТЕ ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ ОД АСПЕКТ НА ПРАВЕДНОСТ И ПРЕСМЕТКОВНА КОМПЛЕКСНОСТ	80
ТАБЕЛА 7.1 СУМАРНИ СТАТИСТИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ДОМАЌИНСТВАТА ОД БАЗАТА „SMART PV“	82
ТАБЕЛА 7.2 СУМАРНИ СТАТИСТИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ИНДИКАТОРИТЕ ЗА ПОТРОШУВАЧКА И ЛОКАЛНО ПРОИЗВОДСТВО ЗА ДОМАЌИНСТВАТА ОД БАЗАТА „PESAN STREET“	83

ТАБЕЛА 7.3 ПРОСЕЧНИ ВРЕДНОСТИ ЗА SCR, SSR И LOLP ЗА ДОМАЌИНСТВА СО ФОТОВОЛТАИЧНИ ГЕНЕРАТОРИ СО И БЕЗ БАТЕРИЈА; БАЗА „PESAN STREET“	86
ТАБЕЛА 7.4 СУМАРНИ СТАТИСТИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ИНДИКАТОРИ ЗА БИЛАНСИ НА ПОТРОШУВАЧКА И ЛОКАЛНО ПРОИЗВОДСТВО ЗА ХИПОТЕТИЧКИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА „PESAN STREET“	91
ТАБЕЛА 7.5 РЕЗУЛТАТИ ОД ЛИНЕАРНА РЕГРЕСИЈА НА SCR ЗА ИНДИВИДУАЛНО ДОМАЌИНСТВО	94
ТАБЕЛА 7.6 РЕЗУЛТАТИ ОД ЛИНЕАРНА РЕГРЕСИЈА НА SCR НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ ($N = 200$).....	95
ТАБЕЛА 7.7 РЕЗУЛТАТИ ОД ЛИНЕАРНА РЕГРЕСИЈА НА СОПСТВЕНАТА ПОТРОШУВАЧКА НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ ($N = 200$).....	96
ТАБЕЛА 7.8 РЕЗУЛТАТИ ОД ЛИНЕАРНА РЕГРЕСИЈА НА СОПСТВЕНАТА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ ($N = 200$) ...	98

Листа на слики

СЛИКА 1.1 КЛАСИФИКАЦИЈА НА МЕТОДИ ЗА ДИРЕКТНО ТРГУВАЊЕ СО ЕНЕРГИЈА.....	3
СЛИКА 2.1. УЛОГИ НА ЧИНТЕЛИТЕ ВО ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА.....	15
СЛИКА 2.2. ИНТЕРАКЦИИ МЕЃУ ЕНЕРГЕТСКАТА ЗАЕДНИЦА И ОСТАНАТИ ЧИНТЕЛИ	21
СЛИКА 2.3. ЦЕЛИ НА РАЗНИ ЧИНТЕЛИТЕ КОИШТО СЕ ЗАСЕГНАТИ ОД ПОСТОЕЊЕТО НА ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА.....	22
СЛИКА 2.4. ВИЗУЕЛЕН ПРИКАЗ НА КОМПРОМИСИ МЕЃУ РАЗЛИЧНИ ПРИДОБИВКИ НА ЗАЕДНИЦАТА	25
СЛИКА 3.1 ЕДНОСТАВЕН ПРИКАЗ НА ЕНЕРГЕТСКИ БИЛАНС ВО ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА.....	28
СЛИКА 3.2. БИЛАНСИ НА ЕНЕРГИЈА ЗА ЕДЕН ДЕН ВО ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА	34
СЛИКА 5.1. БИЛАНСИ НА ЕНЕРГИЈА ЗА ЕДЕН ДЕН ВО ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА ($N = 3$).....	56
СЛИКА 5.2. СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ ВО ЗАЕДНИЦАТА ($N = 3$).....	56
СЛИКА 5.3. РАСПРЕДЕЛБА НА СОПСТВЕНАТА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ МЕЃУ ЧЛЕНОВИТЕ НА ЗАЕДНИЦАТА СПОРЕД МЕТОДОТ ЗА ВИРТУЕЛНА НЕТО-НАПЛАТА ($N = 3$).....	57
СЛИКА 6.1. ГРАФИЧКИ ПРИКАЗ НА ИСПЛАТИТЕ НА ЧЛЕНОВИТЕ ОД ЕНЕРГЕТСКАТА ЗАЕДНИЦА ($N = 2$)	68
СЛИКА 6.2. ГРАФИЧКИ ПРИКАЗ НА ИСПЛАТИТЕ НА ЧЛЕНОВИТЕ ОД ЕНЕРГЕТСКАТА ЗАЕДНИЦА ($N = 5$)	69
СЛИКА 6.3. ГРАФИЧКИ ПРИКАЗ НА ИСПЛАТИТЕ НА ЧЛЕНОВИТЕ ОД ЗАЕДНИЦАТА ($N = 10$).....	70
СЛИКА 6.4. ПРИКАЗ НА ЧЕКОРИТЕ ВО АНАЛИЗАТА	73
СЛИКА 6.5. ВРЕДНОСТИ ЗА ЦЕЛНОВИОТ ИНДЕКС J ДОБИЕНИ ОД АНАЛИЗАТА НА 600 ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ	74
СЛИКА 6.6. ВРЕДНОСТИ НА ИНДЕКСОТ ЗА ПРАВЕДНОСТ F ДОБИЕНИ ПРИ АНАЛИЗА НА 600 ЗАЕДНИЦИ.....	75
СЛИКА 6.7. ВРЕДНОСТИ НА МАКСИМАЛНИОТ ВИШОК ДОБИЕНИ ПРИ АНАЛИЗА НА 600 ЗАЕДНИЦИ.....	75
СЛИКА 6.8. ЗАБРЗУВАЊЕ НА ПРЕСМЕТКИ НА VNB ВО СПОРЕДБА СО MV	77
СЛИКА 7.1. ТЕОРЕТСКА ЗАВИСНОСТ НА SCR И SSR ОД $GTDR$ [155].....	83
СЛИКА 7.2. НЕЛИНЕАРНА ЗАВИСНОСТ НА SCR , SSR И $LOLP$ ОД $GTDR$; БАЗА „PESAN STREET“	84
СЛИКА 7.3. SCR , $GTDR$ И F ПРЕСМЕТАНИ СО ПОДАТОЦИ ОД БАЗАТА „SMART PV“	85

СЛИКА 7.4. ПРОМЕНА НА SCR, SSR И LOLP ПОРАДИ БАТЕРИЈА; БАЗА: „PESAN STREET“	87
СЛИКА 7.5. ВРЕДНОСТ НА SCR, SSR И LOLP ВО ДОМАЌИНСТВА СО БАТЕРИИ; БАЗА: „PESAN STREET“	88
СЛИКА 7.6. ЗАВИСНОСТ НА SCR, SSR И LOLP ОД GTDR ЗА ПОТРОШУВАЧ-ПРОИЗВОДИТЕЛ СО БАТЕРИЈА; БАЗА: „PESAN STREET“	88
СЛИКА 7.7. ТИПИЧЕН ДИЈАГРАМ ЗА БИЛАНС НА ЕНЕРГИЈА ВО ХИПОТЕТИЧКА ЕНЕРГЕТСКА ЗАЕДНИЦА	89
СЛИКА 7.8. СТАТИСТИЧКИ РЕЗУЛТАТИ ЗА СОПСТВЕНАТА ПОТРОШУВАЧКА НА ЕНЕРГИЈА ВО 200 АНАЛИЗИРАНИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА: „PESAN STREET“	90
СЛИКА 7.9. СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ ($E'_{sc,N}$) ИЗРАЗЕНА КАКО ПРОЦЕНТ ОД ВКУПНАТА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ЗАЕДНИЦАТА ($E_{sc,N}$) ЗА 200 АНАЛИЗИРАНИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА: „PESAN STREET“	90
СЛИКА 7.10. ПРОСЕЧНА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ ПО ЧЛЕН НА ЗАЕДНИЦАТА; БАЗА: „PESAN STREET“	91
СЛИКА 7.11. КОРЕЛАЦИЈА МЕЃУ БРОЈОТ НА ЧЛЕНОВИ ВО ЗАЕДНИЦАТА N , ФАКТОРОТ НА ДНЕВНА ПОТРОШУВАЧКА F , ОДНОСОТ НА ПРОИЗВОДСТВОТО И ПОТРОШУВАЧКА GTDR И СТАПКАТА НА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА SCR; БАЗА: „PESAN STREET“	92
СЛИКА 7.12. СООДВЕТНОСТ НА ЛИНЕАРНИОТ МОДЕЛ ЗА АПРОКСИМАЦИЈА НА SCR ВО ИНДИВИДУАЛНИ ДОМАЌИНСТВА СО ФОТОВОЛТАИЧНИ ГЕНЕРАТОРИ; БАЗА: „SMART PV“	94
СЛИКА 7.13. СООДВЕТНОСТ НА ЛИНЕАРНИОТ МОДЕЛ ЗА АПРОКСИМАЦИЈА НА SCR ВО ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА: „PESAN STREET“ ($N = 200$).....	95
СЛИКА 7.14. СООДВЕТНОСТ НА ЛИНЕАРНИОТ МОДЕЛ ЗА АПРОКСИМАЦИЈА НА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА: „PESAN STREET“ ($N = 200$).....	96
СЛИКА 7.15. СООДВЕТНОСТ НА ЛИНЕАРНИОТ МОДЕЛ ЗА АПРОКСИМАЦИЈА НА СОПСТВЕНА ПОТРОШУВАЧКА НА ВИШОКОТ НА ЕНЕРГЕТСКИ ЗАЕДНИЦИ; БАЗА: „PESAN STREET“ ($N = 200$).....	97

Номенклатура

Акроними

Кратенка	Значење	Англиски превод
BS	Механизам на делење на сметка	Bill sharing
CHP	Когенеративна постројка	Cogeneration unit
CFC	Хлорофлуоројагледороди	Chlorofluorocarbons
CT	Одредување на јадрото	Core tatonement
CWR	Стапка на колективна добросостојба	Community welfare rate
DCS	Demand-based cost sharing	Распределба на колективен трошок според индивидуален удел во вкупна побарувачка
DBS	Demand-based benefit sharing	Распределба на колективна придобивка според индивидуален удел во вкупна побарувачка
ECS	Еднаква распределба на колективен трошок	Equal cost sharing
EBS	Еднаква распределба на колективна придобивка	Equal benefit sharing
ESCO	ЕСКО претпријатие	Energy service company
EI	Индекс за еднаквост	Equality index
GTDR	Однос на произведена и потрошена енергија	Generation to demand ratio
HCFC	Хидрохлорофлуоројагледороди	Hydrochlorofluorocarbons
ICT	Информациски и комуникациски технологии	Information and communication technologies
IEMD	Директива за внатрешен пазар на електрична енергија	Directive of the Internal Electricity Market
IIR	Стапка на зголемување на приходот	Income increase rate
IRR	Внатрешна каматна стапка	Internal rate of return

LCC	Трошоци во работен циклус на уред/постројка	Life-cycle costs
LCOE	Нивелирана цена на електрична енергија	Levelized cost of electricity
LMGI	Индикатори за биланси на потрошувачка и локално производство	Load matching and grid interaction indicators
LP	Линеарно програмирање	Linear programming
LOLP	Веројатност за загуба на товар	Loss of load probability
MMR	Механизам на средна цена	Mid-market rate
NLP	Нелинеарно програмирање	Non-linear programming
NPV	Нето сегашна вредност	Net present value
PRR	Стапка на намалување на трошок	Payment reduction rate
PV	Фотоволтаик	Photovoltaic
PVT	Хибриден фотоволтаик со соларен термален колектор	Photovoltaic thermal hybrid collector
PWI	Индекс за доброволно учество	Participation willingness index
QoE	Квалитет на искуство	Quality of experience
RED II	Дополнета Директива за промоција на користење на енергија од обновливи извори	Recast of the Renewable Energy Directive
SCR	Стапка на сопствена потрошувачка	Self-consumption rate
SDR	Механизам на количник на понуда и побарувачка	Supply and demand ratio
SSR	Стапка на енергетска независност	Self-sufficiency rate
SP	Метод на единечна цена	Single pricing method
VCG	Викри-Кларк-Гровс	Vickrey-Clark-Groves
WACC	Пондерирана просечна цена на капитал	Weighted average cost of capital

Математички симболи

Параметар	Дефиниција
i	Индекс на член во енергетска заедница
N	Множество од сите членовите во енергетската заедница
n	Вкупен број на членови во енергетската заедница
t	Временски чекор
t_n	Краен број на временски чекори во квази-стационарен модел
$p_{l,i}(t)$	Моќност на потрошувачка на електрична енергија на член i во временски чекот t
$p_{g,i}(t)$	Моќност на произведена електрична енергија на АС страната на член i во временски чекот t
$p_{im,i}(t)$	Моќност преземена од мрежата од страна на член i во временски чекот t
$p_{ex,i}(t)$	Моќност предадена во мрежата од страна на член i во временски чекот t
$p_{sc,i}(t)$	Моќност на сопствена потрошувачка на локално производство на член i (анг. <i>self-consumption</i>)
$p_{b,i}(t)$	Моќност на батерија на член i од АС страната
$p_{b,dc,i}(t)$	Моќност на батерија на член i од DC страната
$p_{dis,i}(t)$	Моќност на празнење на батерија на член i од АС страната
$p_{ch,i}(t)$	Моќност на полнење на батерија на член i од АС страната
$p_{target,i}(t)$	Моќност на дебаланс помеѓу производство и потрошувачка на член i во момент t
$p_{rated,i}(t)$	Максимална дозволена моќност на полнење или празнење на батеријата на член i во момент t
$\eta_{dis,i}$	Коефициент на ефикасност на празнење на батеријата на член i
$\eta_{ch,i}$	Коефициент на ефикасност на полнење на батеријата на член i
k_i	Параметар со којшто се моделира коефициентот на ефикасност на батеријата
$E_{b,i}(t)$	Енергија складирана во батеријата на член i во временски момент t

$\Delta E_{b,i}(t)$	Износ за којшто ќе се промени енергијата складирана во батеријата на член i во временски момент t поради полнење или празнење
$E_{min,i}$	Минимално нето-количество енергија што може да се складира во батеријата на член i
$E_{max,i}$	Максимално нето-количество енергија што може да се складира во батеријата на член i
$P_{im,N}(t)$	Моќност преземена од мрежата од страна на енергетска заедница N во временски чекот t
$P_{ex,N}(t)$	Моќност предадена во мрежата од страна на енергетска заедница N во временски чекот t
$P_{sc,N}(t)$	Моќност на сопствена потрошувачка на локално производство на енергетската заедница N ; базирана на сумарни дијаграми за производство и потрошувачка
$P'_{sc,N}(t)$	Моќност на сопствена потрошувачка на вишок локално производство во енергетската заедница N ; Еднаква на вкупната моќност којашто дел од членовите (нето-производителите) на заедницата ја предаваат на мрежата, а е истовремено преземена од мрежата од други членови (нето-потрошувачите) во таа заедница.
$P'_{sc,i}(t)$	Дел од сопствената потрошувачка на вишокот локално производство $P'_{sc,N}(t)$ во енергетската заедница N што се припишува на членот i
$E_{\ell,N}$	Вкупна потрошувачка на енергија на енергетската заедница N
$E_{g,N}$	Вкупно произведена енергија од сите членови на енергетската заедница N
$E_{sc,N}$	Енергија на сопствена потрошувачка на заедницата N
$E'_{sc,i,N}$	Збир на енергиите на сопствена потрошувачка од сите членови на заедницата N , зад точките на нивно приклучување
$E'_{sc,N}$	Енергија на сопствена потрошувачка на вишокот во заедницата N
$E_{im,N}$	Енергија преземена од мрежата од страна заедницата N
$E_{ex,N}$	Енергија предадена во мрежата од страна на заедницата N
$C_{NB}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на индивидуална нето-наплата
$C_{VNM}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според

	методот на виртуелно нето-мерење (анг. <i>Virtual net-metering</i>)
$C_{EC}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i при еднаква распределба на колективен трошок (анг. <i>Equal cost sharing</i>)
$C_{PS}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i при пропорционална распределба на колективен трошок (анг. <i>Proportional cost sharing</i>)
$C_{ES}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i при еднаква распределба на колективна придобивка, т.е. при Нешово пазарење (анг. <i>Nash bargaining</i>)
$C_{VNB}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на виртуелна нето-наплата (анг. <i>Virtual net-billing</i>)
$C_{SV}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на Шеплиева вредност (анг. <i>Shapley value</i>)
$C_{MV}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот МинВар (анг. <i>MinVar</i>)
$C_{BS}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на делење на сметка (анг. <i>Bill sharing</i>)
$C_{MMR}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на средна цена (анг. <i>Mid-market rate</i>)
$C_{SDR}(\{i\})$	Износ на сметката за електрична енергија издадена на член i според методот на однос на предадена и преземена енергија (анг. <i>Supply and demand ratio</i>)
$C(N)$	Колективен трошок на енергетска заедница
\mathbf{x}	Вектор на исплати којшто се состои од елементи на индивидуални исплати x_1, x_2, \dots, x_n .
ϕ_i	Исплата на член i според Шеплиева вредност
λ	Цена на електрична енергија преземена од мрежа
μ	Цена на електрична енергија предадена во мрежа
π	Цена на електрична енергија којашто директно се тргува и/или споделува помеѓу членовите на енергетската заедница
φ_i	Дел од вкупно произведената енергија од колективниот генератор што се припишува кон член i при виртуелно нето-мерење
$\alpha_i(t)$	Дел од сопствената потрошувачка на вишокот производство што се припишува кон член i

Глава 1 Вовед

Мотивирани од климатските промени и сè пониските инвестициски трошоци за дистрибуирано производство и складирање на енергија, сè поголем број крајни корисници изразуваат интерес за формирањето на енергетски заедници [1]. Енергетските заедници се правни и социјални структури што служат како двигател за остварување на здружени енергетски проекти [2]. Европското законодавство неодамна воспостави дефиниции за две категории на енергетски заедници во рамки на законскиот пакет „Чиста енергија за сите Европејци“ (анг. *Clean Energy for All Europeans*) на Европска Унија (ЕУ) [3]. Преку Директива 2019/944/ЕУ за заедничките правила за внатрешен пазар на електрична енергија [4], ЕУ го дефинираше терминот „граѓански енергетски заедници“, додека преку Директива 2018/2001/ЕУ за промоција на користењето на енергија од обновливи извори [5], таа го дефинираше терминот „обновливи енергетски заедници“. Според овие директиви, земјите членки на ЕУ треба да обезбедат соодветни услови коишто на крајните потрошувачи ќе им овозможат непречено, доброволно и отворено да се здружуваат во енергетски заедници преку коишто ќе можат да произведуваат, складираат, пренесуваат, тргуваат и меѓусебно разменуваат енергија. Така, еден потрошувач на електрична енергија кој поседува дистрибуиран генератор треба да има право директно да тргува со локално произведената електрична енергија со друг потрошувач, преку дигитална платформа, по однапред утврден механизам. Овој механизам на тргување со енергија во англиската литература се сретнува под термините „peer-to-peer energy trading“ или „community-based energy trading“, а соодветниот македонски термин кој ќе биде користен во оваа дисертација е „директно тргување со енергија“.

Како резултат на ваквиот развој во ЕУ, но и како резултат на светските развојни насоки, темата на директно тргување со енергија е активно поле на истражување со голем број горливи прашања од практичен и теоретски аспект. Тоа се воочува преку обемната научна литература на оваа тема, третирана во прегледните трудови [6]–[11] и преку тековните пилот проекти, како што се на пример проектите дискутирани во [12], [13]. Примери за енергетски заедници коишто тргуваат со енергија се: комплексот живеалишта Свалин во Шведска [1], Заедницата Комуниа Соларе Локале во Италија [14], Пикло во Обединетото Кралство, Вадерброн во Холандија, Бруклинската микромрежа во Соединетите Американски Држави [15] или Зоненкомјунити (анг. *sonnenCommunity*) во многу европски земји [12]. Во основа, потенцијалот за директно тргување со енергија во заедница со потрошувачи-производители се појавува како резултат на (1) временското несогласување на локалното производство и потрошувачка на потрошувачите-производители и (2) способноста на еден потрошувач-производител да помести дел од својата потрошувачка за друг временски интервал [16]. Постојат четири бизнис модели за директно тргување и тоа: (1) модел за тргување со енергија помеѓу потрошувачи-производители (анг. *behind-the-meter trading*), (2) модел на

локален пазар за флексибилност (анг. *local flexibility*), (3) модел на пазар за повеќе-класно тргување со енергија (анг. *multi-class energy trading*) и (4) модел на формирање на федеративни производни единици (анг. *federated power plant formation*) [6].

1.1 Предмет на истражување

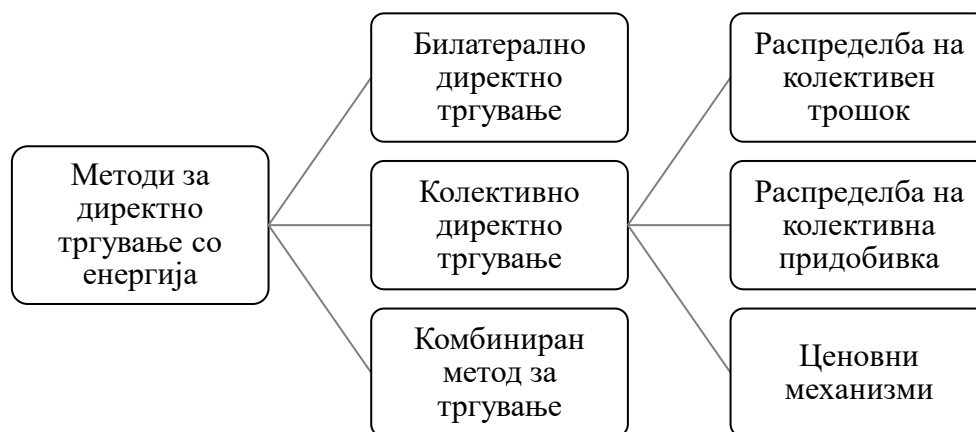
Предмет на истражувањето во оваа докторска дисертација се енергетските заедници составени од потрошувачи-производители кои учествуваат во директно тргување со енергија според т.н. бизнис модел за тргување со енергија помеѓу потрошувачи-производители. Притоа, еден потрошувач-производител тргува со вишокот на локално произведената електрична енергија со друг член на енергетската заедница по цена којашто на двата члена им гарантира економска придобивка [17]. Се претпоставува дека членовите на енергетската заедница се автономни чинители и дека трети лица не смеат да управуваат со производството или потрошувачката на членовите на заедницата. За да тргуваат и разменуваат енергија, членовите на заедницата имаат пристап до систем што содржи (1) соодветна физичка инфраструктура и (2) виртуелна платформа. Физичката инфраструктура ги вклучува системите за производство и складирање на енергија, врската со дистрибутивната мрежа за електрична енергија и опремата за мерење и меморирање на временските дијаграми на производството и потрошувачката на енергија [18]. Виртуелната платформа, од друга страна, ја овозможува комуникацијата меѓу членовите на енергетската заедница и останатите чинители на пазарот на електрична енергија. Оваа генерална рамка нуди спектар на можности за организирање и реализација на директното тргување со енергија.

1.2 Преглед на литература

Во продолжение се дадени преглед и класификација на дел од поновата литература што се занимава со директно тргување со енергија. Иако оваа област е релативно нова, бројот на научни трудови што активно се публикуваат расте со таква динамика, што е речиси невозможно да се спроведе сеопфатен преглед на сите публикации. Наместо тоа, оваа потточка прво дава генерална слика за областа на директно тргување со енергија, а потоа со посебно внимание нуди преглед на аспектите на праведност и пресметковна комплексност. Праведноста и пресметковната комплексност се две својства што се неопходни за еден метод за директно тргување со енергија да биде практично применлив. Дел од постоечките методи што имале најголемо влијание во истражувачката област изминативе години се подетално елаборирани и применети подоцна, во останатите глави од оваа дисертација. Тие методи служат како референтни, т.е. со нив е спореден методот за директно тргување што е развиен во оваа дисертација.

Генерално, директното тргување со електрична енергија може да се спроведе (i) целосно билатерално (анг. *fully peer-to-peer*), (ii) колективно (анг. *community-based*) или (iii) како комбинација од двете [19], како што е прикажано на Слика 1.1. При билатералното директно тргување, купувачот и продавачот непосредно се спогодуваат за цената и количината на тргуваната енергија [20]. Колективното директно тргување,

од друга страна, ги поврзуваа сите учесници на едно место и извлекува додадена вредност преку агрегирањето на нивните дијаграми за производство и потрошувачка.



Слика 1.1 Класификација на методи за директно тргување со енергија

Од интерес за оваа докторска дисертација е колективното директно тргување со енергија помеѓу потрошувачи-производители организирани во енергетска заедница. При колективно директно тргување, енергетската заедница препушта дел од обврските за регулирање на тргувањето на т.н. управител на заедницата. Управителот на заедницата е независно трето лице (или дигитална платформа) кое ги надгледува тековите на енергија во заедницата, ја максимизира општествената добросостојба и обезбедува праведна распределба на придобивките и/или трошоците на здруженото делување [7]. Од избраниот метод за директно тргување зависи начинот на кој ќе се пресметуваат месечните сметки за електрична енергија на членовите на заедницата. Методот за директно тргување може да се базира на (1) на методи за распределба на колективен трошок, (2) метод за распределба на колективна придобивка или (3) ценовни механизми за локални пазари на електрична енергија.

Ценовните механизми ги мотивираат членовите на заедницата локално да тргуваат со енергија врз основа на цени што го рефлектираат моменталниот биланс на моќности во заедницата [13]. Цените се намалуваат кога има зголемено локално производство, а растат во периоди кога има зголемена локална потрошувачка. Во зависност од избраниот механизам, цените може да се пресметуваат на месечно ниво [21] или со повисока временска резолуција [21]–[24]. Пример се механизмот за делење колективна сметка (анг. *bill sharing*) (BS), механизмот на средна цена (анг. *mid-market rate*) (MMR) и механизмот на количник на понуда и побарувачка (анг. *supply and demand ratio*) (SDR). Акронимите на овие, но и на други методи што ќе се користат низ дисертацијата се напишани со латинична азбука со цел да се обезбеди усогласеност на

номенклатурата со релевантната научна литература. Формулациите на овие механизми се детално елаборирани во четвртата глава од докторската дисертација, а истите служат како референтни методи подоцна во анализите. Иако формулациите на овие механизми се математички компактни, воочени се низа предизвици што ја попречуваат нивната практичната имплементација [25]. Затоа, практичната имплементација на директно тргување сè почесто се базира на т.н. виртуелно мерење.

Концептот на виртуелно мерење, на членовите на енергетската заедница им овозможува да ја користат енергијата произведена на друга локација, како таа да е локално произведена [26]. Кај ваквите методи, управителот на заедницата делува како независен арбитер кој на крајот од секој период за наплата врши распределба на колективните трошоци и/или заштеди меѓу членовите на заедницата [27]. Начинот на кој се врши оваа распределба значително влијае врз задоволството на членовите на заедницата. Еден потрошувач-производител може да биде незадоволен доколку смета дека распределбата што ја определил управителот е неправедна. Според тоа, еден од најголемите практични и научни предизвици во ова поле е да се изнајде метод за директно тргување кој ќе биде праведен, но кој истовремено ќе биде доволно компактен и едноставен за да може да се применува во енергетски заедници со многу членови.

Иако концептот на праведност наидува на сè поголем интерес во областа на директно тргување со енергија, постои голема неусогласеност меѓу начините на кои овој термин се анализира и третира, како што е покажано во Табела 1.1. Воочени се три генерални пристапи за анализа на праведноста во литературата за директно тргување. Првиот пристап подразбира описна анализа на праведноста. На групата трудови што спаѓаат во оваа категорија главно им недостасува примена на нумерички индикатори или некоја универзална аналитичка рамка за анализа на праведноста. Пример за тоа е методот предложен во [28]. Авторите на [28] тврдат дека нивниот метод е праведен затоа што е оптимизациски проблем кој ја зема предвид желбата на секој член да учествува во директно тргување. Според тоа, тие ја поистоветуваат праведноста со индивидуалната желба да се учествува во директното тргување. Соодветна нумеричка анализа на праведноста недостасува и во [29], каде авторите предлагаат колективната придобивка да биде распределена меѓу членовите на заедницата според нивниот маргинален придонес. Терминот „маргинален придонес на член i “ ја означува разликата на колективните заштеди што енергетската заедница ги остварува со членот i и без членот i и служи за пресметување на делот од колективните заштеди што се припишуваат за членот i . Од друга страна, методот за директно тргување предложен во [30] поаѓа од тоа дека тргувањето е праведно доколку сите учесници на пазарот имаат еднакво незадоволство. Авторите на [30] го дефинираат незадоволството на учесниците на пазарот како количник на фактички реализираниот профит и максимално можниот профит за даден период на наплата.

Вториот пристап за анализа на праведност подразбира анализа базирана на теоријата на кооперативни и некооперативни игри. Кога еден метод се анализира со

примена на теоријата на некооперативни игри, најчесто се истражува дали тој води до резултат што е еднаков на Нешовиот еквилибриум [31]. Кога тоа е случај, тогаш секој член на заедницата завршува со оптимален исход и не може да си ја подобри својата позиција. Авторите на [31] и [32], на пример, предлагаат методи за распределба на колективно создадената заштеда базирани на овој принцип. Од друга страна, теоријата на кооперативни игри опишува односи меѓу актери што се здружиле во една коалиција со цел поефикасно да ги остварат своите цели. Кога се врши анализа со примена на теоријата на кооперативни игри, за еден метод се вели дека е праведен доколку тој води до решение што е во јадрото на кооперативната игра [33]. „Јадрото“ на кооперативната игра е теоретски концепт кој служи за опишување на тоа дали коалиција составена од сите членови е стабилна. Се вели дека коалицијата е стабилна доколку нејзината колективна придобивка целосно се распредели меѓу сите членови така што секој член е задоволен со делот што го добил. Во таа смисла, јадрото на кооперативната игра е множество од сите распределби што на членовите на коалицијата им гарантираат дека нема да си ја подобрат позицијата доколку ја напуштат коалицијата. Стабилноста на коалицијата зависи од методот што се применува за распределба на колективната придобивка на коалицијата. Еден метод што често се применува за оваа цел е методот за Нешово пазарење (анг. *Nash bargaining problem*) (NB) предложен од Џон Неш во 1950 година [34]. Во литературата за директно тргување, Нешовото пазарење е применето во [35] и [36] и иако решението што го нуди не е секогаш во јадрото, некои автори го сметаат за праведно затоа што задоволува Парето-оптималност [37] (состојба во која подобрување на исплатата на еден член значи влошување на исплатата на друг член), ефикасност (целосна распределба на придобивка меѓу сите членови) и индивидуална рационалност (учесниците на тргувањето немаат финансиска загуба).

Недостатокот на Нешовото пазарење е тоа што не гарантира групна рационалност [33]. Кога условот на индивидуална рационалност не е задоволен за еден член, тогаш тој има финансиска загуба од членувањето во коалицијата, па ќе биде мотивиран истата да ја напушти. Соодветно на тоа, кога условот на групна рационалност не е задоволен за група членови (подкоалиција), тогаш таа група ќе биде мотивирана да се отцепи од главната коалиција и да продолжи да фигурира како одделна и самостојна заедница. За разлика од Нешовото пазарење, Шеплиевата вредност (анг. *Shapley value*) (SV) [38] и нуклеолусот [39] имаат формулации што поконкретно задоволуваат критериуми за праведност.

Во кооперативни игри со конвексна карактеристична функција, Шеплиевата вредност гарантира решение што е праведно, т.е. што е во јадрото на кооперативната игра. Шеплиевата вредност го добила своето име по Лојд Шепли, кој во 1951 година за истата добива Нобелова награда за економија [40].

Табела 1.1 Преглед на релевантната научна литературата што се занимава со праведност во директното тргување со енергија

Ref	Вид	Метод	Нумерички индикатор
[28]	Колективно	модел FRESH:COM	-
[29]	Колективно	Инспириран од SV	-
[30]	Колективно	Метахеуристичка оптимизација	-
[32]	Билатерално	Нешов еквилибриум	-
[31]	Колективно	Нешов еквилибриум	-
[35]	Колективно	Нешово пазарење	-
[36]	Колективно	Нешово пазарење	-
[39]	Колективно	SV	-
[41]	Колективно	Апроксимативен SV	-
[42]	Колективно	Апроксимативен SV	-
[43]	Колективно	Нуклеолус и маш. учење	-
[27]	Колективно	SV, MV	Јачина на стабилност
[44]	Колективно	Споредба на 9 методи	Максимален вишок
[45]	Билатерално	Оптимизација	Нешова општествена добросостојба
[38]	Колективно	SV, нуклеолус, VCG, рамномерна цена	Максимален вишок, стабилност
[46]	Билатерално	Мин-макс праведност	Џејнов индекс J
[47]	Колективно	Економски диспечинг	J , QoE, min-max
[48]	Колективно	SV, BS, MMR, SDR	F
[22]	Колективно	BS, MMR, SDR	PWI, EI
[49]	Колективно	Аукција	PRR, IIR, CWR

Шеплиевата вредност нуди распределба на колективната придобивка така што на секој член му издвојува исплата што е пропорционална на неговиот просечен маргинален придонес и којашто задоволува низа математички својства што се корисни од аспект на праведност [50]. За жал, кооперативните игри ретко имаат конвексна карактеристична функција, па Шеплиевата вредност не секогаш е во јадрото, т.е. не секогаш нуди праведна распределба на трошоците и заштедите. Нуклеолусот, од друга страна, се пресметува со помош на низа линеарни оптимизациски проблеми кои водат до решение што секогаш е во јадрото, доколку јадрото не е празно [38]. Поради комбинаторната природа на пресметките, Шеплиевата вредност и нуклеолусот имаат пресметковна комплексност од $O(2^n)$, т.е. пресметковно време што се удвојува со додавање на нов член во заедницата. Тоа е главна причина зошто нивната примена е ограничена на помали енергетски заедници. Предложени се разни апроксимативни методи за Шеплиевата вредност во [41] и [42], со цел да се подобри неговата скалабилност. Обиди за редуцирање на пресметковната комплексност на нуклеолусот, пак, се реализирани преку примена на методи од машинско учење [43] или со заменување на последователниот оптимизациски проблеми со еден оптимизациски проблем, [27] и [44]. Пример за таков метод е МинВар (анг. *MinVar*) (MV) предложен во [27]. Методот на Нешово пазарење, Шеплиева вредност и МинВар се детално презентирани во четвртата глава од оваа докторска дисертација.

Третиот пристап за анализа на праведноста на некој метод за директно тргување подразбира негова споредба со референтен (праведен) метод. За референтен метод обично се користи некој од претходно дискутираните методи од теоријата на кооперативни игри, а споредбата се врши со примена на соодветни нумерички индикатори кои квантифицираат колку решението на предложениот метод отстапува од (или се совпаѓа со) решението на референтниот метод. На пример, [45] го споредува решението од методот за билатерално тргување што го предлага со решението добиено со примена на Нешово пазарење. Како индикатор за праведност, авторите на [45] ја користат Нешовата социјална добросостојба. Во [38], авторите заклучиле дека од четирите споредени методи (Шеплиева вредност, нуклеолус, Викри-Кларк-Гровс (анг. *Vickrey-Clark-Groves*) (VCG) и рамномерна цена), само нуклеолусот ги задоволува сите својства за праведност и посакуваните својства на методот на директно тргување.

Водени од сличен заклучок, авторите на [44] бараат алтернативно решение на нуклеолусот кое има слични својства како и нуклеолусот, но притоа има помала пресметковна комплексност. Во таа насока тие предлагаат два нови методи (барање на јадрото (анг. *core tâtonnement*) (CT) и едностепениот алгоритам за дефинирање на цени базиран на линеарно програмирање (анг. *single pricing method*) (SP)) коишто гарантираат решение што е во јадрото. По спроведените анализи, авторите заклучуваат дека предложените методи CT и SP навистина имаат помала пресметковна комплексност од нуклеолусот, но тие повторно зависат од пресметка на заштедите на сите коалиции што може да се појават во заедницата. Така, времињата за пресметка на предложените методи во [44] се значителни, дури и подолги од времињата потребни за

пресметка на Шеплиевата вредност. Постојат низа нумерички индикатори што може да служат за квантифицирање на праведноста на одреден метод за директно тргување со енергија. Пример за такви индикатори се: максималниот вишок, Џејновиот индекс J , квалитетот на искуството, односот меѓу максималната и минималната исплата, индексот за праведност F , индексот на доброволно учество и индексот за еднаквост. Максималниот вишок (анг. *maximum excess*) е концепт кој произлегува од теоријата на кооперативни игри, а како нумерички индикатор е користен во [44] и [38].

Јачината на стабилност на коалицијата е индикатор кој исто така е предложен и применет во [27]. Џејновиот индекс потекнува од научната литература што се занимава со изучување на телекомуникациски системи, но наоѓа примена во анализа на праведност на методи за директно тргување. Во [46] и [47], Џејновиот индекс е применет така што еден метод се смета за праведен доколку тој резултира во еднаква распределба на колективно создадената придобивка. Како што и самите автори нагласуваат, „тоа не е особено интересен исход“ од тргувањето, па затоа користат и други индикатори за анализа на праведноста меѓу кои што се квалитетот на искуство (анг. *quality of experience*) (QoE) и односот на максималната и минималната исплата. Меѓутоа Џејновиот индекс може да се користи и за квантифицирање на сличноста на одредено решение со некое друго референтно решение. Истата идеја ја следи и индикаторот на праведност F [51], кој е применет во [48] за споредба на Шеплиевата вредност со механизмот за делење сметка, механизмот на средна цена и механизмот на количник на понуда и побарувачка. Авторите на [48] ги споредуваат механизмот за делење сметка, механизмот на средна цена и механизмот на количник на понуда и побарувачка повторно и во [22], но овој пат со примена на индексот на доброволно учество (анг. *participation willingness index*) (PWI) и индексот за еднаквост (анг. *equality index*) (EI). Стапката на намалување на трошок (анг. *payment reduction rate*) (PRR), стапката на зголемување на приходот (анг. *income increase rate*) (IIR) и стапката на колективна благосостојба (анг. *community welfare rate*) (CWR), пак, се применети во [49].

Овој краток преглед на литературата покажува дека при колективно директно тргување со енергија, праведна распределба на колективната придобивка може да се постигне само доколку се користат пресметковно посложени оптимизациски и итеративни методи, базирани на теорија на кооперативни игри. Примери за вакви методи се нуклеолусот, MV, ST и SP. Најчесто, пресметките потребни во овие методи се предолги и непрacticalни во реални услови каде се среќаваат енергетски заедници со многу членови. Од друга страна, поедноставните методи за колективно директно тргување (механизми за распределба на трошоци и придобивки, ценовни механизми за локално пазари итн.) не гарантираат праведност, а се почесто применети поради нивната компактна и интуитивна формулација. Како резултат на тоа, значителен истражувачки предизвик во областа на директно тргување е да се изнајде метод кој ќе биде праведен, а доволно компактен за да може да биде практично применлив во реални услови.

1.3 Истражувачки проблем

Воочениот компромис меѓу праведноста и пресметковната комплексност на методите за директно тргување со енергија е главна мотивација за истражување во оваа дисертација. Истражувањето, притоа, е спроведено во следниве две насоки:

- 1) Развој на метод за пресметување на сметките на електрична енергија на членовите на заедницата кои директно тргуваат со енергија. Методот треба да:
 - Обезбеди праведна распределба на колективната придобивка на енергетската заедница, согласно заслугата на секој член од заедницата;
 - Биде пресметковно ефикасен и практично применлив со постоечката електроенергетска инфраструктура;
 - Нуди финансиски стимул за учество на потрошувачи и потрошувачи-производители во енергетската заедница;
 - Води сметка за тоа дали потрошувачката на енергија се задоволува од мрежата, фотоволтаичниот генератор или пак е тргувана по пат на директно тргување со друг член на заедницата, во насока на полесно формирање на тарифи за наплата на користењето на електроенергетските мрежи;
 - Ја минимизира потребата од човечка интеракција во процесот на тргување со енергија.
- 2) Подобрување на разбирањето за енергетските биланси (1) на поединечни потрошувачи-производители со фотоволтаични генератори и (2) на енергетските заедници со потрошувачи и потрошувачи-производители со фотоволтаични генератори.

За појасно дефинирање на истражувачкиот проблем, нека се анализира множество од потрошувачи и потрошувачи-производители со фотоволтаични генератори $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ организирани во енергетска заедница. Членовите на множеството може да се наоѓаат во заеднички објект или да бидат географски дистрибуирани, но поврзани преку електроенергетскиот систем. Потрошувачите и потрошувачите-производители се автономни чинители, т.е. нивните единици за потрошувачка, производство и складирање на енергија не се контролирани од трето лице. Секој од нив може да одлучи да склучи договор со снабдувач на електрична енергија, така што наплатата за месечните фактури за електрична енергија ќе му бидат пресметани врз основа на индивидуално делување, или врз основа на делување како дел од енергетска заедница.

Во случај потрошувачот-производител i да одлучи да настапи индивидуално, снабдувачот ја пресметува неговата сметка за електрична енергија врз основа на метод на нето-наплата. Според овој метод, енергијата која што i ја инјектира во мрежата се вреднува со помала единечна цена отколку енергијата што ја презема од мрежата. Доколку i не поседува сопствен фотоволтаичен генератор, неговите месечни трошоци за електрична енергија се пресметуваат само врз основа на потрошената електрична енергија.

Доколку потрошувачот-производител i одлучи да настапи како дел од енергетска заедница, неговата сметка за електрична енергија треба да биде пресметана по метод кој овозможува директно тргување. Водејќи се од тоа дека членовите на заедницата не инсталираат дополнителна управувачка и комуникациска опрема, директното тргување со енергија главно зависи од временското несогласување на производството и потрошувачката на секој од членовите поединечно, како и во рамки на заедницата како целина. Кога еден член на заедницата е нето-производител, тој може вишокот произведена енергија да ја предаде на друг член на заедницата. Проблемот кој се разгледува во оваа дисертација е развојот на метод на директно тргување кој е праведен и пресметковно ефикасен.

1.4 Хипотези

Во докторската дисертација, поставени се две хипотези:

Прва хипотеза: Еден метод за директно тргување со енергија, наменет за енергетски заедници, е праведен и пресметковно ефикасен доколку ја распределува колективната придобивка на енергетската заедница во реално време, пропорционално на придонесот што секој член го има во создавање на таа придобивка.

Втора хипотеза: Постои статистички значителна корелација помеѓу стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и односот меѓу произведената и потрошената електрична енергија (GTDR) на ниво на индивидуален потрошувач-производител и на ниво на енергетска заедница.

Се воочува дека првата хипотеза е тесно поврзана со првата оска на истражувањето и се занимава со развојот на праведен и пресметковно ефикасен метод за директно тргување. Резултатите од Глава 5 и Глава 6, кои се презентирани во [Труд 3], ја поддржуваат оваа хипотеза. Од друга страна, втората хипотеза се занимава со втората оска на истражувањето и ги проучува билансите на моќност на потрошувачи-производители и енергетски заедници. Тврдењето на оваа хипотеза е поддржано од резултатите презентирани во Глава 7, дел од кои се публикувани во [Труд 2] и [Труд 4].

1.5 Придонес

Оваа докторска дисертација нуди детален преглед на новата научна литература од областа на енергетските заедници, директното тргување со енергија и релевантната Европска легислатива што ја покрива оваа област. Спроведена е кратка компаративна анализа на концептот на праведност, според неговата застапеност во литературата за директно тргување и останата релевантна литература. Врз основа на таа анализа, понудена е теоретска рамка за анализа на праведноста, базирана на три дефиниции и три нумерички индикатори. Потоа, предложен е математички модел со помош на кој може да се издвои делот од сопствената потрошувачка на заедницата кој е предизвикан од директното тргување со енергија. Со примена на овој математички модел, предложен е метод за директно тргување со енергија, кој е праведен и пресметковно

ефикасен. Методот ја третира енергетската заедница како еден потрошувач-производител чија сметка се пресметува со нето-наплата, а придобивката од директното тргување ја распределува меѓу членовите на заедницата во реално време, според нивниот индивидуален придонес. Со примена на претходно поставената рамка за анализа на праведноста, предложениот метод за директно тргување е спореден со пет постоечки методи од литературата за директно тргување со енергија. Со цел да се добие појасна слика за билансите на моќност и енергија во енергетски заедници, анализирани се индивидуални потрошувачи-производители и енергетски заедници. Од пресметаните енергетски биланси, утврдена е статистички значителна корелација меѓу низа технички параметри со која се подобрува разбирањето за факторите што ја зголемуваат заштедата на една заедница.

1.6 Структура

Докторска дисертација е структурирана во девет глави.

- **Глава 1:** Првата глава претставува вовед во проблематиката на директно тргување со енергија. Таа ја изложува мотивацијата зад истражувањето и дава критички преглед на постоечката литература за директно тргување со аспект на праведност и пресметковна комплексност. Врз основа на овој преглед презентирани се истражувачкиот проблем, хипотезите и придонесот на дисертацијата.
- **Глава 2:** Втората глава дава генерална теоретска рамка за поимот „енергетска заедница“. Даден е систематски преглед на потребните услови за формирање на енергетски заедници, класифицирани се видовите енергетски заедници, својствата што енергетските заедници треба да ги имаат според европската легислатива како и начините за квантифицирање на придобивките на енергетски заедници, според релевантната литература од областа. Потоа, изложени се три дефиниции за праведност што подоцна ќе послужат за толкување на нумеричките резултати во шестата глава.
- **Глава 3:** Третата глава подетално се занимава со енергетски заедници чиишто членови директно тргуваат со енергија. Презентиран е математичкиот модел што служи за пресметка на енергетските биланси на заедниците и нивните членови. Потоа, презентирани се релевантните нумерички индикатори што служат за анализа на енергетските биланси. На крај, изнесени се формулите со кои се пресметуваат трошоците за електрична енергија на индивидуално и колективно ниво.
- **Глава 4:** Врз основа на анализите од претходната глава, Глава 4 ги изложува математичките формулации на 10 (десет) репрезентативни методи од постоечката литература за колективно директно тргување со енергија. Методите се избрани врз основа на нивната застапеност во научната литературата и врз основа на цитираноста на релевантните трудови во коишто тие се предложени.

Пет од овие методи се реплицирани во следните глави и подоцна се користат за споредба на нивните резултати со резултатите од предложениот метод во Глава 5.

- **Глава 5:** Во петтата глава е презентирани методот за виртуелна нето-наплата. Со примена на теорија на кооперативни игри, анализирани се својствата на предложениот метод. Дискусијата е изложена низ ригорозна математичка рамка, со дефинирање на соодветни теореми и приложување на математички докази за тие теореми.
- **Глава 6:** Во шестата глава, предложениот метод за виртуелна нето-наплата е анализиран со помош на компјутерски симулации на голем број енергетски заедници. Методот е спореден со пет постоечки методи од литературата, претходно изнесени во Глава 4. Користени се неколку нумерички индикатори за дискусија на неговите предности и недостатоци.
- **Глава 7:** Во седмата глава е спроведена статистичка анализа на билансите на моќност во домаќинствата од две реални јавно достапни податочни бази и на хипотетички енергетски заедници создадени со нивна комбинација. Со помош на статистички анализи, утврдени се факторите коишто влијаат врз сопствената потрошувачка на домаќинствата и енергетските заедници.
- **Глава 8:** Осмата глава дава заклучок на сработеното и насоки за идни истражувања.

Глава 2

Теоретска рамка за анализа на енергетски заедници

2.1 Потребни предуслови за формирање на енергетски заедници

Енергетските заедници, во основа, се социјални структури што ја овозможуваат реализацијата на здружени енергетски проекти. Меѓутоа, практичната имплементација на овој концепт зависи од тоа дали се задоволени потребните технички и нетехнички предуслови.

Под потребни нетехнички предуслови се подразбира збирот на финансиски, правни и социјални мерки што ја помагаат реализацијата на енергетски заедници [52], а коишто треба да компензираат за недостатокот на техничко, правно и економско знаење на членовите на заедницата [53]. Неразумно е да се очекува дека сите членови на заедницата еднакво ќе се вложат во нејзиното формирање [54]. Напротив, иницирањето на заедницата најчесто е предводено од помал број на членови кои имаат соодветна техничка стручност [55]. Се покажува дека степенот на економски развој на државата влијае врз потребата од поддршка од државните органи. Имено, потребата од мерки за поддршка од националната и локалната власт е поизразена во земјите со послаб развој [56]. Освен директни мерки за поддршка, постоењето на најдобри практики [57] и брз пристап до информации, како што е примерот на Австрија [58], значително го забрзуваат формирањето на енергетските заедници.

Покрај нетехничките предуслови, постојат низа технички предуслови што треба да бидат задоволени за да се овозможи формирањето и функционирањето на една заедница. Во основа, техничките предуслови вклучуваат постоење на пристап до соодветна енергетска и комуникациска инфраструктура врз основа на коишто се градат физичкиот и виртуелниот слој на заедницата [7]. Во физичкиот слој фигурираат системи за производство на енергија (фотоволтаични системи, ветрогенератори, когенеративни постројки) или системи за подобрување на флексибилноста на потрошувачката (батерии, системи за складирање на топлинска енергија, електрични возила, паметни уреди) [59]. За да се овозможи координирано делување, членовите на заедницата треба да имаат напредна мерна инфраструктура која вклучува паметни броила и комуникациска мрежа [60]. Паметните броила служат за следење на производството и потрошувачката во реално време и за комуникација со надворешни сигнали и динамички тарифи. Во зависност од географската распространетост на заедницата, комуникациската мрежа може да биде имплементирана како мрежа на ниво

на соседство (анг. *neighborhood area network*) (NAN), мрежа за широк географски регион (анг. *wide area network*) (WAN), или на ниво на домаќинство (анг. *home area network*) (HAN). Техничките критериуми за латентност, доверливост и сигурност на комуникациските мрежи се дефинирани во [10]. Покрај опремата што постои во физичкиот слој, виртуелниот слој вклучува дигитална платформа преку која се спроведува размената на информации и преку која се извршуваат финансиски трансакции, ускладени со физичките текови на енергија [61].

2.2 Членови на енергетски заедници

Чинителите што се дел од работата или формирањето на енергетската заедница може да имаат една од следните три улоги: потрошувач, давател на енергетска услуга или иницијатор, како што е прикажано на Слика 2.1.

2.2.1 Потрошувач

Потрошувачите се корисници на енергетски услуги што ги обезбедува друг чинител во енергетскиот сектор. Иако потрошувачите не инвестирале и не поседуваат системи за производство и складирање на енергија, тие може да уживаат економски, еколошки и социјални придобивки од членувањето во заедницата. Механизмите што тоа го овозможуваат се дефинирани во продолжение.

2.2.2 Давател на енергетски услуги

Улогата на давател на енергетски услуги може да ја има секој член што врши производство, дистрибуција, складирање и снабдување со енергија, или други услуги како што се агрегирање на заедницата, реновирање, инсталација и одржување на енергетската опрема итн. Даватели на енергетски услуги индивидуално или колективно поседуваат и користат енергетска и комуникациска инфраструктура. Енергетската инфраструктура може да биде поставена во непосредна близина на заедницата (на пр. систем за централно греење и ладење [62], резервоар за сезонско складирање на енергија [63], локални фотоволтаици [64]) или оддалечено од заедницата (на пр. поле од ветрогенератори [1]). Со оглед на тоа што разни членови може да бидат даватели на енергетски услуги, оваа улога не треба да се поистовети со конкретни чинители, како што се ЕСКО претпријатијата или снабдувачите на енергија. Потрошувачите-производители се пример на членови во заедницата што наизменично се однесуваат како даватели на енергетска услуга кога се нето-производители и како потрошувачи, кога се нето-потрошувачи. Ако енергетската заедница има воспоставено механизми за споделување и тргување со енергија, потрошувачите-производители ќе можат да тргуваат со оваа енергија со други членови на заедницата.



Слика 2.1. Улоги на чинителите во енергетска заедница

2.2.3 Иницијатор

Иницијаторите се чинители што го зачнуваат организирањето на енергетската заедница [54]. Иницијаторот може, но не мора да биде корисник на енергетските услуги на заедницата. Пример за тоа е Центарот за околина во Босна и Херцеговина којшто помогнал во иницирањето на проектот „Соларна Пецка“ преку платформа за здружено инвестирање [65]. Слично на тоа, задругата Сончеви кровови во Србија ја иницирала инсталацијата на фотоволтаичен генератор на покривот на едно јавно претпријатие. Подоцна, јавното претпријатие на членовите им ја отплаќа енергијата произведена од генераторот по пазарна цена, а ќе го задржи фотоволтаичниот генератори после одреден број на години [65]. Потрошувачите и давателите на енергетски услуги исто така можат да иницираат формирање на енергетска заедница. Еден од првите примери е асоцијацијата за домување во Солбин, којшто уште во 1988 година започна со преземање на мерки за енергетска ефикасност и локално производство на енергија [4]. Освен вакви примери, има и пример каде членовите на енергетската заедница се помогнати од локалните власти, како во Одхантураи во Индија. Исто така, има и примери каде заедницата соработува со локални компании, како во случајот на микромрежата Хуатакондо во Чиле [3].

2.3 Видови енергетски заедници

Енергетските заедници можат да се разликуваат во однос на нивното членство, дејност, просторни граници, технологии, организациска структура итн. Како резултат на тоа, низ литературата се среќаваат различни форми на енергетски заедници, како што се: цивилни енергетски заедници [66], одржливи енергетски заедници [67], одржливи заедници [68], чисти енергетски заедници [69], енергетски заедници со обновливи извори на енергија [70] и нискојаглеродни енергетски заедници [71]. Во зависност од тоа каде се наоѓаат нејзините членови и енергетската инфраструктура, енергетската заедница може да биде локализирана или распространета [69]. Според дејноста, таа може да произведува енергија за продажба, да произведува енергија за сопствена потрошувачка или да управува со енергетски ресурси, на пример паметно полнење на електрични возила [66]. Меѓутоа, има и такви енергетски заедници коишто имаат повеќе дејности [14]. Начинот на којшто е организирана заедницата може да биде централизиран, децентрализиран и дистрибуиран [69]. Детален преглед на правните субјекти што може да ги претставуваат енергетските заедници е даден во [1], додека [18] ги класифицира заедниците во однос на нивната поврзаност со енергетските мрежи. Табела 2.1 ги прикажува можните класификации на енергетските заедници според горенаведените фактори. Како што е прикажано во Табела 2.2, енергетските заедници може уште да се поделат на заедници со фотоволтаични генератори (со или без батерии), заедници со колективна батерија, заедници со хибридни и комбинирани системи и заедници со системи за централно греење и ладење.

Повеќе детали за организациските аспекти на енергетските заедници може да се најдат во [1], [3] и [73]. Наједноставни енергетски заедници се тие што се состојат единствено од потрошувачи. Овие заедници се формираат за обезбедување колективен попуст (на пр. иницијативата „Абаса ла болета“ во Италија којашто во 2016 година броела 60.000 учесници) или за агрегирано делување на пазарите за електрична енергија [66]. Енергетски заедници кои имаат само потрошувачи не располагаат со сопствена енергетска инфраструктура, но имаат еколошки придобивки поради склучување на договор со снабдувачи што единствено купуваат енергија од обновливи извори. Пример за ваква потрошувачка енергетски заедница е задругата „Енеркооп“ во Франција [4].

Голем број од енергетски заедници во светот се формирани како енергетски задруги составени од членови што здружено инвестирале во системи за производство на енергија што се продава по повластена тарифа. Ваквите заедници се сметаат за централизирани, затоа што имаат централизирано производство на енергијата [69]. Појавата на ваквите примери се должи и на опаѓачкиот тренд на инвестициските трошоци на обновливите извори на енергија, особено за фотоволтаичните генератори [74]. Проектот „Горан Хајлејнс“ во Обединетото Кралство [8] е меѓу првите примери за вакво здружување.

Табела 2.1 Класификација на енергетски заедници според различни својства

Својство	Класификација на енергетските заедници	Реф.
Локација	Локализирана, распространета	[14]
Дејност	Една дејност, повеќе дејности	[14]
Дејност поврзана со енергија	Управување со енергетски ресурси, производство на енергија, производство на енергија за сопствена потрошувачка	[66]
Организација	Централизирана, децентрализирана, дистрибуирана	[69]
Правен субјект	Енергетска задруга, здружение на граѓани, станбена заедница, јавни-приватни партнерства, јавни претпријатија	[1]
Поврзаност со енергетска мрежа	Изолирани, во рамки на зграда на потрошувачот, повеќе згради во непосредна близина, повеќе географски дистрибуирани згради	[1], [72]
Технологија	Заедници со фотоволтаични генератори, заедници со колективна батерија, заедници со хибридни и комбинирани системи и заедници со системи за централно греење и ладење	-

Еден вид на енергетски заедници се тие што произведуваат енергија за сопствена потрошувачка, а не за продажба на пазарот за електрична енергија. Ваквите заедници може да бидат изолирани [75] или поврзани со енергетска мрежа. Кога членовите на овие заедници се во непосредна близина едни на други, тие формираат мали микромрежи. За овој тип на енергетски заедници се вели дека се децентрализирани [69]. Пример за децентрализирани заедници се заедниците со системи за греење [63], [76]–[82] и ладење [83]–[85], заедниците со мали микромрежи или заедници составени од членови на станбени објекти што реализираат колективни мерки. Примената на колективни мерки во станбени објекти, на пример инсталација на колективни фотоволтаични генератори, е детално анализирана во истражувањето на група австриски истражувачи [86]–[89] и група на истражувачи од Австралија [90]–[93].

Локацијата не треба да биде ограничувачки фактор за организација на енергетските заедници. Така, членовите на заедниците може да бидат географски оддалечени едни од други, но виртуелно здружени преку некаков колективен договор. Ваквите заедници се нарекуваат дистрибуирани енергетски заедници.

Табела 2.2 Преглед на литература за енергетски заедници класифицирани според применетата технологија

Технологии	Референци
Фотоволтаични генератори	[94] [86] [87] [88] [89] [95] [96] [27] [97] [98] [99] [100] [101] [102] [103]
Батерии	[104] [105] [92] [106]
Хибридни и комбинирани системи	[107] [75] [108] [76] [109] [110] [111] [112] [113] [114] [115] [116] [117] [118] [119] [120] [121] [122] [123] [124] [125] [126] [127] [128]
Системи за централно греење и ладење	[62] [63] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85] [129]

Дел од дистрибуираните заедници функционираат како виртуелни електрични центри коишто може директно да тргуваат со енергија [69]. Пример е заедницата Зоненкомјунити што се состои од сопственици за системи за складирање на енергија од производители Зоненбатери. Членовите на оваа заедница се потрошувачи-производители коишто меѓусебно споделуваат енергија без притоа да зависат од надворешен снабдувач [12].

2.4 Европска правна рамка за енергетски заедници

Европската правна рамка ги дефинира термините „граѓански енергетски заедници“ (Директива 2019/944/EУ) и „обновливи енергетски заедници“ (Директива 2018/2001/EУ) [3]. Во основа, граѓанските и обновливите енергетски заедници се водат по слични принципи за владеење, сопственост и цел, но се разликуваат во однос на принципите за географска распространетост, дејност, членство, автономија и контрола [1]. Сличностите меѓу граѓанските и обновливите енергетски заедници се дадени во Табела 2.3, додека разликите се дадени во Табела 2.4 и Табела 2.5.

Најочигледни разлики меѓу граѓанските и обновливите енергетски заедници се тие поврзани со нивната географска распространетост и нивната дејност. Како што сугерира нивното име, обновливите енергетски заедници единствено смеат да користат обновливи извори на енергија. Нивните производни единици мора да бидат во непосредна близина на заедницата. Освен тоа, овие заедници не се ограничени на еден енергетски сектор, па смеат да делуваат во електроенергетскиот сектор, во секторот за греење и секторот за ладење. Од друга страна, граѓанските енергетски заедници смеат да делуваат само во електроенергетскиот сектор, а притоа не мора да користат обновливи извори на енергија или да бидат географски блиску ситуирани членови. Иако оваа рамка е доста генерална, одредени автори сметаат дека таа е практично

ограничувачка. Денес, постојат многу успешни граѓански иницијативи и заедници коишто не можат да се класифицираат нити како обновливи, нити како граѓански енергетски заедници.

Табела 2.3 Заеднички принципи на обновливи и граѓански енергетски заедници

Категорија	Опис
Учество	Отворено и доброволно.
Цели	Енергетската заедница цели кон еколошки, економски и социјални придобивки за членовите или за локалната средина каде што таа дејствува, а не кон остварување профит.
Дејност	Производство, потрошувачка, складирање, дистрибуција, снабдување, размена на енергија, нудење и користење агрегирачки услуги и др.
Права и обврски	Членовите ги задржуваат своите права и обврски како индивидуални членови, вклучително и правото за слободен избор и промена на снабдувач.
Правно лице	Секако правно лице, како на пример енергетска задруга, ограничено партнерство, здружение на граѓани, станбена заедница, јавно-приватно партнерство, јавно претпријатие и друго, што, делувајќи во свое име, има одредени права и обврски.

Пример за тоа е иницијативата Абаса ла болета од Италија. Таа не може да се смета за обновлива енергетска заедница затоа што нејзините членови се географски распространети, а не може да се смета ниту за граѓанска енергетски заедница затоа што се занимава и со снабдување на природен гас покрај снабдувањето со електрична енергија [14]. Од друга страна, понудената европска законска рамка има голема флексибилност во начинот на кој енергетските заедници може да бидат организирани. Во однос на членството, главната разлика меѓу двете категории е тоа што обновливите енергетски заедници може да вклучуваат и микро претпријатија, додека во граѓанските енергетски заедници, тоа не е предвидено. Согласно Европската регулатива [3], енергетските заедници треба да имаат пристап до сите пазари и да бидат третирани „на исто рамниште“ како и останатите чинители во енергетскиот сектор и тоа непосредно или посредно, преку агрегатор. Кај обновливите енергетски заедници, тоа се пазарите за електрична енергија, додека кај граѓанските енергетски заедници, тоа се сите пазари за енергија. Директното вклучување на заедниците во пазарите за енергија треба да им ги зголеми придобивките на членовите [130].

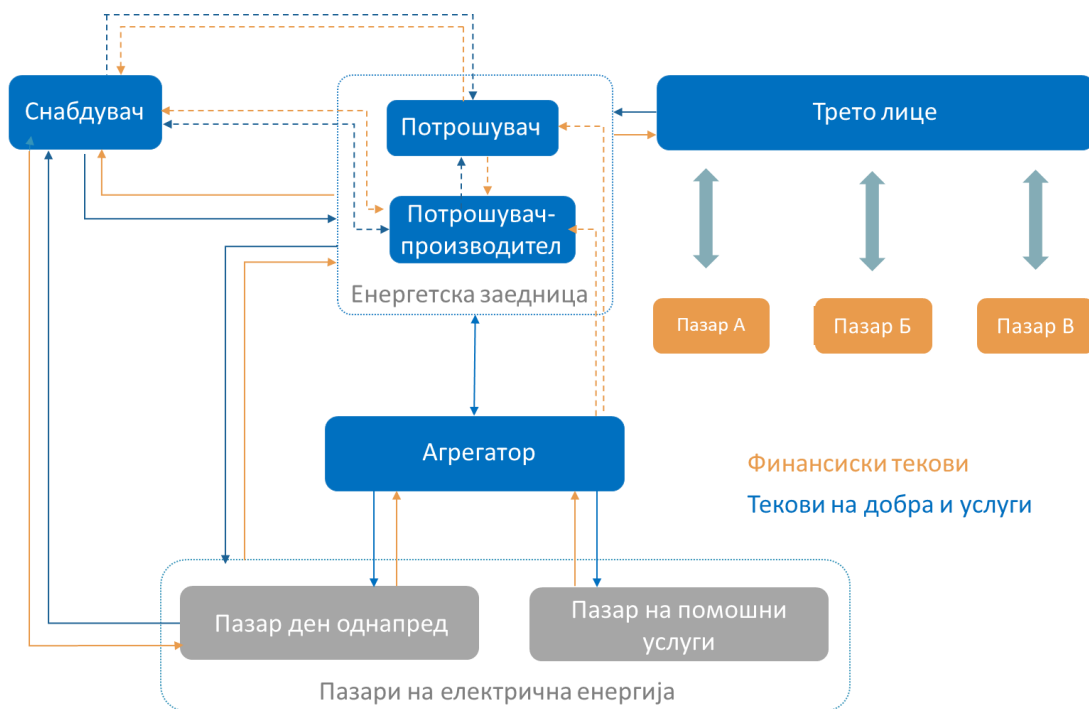
Табела 2.4 Различни принципи на обновливи и граѓански енергетски заедници

	Обновливи енергетски заедници	Граѓански енергетски заедници
Директива	2018/2001/ЕУ	2019/944/ЕУ
Сектор	Електроенергетски сектор, сектор за греење и/или ладење	Електроенергетски сектор
Географска распространетост	Членовите треба да бидат во меѓусебна непосредна близина	Нема ограничување на растојание меѓу членовите на заедницата
Контрола	Членови на заедницата што се наоѓаат во непосредна близина на проектите со обновливи извори на енергија кои се во сопственост и кои се развиени од правното лице што ги претставува тие членови.	Членови на заедницата што се физички лица или локални чинители, вклучувајќи ги и локалните самоуправи и малите претпријатија.
Членство	Физички лица, локални чинители (вклучувајќи локални самоуправи), микро, мали и средни претпријатија	Физички лица, локални чинители (вклучувајќи локални самоуправи), мали претпријатија (не вклучува средни или големи претпријатија)
Пристап	До сите соодветни пазари на енергија, директно или преку агрегирање, на недискриминациски начин	До сите соодветни пазари на електрична енергија, директно или преку агрегирање, на недискриминациски начин

Во зависност од својствата на енергетската заедница и пазарите до кои пристапува, енергетската заедница може да сноси и балансна одговорност. Иако се здружени во заедница, членовите на заедницата ги имаат истите права и обврски како и сите останати чинители. Така, во една заедница, секој потрошувач треба да има право на слободен избор на снабдувач [95]. Членовите на една заедница разменуваат информации, енергија и финансии не само меѓу себе, туку и со останати чинители што не се членови на заедницата. Слика 2.2 ги прикажува односите меѓу енергетските заедници и надворешните чинители. Сликата не ги вклучува иницијаторите, затоа што се занимава само со оперативните аспекти на енергетската заедница. Тековите на финансии се прикажани со портокалова боја, а тековите на добра и услуги се прикажани со сина боја.

Табела 2.5 Автономија, дејност, права и обврски за обновливи и граѓански енергетски заедници

	Обновливи енергетски заедници	Граѓански енергетски заедници
Автономија	Обновливите енергетски заедници треба да можат да останат автономни во однос на индивидуални членови и традиционални чинители на пазарот што членуваат во заедницата или коишто соработуваат со заедницата, на пример преку инвестирање во неа.	Правата за носење одлуки треба да бидат ограничени на тие членови на заедницата што не се големи трговци и за кои енергетскиот сектор не претставува област на примарна економска дејност.
Дејност	Без конкретни насоки и ограничувања во однос на дистрибутивните системи	Може да поседуваат дистрибутивна мрежа за електрична енергија и да делуваат како оператор на мрежата
Права и обврски	Балансната одговорност не е јасно дефинирана	Заедницата е балансно одговорна

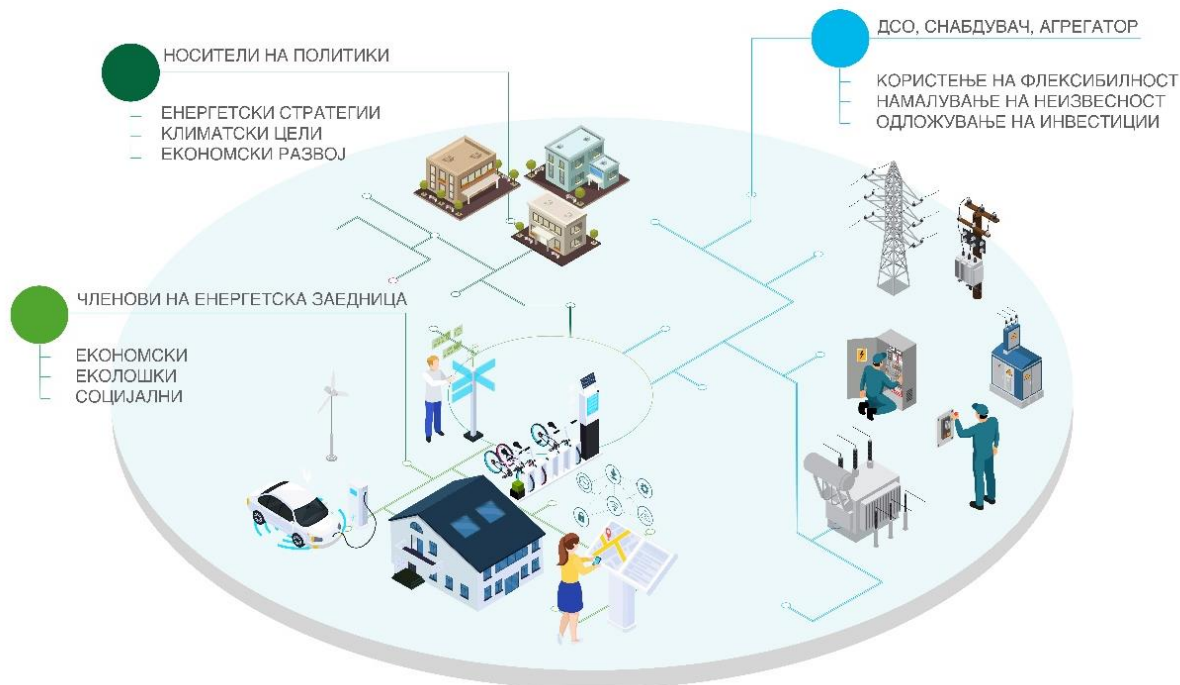


Слика 2.2. Интеракции меѓу енергетската заедница и останати чинители

2.5 Квантифицирање на придобивките од енергетски заедници

Успехот на една енергетска заедница зависи од тоа колку таа ќе им овозможи на своите членовите да ги реализираат нивните цели [131], но и од тоа колку тие цели ќе бидат усогласени со целите на останатите, надворешни чинители. За надворешни чинители се сметаат носителите на политики, локалните и државните власти и компаниите коишто имаат дејност поврзана со енергетскиот сектор (оператори на преносен и електродистрибутивен систем, снабдувачи, агрегатори, производители на енергија итн.) [132], како што е прикажано на Слика 2.3.

Постојат разни начини за квантифицирање на ефектите од постоењето на енергетските заедници, но тие главно се занимаваат со анализа на економските, еколошките, техничките и социјалните придобивки. Денес, стручната јавност главно носи заклучоци и одлуки врз основа на искуства од постоечките енергетски заедници. Но, со оглед на ограничените искуства, сè повеќе се преминува и кон носење одлуки базирани на теоретски анализи од научната литература. Нумеричките индикатори што може да се користат за таа цел се дадени во Табела 2.6.



Слика 2.3. Цели на разни чинителите коишто се засегнати од постоењето на енергетска заедница

Табела 2.6 Индикатори за квантифицирање на придобивки од енергетски заедници

Придобивки	Индикатори
Економски	Заштеда на месечни сметки; заштеда на инвестициски, оперативни и вкупни трошоци; нивелирана цена на енергија; внатрешна каматна стапка (IRR); период на поврат на средства; трошоци во работен циклус; нето-сегашна вредност.
Еколошки	Емисии на стакленички гасови; емисии на CO ₂ ; емисии на CFC и HCFC гасови; емисии на ПМ честички.
Технички	Стапка на сопствена потрошувачка (SCR); стапка на енергетска независност (SSR); веројатност за загуба на товар (LOLP); енергија предадена во мрежа; заштеда на примарна енергија.
Социјални	Прифатеност од јавноста; индекс на човечки развој; намалување на здравствени проблеми; универзална образовна и родова еднаквост; нови работни места.

Следните индикатори се искористени за квантифицирање на економските придобивки:

- Заштеда на месечни сметки за енергија [87]–[89], [94], [95], [99], [104], [109], [112],
- Заштеда на инвестициски, оперативни и вкупни трошоци [62], [76], [79], [110], [111], [118], [122], [125], [127],
- Нивелирана цена на енергија [63], [78], [114],
- Внатрешна каматна стапка (IRR) [85], [106], [107],
- Период на поврат на инвестиција [78], [100], [124],
- Трошоци во работен циклус [77],
- Нето-сегашна вредност [121].

Најкорисни информации можат да се извлечат од анализите што ја квантифицираат додадената вредност од формирањето на заедницата. Тоа се прави со споредба на резултатите од сценарио без енергетска заедница со резултатите од сценариото со енергетска заедница. Дел од горенаведените индикатори се чувствителни на претпоставките за економските параметри (на пример дисконтната стапка r или пондерирана просечна цена на капитал (WACC)) и претпоставениот работен век на проектот.

Покрај економските придобивки, членовите на енергетските заедници целат кон реализирање и на еколошки придобивки. Тие ретко се примарна цел на заедниците, но можат да бидат голем мотивирачки фактор во донесувањето на одлуки меѓу членовите. Еколошките придобивки се квантифицираат со помош на следните индикатори:

- Емисии на стакленички гасови [76], [78], [107], [109],
- Емисии на CO₂ [85], [114], [118], [120], [121], [125],
- Емисии на CFC и HCFC гасови [112], [129],
- Емисии на ПМ честички [109].

Резултатите од прегледаната литература покажуваат дека инсталирање на соодветно проектирани локални енергетски системи може да ги намали емисиите на стакленички гасови за околу 50-84%. Намалувањето на емисиите од поединечните штетни гасови зависат од локалните услови, користените технологии и референтниот енергетски систем во базното сценарио. Притоа, воочен е простор за продлабочено истражување на намалување на емисиите на ПМ честички во идни истражувања.

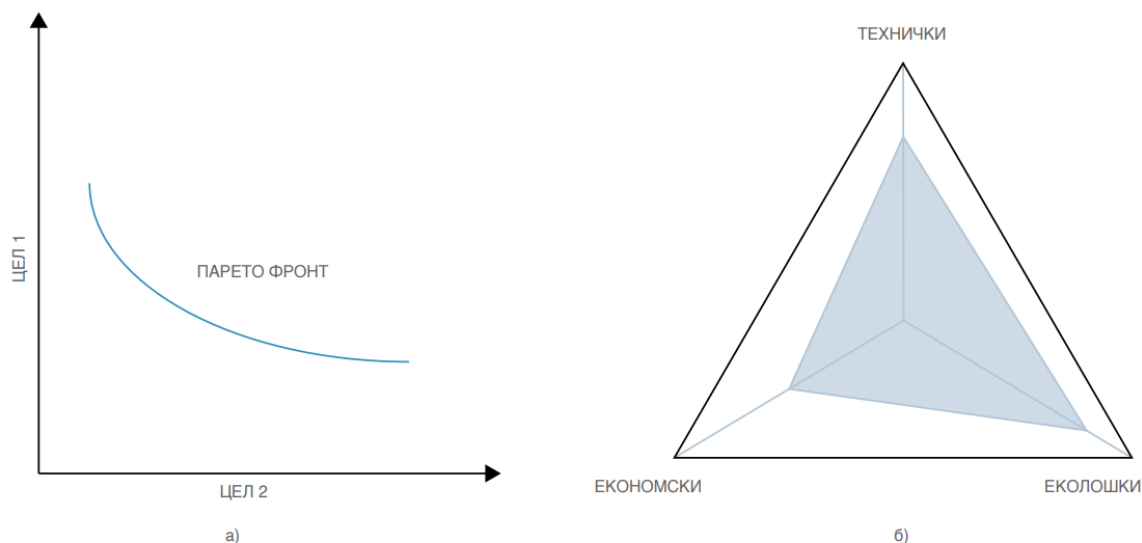
Од технички аспект, формирањето на енергетски заедници ја зголемува енергетската независност на членовите на заедницата и ја намалува енергија што тие ја преземаат од остатокот на системот. Индикаторите што се користат за квантифицирање на техничките придобивки од локалните енергетски проекти на енергетските заедници се:

- Стапка на сопствена потрошувачка (SCR) [77], [88], [92], [93], [115], [116], [120],
- Стапка на енергетска независност (SSR) [77], [92], [103], [112], [115], [120],
- Веројатност за загуба на товар (LOLP) [100], [120],
- Енергија предадена во мрежа [105], [106],
- Заштеда на примарна енергија [63], [78], [110], [121].

Индикаторите SCR, SSR и LOLP спаѓаат во категоријата на индикатори на енергетски биланси на згради со потрошувачка на енергија близу нула (анг. *load matching and grid interaction indicators*), но наоѓаат широка примена во истражувањата на локални енергетски системи со дистрибуирано производство [133], [134]. Дополнително, енергијата предадена во мрежата и заштедената примарна енергија укажуваат на ефикасноста и енергетската независност на заедницата.

Покрај придобивките, има и низа недостатоци што може да се појават поради неусогласеност меѓу целите на енергетската заедница, од една страна, и надворешните чинители, од друга [59]. Оваа неусогласеност е резултат на компромисите што треба да се направат меѓу економските, еколошките и техничките ефекти на проектите на енергетските заедници. Слика 2.4 дава графички приказ на два начини преку коишто може да се анализираат овие компромиси. На пример, еден локален енергетски проект со изразени еколошки придобивки може да не е економски прифатлив за сите членови на заедницата доколку за него се потребни големи инвестициски трошоци. Во тој случај, соодветен компромис меѓу овие две цели може да се најде со дефинирање на оптимизациски проблем во кој фигурираат економските и еколошките цели на заедницата, како што е прикажано на Слика 2.4. Анализата на компромисите меѓу две цели се врши преку т.н. Парето фронт. Парето фронтот може да послужи и за анализа на компромисите меѓу економските и технички придобивки или техничките и

еколошките придобивки. Кога се анализираат повеќе цели истовремено, може да се користат и графици, како тој прикажан од десната страна на Слика 2.4. Овие графици се корисни за упростување на заклучоците од комплексни анализи, со цел тие полесно да бидат презентирани на носителите на политики. Повеќе информации за постоечки методи за мулти-димензионална анализа на придобивките од локални енергетски проекти може да се најдат во [75], [114] и [135].



Слика 2.4. Визуелен приказ на компромиси меѓу различни придобивки на заедницата

2.6 Праведност во енергетски заедници

Во рамки на самата заедница, праведноста на распределбата на трошоците и придобивките е неопходна за обезбедување на стабилност на внатрешната коалиција. Историски, дискусии за праведноста се воделе уште во времето на старите Римјани и античките Грци. Аристотел, на пример, тврди дека праведноста мора да се заснова на некаква пропорционалност. Тој вели: „Сите се сложни дека распределбата треба да биде базирана на некоја стапка; но, не сите се сложуваат која е таа стапка; демократите се за слобода, олигарсите се за богатство, други, пак, се за благородност на потеклото и за аристократската доблест“ [136]. Во поновата економска теорија, Варијан ја изнесува својата критика на дотогашната теорија на праведност во [137], велејќи дека распределбата на едно добро може да биде праведна ако и само ако таа е правична и Парето оптимална. Притоа, правична е онаа распределба што никого не става во позиција да му завидува на некој друг. Пример за праведна распределба, според оваа дефиниција, е рамномерната распределба, каде сите членови добиваат еднаков дел од колективната придобивка. Но, ваквата распределба не води сметка за заслугата на секој

член во заедницата и не е согласност со теоријата на дистрибутивна правда предложена од Хоманс [138].

Според теоријата на дистрибутивна правда, распределбата е праведна доколку придобивката на некој член е пропорционална со неговиот влог. Поновите истражувања [139] покажуваат дека корисниците на компјутерски алгоритми најчесто сметаат дека еден алгоритам е праведен доколку се базира на одредена пропорција, слично како Аристотеловата идеја и Хомансовата теорија.

Од областа на компјутерските мрежи, Џејнов индекс се истакнува како корисна алатка за мерење на праведност [140], [141]. Слично како Аристотел, Џејн тврди „Јасно е од прегледаната литература дека праведноста подразбира еднаква алокација на ресурси, меѓутоа не постои согласност меѓу истражувачите околу тоа што точно треба да биде еднакво“. Некој може да смета дека еднаквоста се однесува на исходот; друг може да смета дека еднаквоста се однесува на пружената можност. Постојат и такви дефиниции кај кои една постапка е праведна ако исполнува одредени низа математички услови за праведност.

Со оглед на овие разликите, воведени се три одделни дефиниции за праведност:

Дефиниција 1 (Меритократска индивидуална рационалност): Една распределба е праведна ако на секој член на заедницата му гарантира позитивна придобивка, исплатена согласно неговиот влог или придонес.

Дефиниција 2 (Минимизирана нееднаквост): Една распределба е праведна ако нуди што порамномерна распределба на придобивките меѓу членовите на заедницата.

Дефиниција 3 (Коалициона стабилност): Една распределба е праведна ако на секој член во заедницата му гарантира дека било какво издвојување од заедницата ќе му ја влоши состојбата.

Дискусијата ќе се наврати на овие дефиниции кога ќе биде анализирана праведноста на предложениот метод – виртуелна нето-наплата.

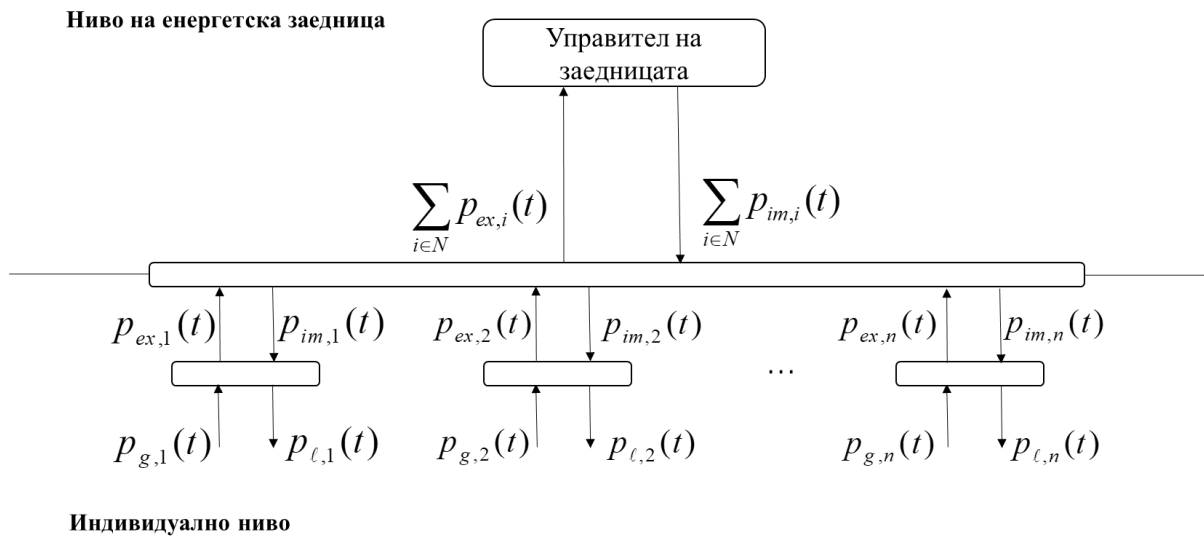
Глава 3 Математичко моделирање на енергетски биланси и трошоци на енергетски заедници

Фокус на оваа докторска дисертација се енергетските заедници чиишто членови се потрошувачи-производители кои директно тргуваат со енергија. Меѓутоа, за да може да се презентираат различните методи за директно тргување со енергија, потребно е да се воведат математички модел којшто ќе ги опишува билансите на моќност на индивидуалните членови. Билансот на моќност на еден член на енергетската заедница се претставува со низа равенки што ги дефинираат изворите и понорите на енергија во секој момент. Тие укажуваат колкав дел од локално произведената енергија се троши зад броилото (локално), а колкав дел се предава на дистрибутивната мрежа. Делот од локално произведената енергија што се предава на мрежата може да се тргува/разменува со други членови од заедницата. Од друга страна, ако директното тргување не е овозможено од правни, економски или технички причини, потрошувачите-производители ќе бидат мотивирани локално да користат што поголем дел од нивното локално производство.

Делот од локално произведената енергија што се троши зад броилото може да се зголеми со инсталирање на батерии. Иако батериите денес се исплатливи само во региони со високи цени на електрична енергија и големо сончево зрачење, се очекува дека нивната примена во домаќинствата значително ќе расте во иднина, како што инвестициските трошоци за батериите ќе опаѓаат. Затоа, во оваа глава презентирани се и билансите на потрошувачи-производители со батерија. Математичките модели на овие биланси водат сметка за полнењето и празнењето на батеријата и соодветната управувачка стратегија која се користи за таа цел. Постојат различни управувачки стратегии за полнењето и празнењето на батериите, а изборот на стратегијата значително влијае врз моќноста што потрошувачот-производител ја разменува со дистрибутивната мрежа. Во оваа глава прегледани се математичките модели на две оптимизациски управувачки стратегии и една детерминистичка управувачка стратегија кои подоцна ќе бидат меѓусебно споредени за да се открие влијанието што изборот на управувачката стратегија го има врз билансот на моќност на потрошувачот-производител.

Поради едноставност и забрзување на пресметките, а водејќи сметка дека тоа не влијае на суштината на заклучоците, анализите на заедницата на колективно ниво се прават со потрошувачи-производители без батерии. Билансите на заедницата на колективно ниво се клучни за да се разбере ефектот што агрегирање на поединечни потрошувачи-производители во една заедница го има врз сумарниот дијаграм на

производство/потрошувачка на електрична енергија. Поедноставен приказ на вака дефинираната енергетска заедница е даден на Слика 3.1. На сликата, секој член на индивидуално ниво е претставен само со своето производство и потрошувачка. Множеството од сите членови ја дефинира енергетската заедница. Заедницата назначува трето лице (или дигитална платформа) за управител. Управителот на заедницата пасивно ги надгледува и следи билансите на моќност, без притоа да влијае врз нив, а на крајот на секој период за наплата соработува со снабдувачите на членовите на заедницата и со операторот на електродистрибутивниот систем за да се пресметаат сметките за електрична енергија на членовите на заедницата.



Слика 3.1 Едноставен приказ на енергетски биланс во енергетска заедница

3.1 Биланс на моќност на потрошувач-производител без батерија

Потрошувачка на електрична енергија на потрошувачот-производител i се задоволува со помош на локално произведената енергија и енергијата којашто е разменета со дистрибутивната мрежа во точката на приклучување. Според тоа, билансот на моќност на потрошувачот-производител i во точката на приклучување може да се изрази како:

$$P_{\ell,i}(t) = P_{g,i}(t) + p_{net,i}(t) \quad (3.1)$$

каде што $P_{\ell,i}(t)$ претставува моќност на потрошувачка на електрична енергија, $P_{g,i}(t)$ претставува моќност на локалното производство, а $p_{net,i}(t)$ претставува моќноста што потрошувачот-производител ја разменува со мрежата. Последниот параметар може

дополнително да се претстави како разлика на моќноста преземена од мрежата $p_{im,i}(t)$ и моќноста што се инјектира во мрежата $p_{ex,i}(t)$:

$$p_{net,i}(t) = p_{im,i}(t) - p_{ex,i}(t) \quad (3.2)$$

Дел од моќноста што локалниот генератор ја произведува се користи во моментот на нејзиното производство. Оваа големина, наречена сопствената потрошувачка на локалното производство $p_{sc,i}(t)$, се изразува како:

$$p_{sc,i}(t) = p_{g,i}(t) - p_{ex,i}(t) \quad (3.3)$$

Сопствената потрошувачка на локалното производство го претставува преклопувањето на дијаграмите на производство и потрошувачка. Оттука, таа може да се пресмета и со помош на следната релација:

$$p_{sc,i}(t) = \min(p_{\ell,i}(t), p_{g,i}(t)) \quad (3.4)$$

Врз основа на тоа, билансот на моќност потрошувачот-производител i е еднаков на:

$$p_{\ell,i}(t) = p_{sc,i}(t) + p_{im,i}(t) \quad (3.5)$$

3.2 Биланс на моќност на потрошувач-производител со батерија

Оваа потточка го претставува математичкиот модел што се користи за анализа на билансите на моќност на потрошувач-производител со батерија. Билансот на моќност на потрошувач-производител со батерија може да се изрази со модификација на равенката (3.1):

$$p_{\ell,i}(t) = p_{g,i}(t) + p_{im,i}(t) - p_{ex,i}(t) + p_{dis,i}(t) - p_{ch,i}(t) \quad (3.6)$$

каде $p_{dis,i}(t)$ и $p_{ch,i}(t)$ претставуваат моќностите на празнење и полнење на батеријата од АС страната, соодветно. Моќноста на батеријата тогаш може да се претстави како:

$$p_{b,i}(t) = p_{dis,i}(t) - p_{ch,i}(t) \quad (3.7)$$

За секој временски момент, моќноста на батеријата е еднозначно определена, т.е. батеријата може да се полни или може да се празни, но никогаш не може истовремено да се полни и да се празни. Ова математички се претставува со ограничувањето $p_{dis,i}(t)p_{ch,i}(t) = 0, \forall t \in T$. Ова ограничување е линеаризирано со помош на big-M формулација во наредните точки [142].

Полнењето и празнењето на батеријата во секој временски чекор t предизвикува промена на енергијата што е складирана во неа. Количината на енергија што локално ќе се складира во батерија зависи од капацитетот на батеријата. За моделирање на промената на енергијата во батеријата се користи квази-стационарен модел од

литературата [143]. Според овој модел, количеството на енергија $\Delta E_{b,i}(t)$ за кое ќе се промени наполнетоста на батеријата во чекор t е еднакво на:

$$\Delta E_{b,i}(t) = -p_{b,i}(t)k_i\Delta t \quad (3.8)$$

каде k_i претставува параметар со кој се моделира коефициентот на ефикасноста на полнењето $\eta_{ch,i}$ и празнењето $\eta_{dis,i}$, а Δt претставува времетраење на временскиот чекор во квази-стационарниот модел. Параметарот k_i е еднаков на $1/\eta_{dis,i}$ кога батеријата се празни, а $\eta_{ch,i}$ кога батеријата се полни:

$$k_i = \begin{cases} 1/\eta_{dis,i} & , p_{b,i}(t) > 0 \\ \eta_{ch,i} & , p_{b,i}(t) < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Така, енергијата $E_{b,i}(t)$ складирана во батеријата во моментот t се пресметува според релацијата:

$$E_{b,i}(t) = E_{b,i}(t-1) + \Delta E_{b,i}(t) \quad (3.10)$$

За да биде комплетен моделот на потрошувач-производител со батерија, потребно е уште да се дефинира управувачка стратегија која го контролира полнењето и празнењето на батеријата. Во продолжение ќе бидат преставени една детерминистичка управувачка стратегија и две оптимизациски управувачки стратегии:

- 1) Цели кон нула (анг. *target zero*)
- 2) Минимизирај размена на моќност (анг. *minimize power*)
- 3) Минимизирај преземена енергија (анг. *minimize energy*)

По пат на нумерички симулации, трите управувачки стратегии се меѓусебно споредени во следните глави од дисертацијата, со цел да се открие ефектот што тие го имаат врз енергетската независност на потрошувачот-производител и врз врвната моќност што тој ја разменува со дистрибутивната мрежа. Резултатите што се добиваат од оваа анализа служат за поткрепување на втората хипотеза на дисертацијата.

3.2.1 Управување на батерија со стратегија „*target zero*“

Управувачката стратегија „цели кон нула“ (анг. *target zero*) претставува детерминистички алгоритам за контрола на полнењето и празнењето на батеријата. Тој носи одлука за тоа дали батеријата треба да се полни или празни врз основа на моменталните податоци за производството и потрошувачката, достапни во временски момент t . Притоа, *target zero* не води сметка за тоа каква била состојбата на потрошувачот-производител во минатите временски моменти, или каква ќе биде таа во иднина.

За секој временски момент се пресметува дебалансот $p_{target,i}(t)$. Кога $p_{target,i}(t)$ е поголемо од нула, потрошувачот-производител влече моќност од мрежата, а кога $p_{target,i}(t)$ е помало од нула, потрошувачот-производител предава моќност кон мрежата:

$$p_{target,i}(t) = p_{\ell,i}(t) - p_{g,i}(t) \quad (3.11)$$

Врз основа на овој податок и врз основа на состојбата на наполнетост на батеријата, алгоритмот утврдува (1) дали батеријата треба да се полни или треба да се празни и (2) со колкава моќноста батеријата треба да се полни или празни. Математички, оваа одлука може да се изрази со помош на следната функција:

$$p_{b,i}(t) = \begin{cases} \min(p_{target,i}(t), p_{rated,i}(t)) & , p_{target,i}(t) > 0, \\ & E_{b,i}(t) \geq E_{min,i} \\ \max(p_{target,i}(t), -p_{rated,i}(t)) & , p_{target,i}(t) < 0, \\ & E_{b,i}(t) \leq E_{max,i} \\ 0 & , \text{друг случај} \end{cases} \quad (3.12)$$

во којашто $p_{rated,i}(t)$ претставува максималната моќност со која батеријата може да се полни или празни, додека $E_{min,i}(t)$ и $E_{max,i}(t)$ го претставува минималното и максималното нето-количество на енергија што може да се складира во батеријата на потрошувачот-производител i .

3.2.2 Управување на батерија со стратегија „*minimize power*“

Управувачката стратегија „минимизирај размена на моќност“ (анг. *minimize power*) е преземен од [143] каде што таа е имплементирана како нелинеарен оптимизациски проблем. Во оваа докторска дисертација, оптимизацискиот проблем е формулиран со примена на мешано-целобројно програмирање.

На почетокот на секој ден, се претпоставува дека дневниот дијаграм на производство и потрошувачка на потрошувачот-производител се целосно познати. Оваа претпоставка е оправдана ако се има предвид дека грешките што се прават во проценка на производството од фотоволтаични генератори за следниот ден веќе се околу 5% [144]. Притоа, за секој ден, управувачката стратегија го определува режимот на полнење и празнење на батеријата кој ќе резултира во минимална размена на моќност со електродистрибутивната мрежата во точката на приклучување на потрошувачот-производител. Ова се постигнува со помош на следниот оптимизациски проблем:

$$\min \sum_{k=1}^{n_d} \sum_{t \in T_d} (p_{\ell,i}(t) - p_{g,i}(t) - p_{b,i}(t))^2 \quad (3.13)$$

водејќи сметка за ограничувања (3.6), (3.10) и

$$\Delta E_{b,i}(t) = -p_{b,dc,i}(t)\Delta t \quad (3.14)$$

$$p_{b,dc,i}(t) = p_{dis,i}(t)/\eta_{dis,i} - p_{ch,i}(t)\eta_{ch,i} \quad (3.15)$$

$$0 \leq p_{ch,i}(t) \leq (1 - z_i(t))p_{rated,i}(t) \quad (3.16)$$

$$0 \leq p_{dis,i}(t) \leq z_i(t)p_{rated,i}(t) \quad (3.17)$$

$$E_{min,i} \leq E_{b,i}(t) \leq E_{max,i} \quad (3.18)$$

Оптимизацискиот проблем се решава за секој ден во анализираниот период, каде $T_d = \{1, 2, \dots, 24\}$ е временскиот период за секој ден, додека n_d е вкупниот број на денови во анализираниот период. Дополнително, воведена е бинарна променлива $z(t) = \{0, 1\}$ која обезбедува еднозначност на работниот режим на батеријата (батеријата може да се полни или да се празни) и го наметнува ограничувањето за максималната дозволена моќност на полнење или празнење. Преку ограничувањето (3.18) оптимизацискиот проблем води сметка енергијата складирана во батеријата да биде во граници на дозволениот капацитет на батеријата, помеѓу долната $E_{min,i}$ и горната граница $E_{max,i}$. При решавање на овој оптимизациски проблем, се води сметка енергијата складирана во батеријата на крајот на претходниот ден да биде почетна вредност на енергијата во тековниот ден.

3.2.3 Управување на батерија со стратегија „*minimize energy*“

Управувачкиот стратегија „минимизирај преземена енергија“ (анг. *minimize energy*) е формулација која има за цел да ја минимизира зависноста на потрошувачот-производител од електродистрибутивната мрежа. Таа е дефинирана како оптимизациски проблем со слични својства како и стратегијата „минимизирај размена на моќност“. Претпоставено е дека дијаграмите за производство и потрошувачка на потрошувачот-производител се целосно познати ден-однапред. Оптимизацискиот проблем на стратегијата „минимизирај преземена енергија“ е:

$$\min \sum_{k=1}^{n_d} \sum_{t \in T} \max(p_{\ell,i}(t) - p_{g,i}(t) - p_{b,i}(t), 0) \quad (3.19)$$

со ограничувања (3.6), (3.10) и (3.14)-(3.18).

3.3 Биланс на моќност и енергија на енергетска заедница

Енергетската заедница $N = \{1, 2, \dots, n\}$ се состои од потрошувачи-производители коишто се во меѓусебна непосредна близина, а се поврзани со локалната електродистрибутивна мрежа. Во однос на операторот на електродистрибутивниот систем, енергетската заедница може да се набљудува како една целина, т.е. како еден потрошувач-производител. Моќностите на производство и потрошувачка на целата заедница, во тој случај, се пресметуваат како збир на произведената и потрошената енергија на сите членови на заедницата. Моќноста што заедницата ја презема од мрежата е еднаква на:

$$p_{im,N}(t) = \left[\sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) \right]_+ \quad (3.20)$$

додека моќноста што ја предава од мрежата се пресметува како:

$$p_{ex,N}(t) = \left[\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) \right]_+ \quad (3.21)$$

кадешто операторот $[\cdot]_+$ означува $\max(\cdot, 0)$. За енергетската заедница може да се пресмета и колективната сопствена потрошувачка $p_{sc,N}(t)$. Оваа големина е аналогна на индивидуалната сопствена потрошувачка на еден потрошувач-производител $p_{sc,i}(t)$, но се однесува на збирните дијаграми на производство и потрошувачка во заедницата. Со други зборови, таа ја претставува вкупната произведена моќност од сите членови во заедницата што моментално се користи зад точката на приклучување:

$$p_{sc,N}(t) = \min \left(\sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t), \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) \right) \quad (3.22)$$

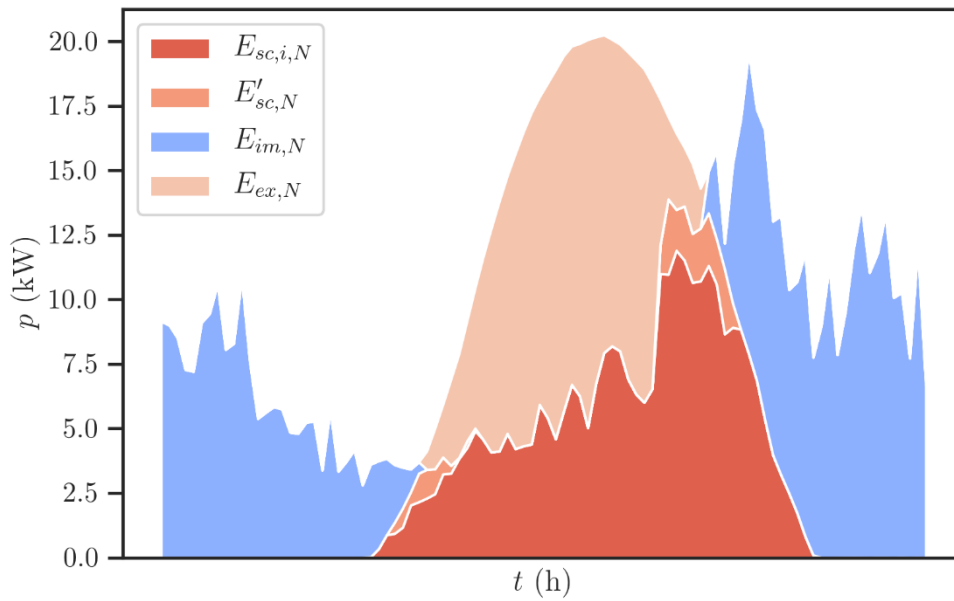
Колективната сопствена потрошувачка на заедницата N , т.е. $p_{sc,N}(t)$, е еднаква на збирот на (1) сопствената потрошувачка на секој член на заедницата $\sum_{i \in N} p_{sc,i}(t)$ и (2) колективната сопствена потрошувачка на вишокот производство $p'_{sc,N}(t)$ на членовите во заедницата:

$$p_{sc,N}(t) = \sum_{i \in N} p_{sc,i}(t) + p'_{sc,N}(t) \quad (3.23)$$

Колективната сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ ја претставува вкупната моќност што дел од членовите на заедницата ја предаваат во мрежата, а е истовремено преземена од мрежата од други членови во таа заедница:

$$p'_{sc,N}(t) = \min \left(\sum_{i \in N} p_{ex,i}(t), \sum_{i \in N} p_{im,i}(t) \right) \quad (3.24)$$

Слично како што колективната сопствена потрошувачка $p_{sc,N}(t)$ го претставува преклопувањето на сумарните дијаграми на производство и потрошувачка, колективната сопствена потрошувачка на вишокот производство во заедницата $p'_{sc,N}(t)$ го претставува преклопувањето на сумарните дијаграми на нето-предадена моќност кон мрежата и нето-преземена моќност од мрежата. Врз основа на овие податоци, за енергетската заедница може да се пресмета и енергетскиот биланс, како тој прикажан на Слика 3.2.



Слика 3.2. Биланси на енергија за еден ден во енергетска заедница

Притоа, вкупно произведената енергија во заедницата е еднаква на:

$$E_{g,N}(t) = \sum_{i \in T} \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) \Delta t \quad (3.25)$$

додека вкупно потрошената енергија од сите членови е еднаква на:

$$E_{\ell,N}(t) = \sum_{i \in T} \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) \Delta t \quad (3.26)$$

Збирната енергија од сопствените потрошувачки на сите членови на заедницата, зад точките на нивното приклучување со мрежата е еднаква на:

$$E_{sc,i,N}(t) = \sum_{i \in N} \sum_{i \in T} p_{sc,i}(t) \Delta t \quad (3.27)$$

Од друга страна, вкупната енергија на сопствена потрошувачка на заедницата, базирана на сумарните дијаграми на производство и потрошувачка е еднаква на:

$$E_{sc,N}(t) = \sum_{i \in T} p_{sc,N}(t) \Delta t \quad (3.28)$$

Разликата на последните две големини ја дава енергијата на сопствена потрошувачка на вишокот во заедницата:

$$E'_{sc,N} = \sum_{i \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t \quad (3.29)$$

Вкупната енергија што заедницата, како целина, ја презема од мрежата е еднаква на:

$$E_{im,N}(t) = \sum_{i \in T} p_{im,N}(t) \Delta t \quad (3.30)$$

Додека вкупната енергија што заедницата, како целина, ја предава на мрежата е еднаква на:

$$E_{ex,N}(t) = \sum_{t \in T} p_{ex,N}(t) \Delta t \quad (3.31)$$

3.4 Нумерички индикатори

Индикаторите за биланси на потрошувачка и локално производство (анг. *load matching and grid interaction indicators*) произлегуваат од литература за згради со потрошувачка на енергија близу нула (анг. *nearly-zero energy buildings*) [134], [145]. Нивната примена дава информација за степенот на преклопување на дијаграмите на потрошувачка и локално производство, како и за влијанието што потрошувачите-производители го имаат врз дистрибутивната мрежа во точката на приклучување. Презентирани се стапката на сопствена потрошувачка, стапката на енергетска независност, односот на локално произведена и потрошена енергија и факторот на дневна потрошувачка на енергија.

3.4.1 Стапка на сопствена потрошувачка

Стапката на сопствена потрошувачка (анг. *self-consumption rate*) (SCR) на еден потрошувач-производител i се пресметува како количник на сопствената потрошувачка и вкупната локално произведена енергија:

$$SCR = \frac{\sum_{t \in T} p_{sc,i}(t) \Delta t}{\sum_{t \in T} p_{g,i}(t) \Delta t} \quad (3.32)$$

Во овој израз T претставува множеството временски чекори во анализираниот интервал, $p_{sc,i}(t)$ е моќноста на сопствена потрошувачка, а $p_{g,i}(t)$ е моќноста на локално производство. Вредноста на SCR е еднаква на делот од локално производство на i што се троши во моментот на неговото производство зад точката на приклучување. Таа може да биде во граници $0 \leq SCR \leq 1$, каде што $SCR = 1$ укажува дека моќност што потрошувачот-производител i ја произведува во секој момент се троши зад точката на приклучување.

3.4.2 Стапка на енергетска независност

Стапката на енергетска независност (анг. *self-sufficiency rate*) (SSR) на потрошувачот-производител i се пресметува како количник на сопствената потрошувачка и вкупната потрошувачка на енергија:

$$SSR = \frac{\sum_{t \in T} p_{sc,i}(t) \Delta t}{\sum_{t \in T} p_{t,i}(t) \Delta t} \quad (3.33)$$

Вредноста на SSR е еднаква на делот од потрошувачката на i што се задоволува зад точката на приклучување. Слично како SCR , опсегот на факторот на енергетска самодоволност е $0 \leq SSR \leq 1$, каде што $SSR = 1$ укажува на тоа дека потрошувачката на потрошувачот-производител i во секој момент се задоволува од локално производство, зад точката на приклучување.

3.4.3 Однос на произведена и потрошена енергија

Односот на произведената и потрошената енергија се пресметува како:

$$GTDR = \frac{\sum_{t \in T} p_{g,i}(t) \Delta t}{\sum_{t \in T} p_{l,i}(t) \Delta t} \quad (3.34)$$

Ознаката $GTDR$ произлегува од англискиот термин за овој индикатор (анг. *generation to demand ratio*). Оваа вредност може да се пресмета и како $GTDR = SSR / SCR$.

3.4.4 Веројатност на загуба на товар

Примената на индикаторот за веројатност на загуба на товар (анг. *loss of load probability*) ($LOLP$) во контекст на зграда со потрошувачка на енергија близу нула е предложена во [134]. Овој индикатор се пресметува како:

$$LOLP = \frac{t_{p_{l,i} > p_{g,i} + p_{b,i}}}{T} \quad (3.35)$$

и го дефинира релативниот однос меѓу времето во кое потрошувачот-производител презема моќност од мрежата $t_{p_{l,i} > p_{g,i} + p_{b,i}}$, т.е. времето за коешто се однесува како потрошувач, и вкупното време во анализираниот период T . Во суштина, $LOLP$ го претставува делот од времето во кое потрошувачот-производител i презема моќност од мрежата, т.е. се однесува како потрошувач.

3.4.5 Фактор на дневна потрошувачка на енергија

Факторот на дневна потрошувачка на енергија претставува количник на енергијата што еден потрошувач-производител ја користи меѓу 10:00 и 16:00 часот и вкупната енергија што тој потрошувач-производител ја троши:

$$f = \frac{\sum_{t \in D} p_{l,i}(t) \Delta t}{\sum_{t \in T} p_{l,i}(t) \Delta t} \quad (3.36)$$

каде што D го означува множеството временски интервали помеѓу 10:00 и 16:00 часот во денот. Вредноста на овој индикатор служи за проценување на временското поклопување на производството и потрошувачката.

3.5 Пресметување на трошок за електрична енергија

Математичкиот модел дефиниран во точка 3.3 е неопходен за пресметка на трошокот за електрична енергија на индивидуално и колективно ниво.

3.5.1 Трошок на индивидуален потрошувач-производител

Кога еден потрошувач-производител настапува индивидуално, тој склучува билатерален договор со неговиот снабдувач на електрична енергија. Освен што ги дефинира правата и обврските на снабдувачот и потрошувачот-производител, овој договор го дефинира и методот според кој снабдувачот го пресметува трошокот за електрична енергија што потрошувачот-производител i треба да го плати за даден период. Износот на фактурата се пресметува според методот на нето-наплата:

$$C_{NB}(\{i\}) = \lambda \sum_{t \in T} p_{im,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t \quad (3.37)$$

каде што λ е цената што i ја плаќа за енергијата што ја презел од мрежата, додека μ е цената по која што му се вреднува енергија што ја враќа во мрежата ($\lambda \geq \mu$), а $t \in T, T = \{1, 2, \dots, t_{max}\}$ претставува временскиот чекор на анализата. Очигледно, износот што i ќе го плати, или ќе му биде платен, зависи само од моќноста што ја разменува со дистрибутивната мрежа во точката на приклучување.

3.5.2 Трошок на енергетска заедница

Вкупниот трошок на енергетската заедница се пресметува врз основа на сумарно предадената и преземената енергија на заедницата во заедничката точка на приклучување. Ако заедницата се напојува од заедничка трафостаница, тогаш снабдувачот ја третира таа заедница како единствен потрошувач-производител во таа точка, притоа занемарувајќи ги загубите во мрежата. Вкупниот трошок за електрична енергија на заедницата е еднаков на:

$$C(N) = \lambda \sum_{t \in T} p_{im,N} \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,N} \Delta t \quad (3.38)$$

Преку агрегирање на дијаграмите за производство и потрошувачка, колективната сопствена потрошувачка на заедницата е поголема од збирот на индивидуалните сопствени потрошувачки, што води до заштеди имајќи сметка дека $\lambda \geq \mu$. Информацијата за колективниот трошок на заедницата, но и трошокот на индивидуалните членови се неопходни информации што служат како влезни податоци во методите за колективно директно тргување со енергија.

Глава 4

Постоечки методи за колективно директно тргување со енергија

При колективно директно тргување, заедницата назначува нејзин управител, кој согласно релациите дефинирани во Глава 3, ја координира размената на информации и финансии со надворешни чинители (снабдувачи на електрична енергија, оператор на дистрибутивен систем) и кој, согласно математичкиот модел воведен во Глава 3, ги следи билансите на моќност и енергија на членовите на заедницата. На крајот на секој период за наплата, преку комуникација со надворешните чинители, управителот на заедницата, на членовите на заедницата им го пресметува трошокот што тие го имаат за електрична енергија. Оваа пресметка се прави според претходно дефиниран математички апарат кој зависи од избраниот метод за колективно директно тргување. Денес, научната литература препознава многу различни методи за колективно директно тргување.

Оваа глава ги презентира математичките апарати на десет постоечки методи за колективно директно тргување што се широко применети во најновата научна литература од областа. Најголем дел од овие методи претходно беа наведени во прегледот на литературата презентирани во Глава 1. Методите презентирани во оваа глава се избрани врз основа на влијанието што тие го имале врз истражувачката област, водејќи сметка за нивната цитираност и за нивната практична применливост во реални услови. За подобра систематизација, може да се каже дека десетте подолу презентирани методи спаѓаат во една од следните три категории: (1) методи за распределба на колективниот трошок, (2) методи за распределба на колективната придобивка и (3) ценовни механизми за локални пазари во енергетски заедници, претходно прикажани на Слика 1.1. Оние методи што се проценети како најрелевантни, подоцна се применети и споредени со методот за виртуелна нето-наплата што е предложен во следната глава.

4.1 Методи за распределба на колективен трошок

Наједноставен начин за организирање на директно тргување со енергија во енергетска заедница е преку распределба на колективниот трошок на заедницата. Овој пристап е соодветен за мали микромрежи што се однесуваат како потрошувачи-производители во однос на заедничката точка на приклучување. Од аспект на снабдувачот на електрична енергија, енергетската заедница е засебен потрошувач чијшто дијаграм се добива со сумирање на дијаграмите на сите членови на заедницата. Според тоа, снабдувачот испорачува сметка со колективниот трошок за електрична енергија на енергетската заедница пресметана според релацијата (3.38). Поради

агрегирање на дијаграмите на членовите на заедницата, колективниот трошок на заедницата ќе биде помал во споредба со случај кога сите нејзини членови делуваат индивидуално [27]. Во рамки на заедницата, од друга страна, членовите, со помош на управителот на заедницата, го распределуваат колективниот трошок меѓу себе, на начин кој претходно сите го прифатиле.

Со други зборови, распределбата на колективниот трошок се прави согласно претходно избран метод за директно тргување. Обично, методот за колективно директно тргување е едноставен коефициент на пропорционалност според кој се распределува трошокот. Трошокот може да биде распределен еднакво меѓу сите членови, но може да биде распределен и како пропорција од површината на објектот на потрошувачот, бројот на жители што живеат или работат во објектот, инсталираниот капацитет на дистрибуираниот генератор итн. [44]. Иако ваквите методи се доста едноставни, истражувањата покажуваат дека тие не овозможуваат праведна распределба на трошокот во заедницата. Во продолжение, презентирани се два репрезентативни методи од оваа категорија - методот на еднаква распределба на колективниот трошок и методот на пропорционална распределба на колективниот трошок.

4.1.1 Еднаква распределба на колективен трошок

Кога вкупниот колективен трошок еднакво се распределува (анг. *equal cost sharing*) (EC) [146], трошокот за електрична енергија на членот i изнесува:

$$C_{EC}(\{i\}) = \frac{C(N)}{n} \quad (4.1)$$

каде што $C(N)$ е колективниот трошок на заедницата пресметан според (3.38), а n е вкупниот број на членови во заедницата преставена со множеството N . Заштедата на секој член се пресметува како разлика на трошокот за електрична енергија пресметана според методот за индивидуална нето-наплата и трошокот за електрична енергија пресметан според овој метод:

$$x_{EC,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{EC}(\{i\}) \quad (4.2)$$

Примената на овој метод резултира во праведна распределба на трошокот само доколку сите членови на заедницата имаат еднакво производство и потрошувачка. Веројатноста на ваквите случаи во практични услови е многу мала, па како резултат на тоа, овој метод најчесто резултира во неправедна исплата. Неправедна исплата се забележува преку негативна вредност на $x_{EC,i}$. Доколку $x_{EC,i}$ е негативно, тогаш тоа означува дека членот i има опортунитетен трошок кога членува во заедницата, т.е. дека ќе има помали трошоци ако се отцепи од заедницата.

4.1.2 Пропорционална распределба на колективен трошок

Одредени автори сметаат дека распределбата на колективниот трошок ќе биде поправедна доколку таа ја отсликува индивидуалната заслуга на секој член. За таа цел предложена е т.н. пропорционална распределба на колективен трошок (анг. *proportional cost split*) (PS) [44]. Коефициентот на пропорционалност според којшто се распределува колективниот трошок може да се менува. Во оваа потточка од дисертацијата, презентираан е методот на пропорционална распределба на колективниот трошок од [146], според кој членот i има трошок за електрична енергија еднаков на:

$$C_{PS}(\{i\}) = C(N) \frac{C_{NB}(\{i\})}{\sum_{j \in N} C_{NB}(\{j\})} \quad (4.3)$$

Очигледно, колективниот трошок се дели пропорционално со трошокот што секој член го има во случај кога неговата сметка за електрична енергија се пресметува по принципот на индивидуална нето-наплата. Во тој случај, заштедата на член i изнесува:

$$x_{PS,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{PS}(\{i\}) \quad (4.4)$$

4.2 Методи за распределба на колективна придобивка

Наместо распределба на вкупниот трошок, сè поголем број научни трудови предлагаат распределба на вкупната придобивка на енергетската заедница што се создала како резултат на нејзиното делување [27], [44], [146]. Според оваа идеја, секој член од заедницата ја намалува својата сметка за електрична енергија за дел од колективната придобивка на заедницата. Во продолжение се презентирани (1) методот на виртуелно нето-мерење и (2) методите базирани на теоријата на кооперативни игри. Методот на виртуелно нето-мерење е најчесто користен метод за споделување на енергија во пракса, додека методите од втората категорија се фокус на најновите научни истражувања.

4.2.1 Виртуелно нето-мерење

Методот на виртуелно нето-мерење (анг. *virtual net-metering*) е продолжение на индивидуалното нето-мерење што обично се користи кај потрошувачи-производители [147]. Денес, виртуелното нето-мерење е најчесто применет метод за споделување на енергија во светот и како таков може да се смета за претходник на новите, пософистицираните методи за директно тргување со енергија. Виртуелното нето-мерење наоѓа најголема примена во енергетски заедници со множество членови N кое колективно поседува генератор за локално производство на енергија. Моќноста на овој генератор е означена со $p_{g,N}(t)$. На членот i од заедницата му припаѓа дел од енергијата што ја произвел колективниот генератор кој се означува со φ_i , каде $0 \leq \varphi_i \leq 1$. Во практични услови, овој дел најчесто е пропорционален со инвестиција на секој член. Врз основа на тоа, членот i виртуелно ја намалува својата потрошувачка на енергија за

износ еднаков на енергијата од колективниот генератор што нему му припаѓа. Разликата меѓу двете количества енергија се балансира на месечно ниво. Математички, сметката за електрична енергија на членот i се пресметува како:

$$C_{vNM}(\{i\}) = \lambda \left(\sum_{t \in T} p_{\ell,i}(t) \Delta t - \varphi_i \sum_{t \in T} p_{g,N}(t) \Delta t \right) \quad (4.5)$$

Доколку членот i потроши помалку енергија од делот од енергијата што му припаѓа, тогаш разликата може да му се исплати во форма на парични средства или може да се префрли и да се користи во идни месеци. Повеќе информации за различни форми на методот на виртуелно нето-мерење може да се најдат во [26], [58], [148]. Главен недостаток на методот на виртуелно нето-мерење е тоа што балансирањето на енергијата на месечно ниво не овозможува да се води сметка за сопствената потрошувачка на заедницата во реално време. Како резултат на тоа, наплатата според овој метод не го отсликува енергетскиот биланс на заедницата.

4.2.2 Методи базирани на теорија на кооперативни игри

Теоријата на кооперативни игри е гранка од економската теорија што се занимава со изучување на односите меѓу членови на една заедница (коалиција). Во таа смисла, главна цел на оваа теорија е да овозможи остварување на праведна распределба на колективно генерираната придобивка на коалицијата. Секоја коалиција е составена од членови. Членовите во коалицијата делуваат според сопствените убедувања, со цел да ги остварат своите цели. Притоа, делувањето на членовите на заедницата е ограничено со обврзувачки договор што коалицијата го склучила и истовремено важи за сите нејзини членови. Според тоа, терминот „игра“, во смисла на теоријата на кооперативни игри, подразбира апстрактен математички модел на одредено сценарио во кое учествуваат актери водени од сопствените интереси [33]. Се вели дека математичкиот модел е апстрактен затоа што ги вклучува само неопходните аспекти на односите меѓу актерите во играта, т.е. ги вклучува само оние односи кои се релевантни за одлуките што актерите ги носат во рамки на играта.

Во една кооперативна игра учествуваат сите членови на енергетската заедница N . За *коалиција* се смета секое подмножество на N што се состои од членови кои се заложиле да соработуваат за да ги задоволат своите интереси. Интересите на сите членови во една коалиција се идентични. Големата коалиција (анг. *grand coalition*) претставува множеството N и тоа е коалицијата што ги содржи сите членови.

Дефиниција (Кооперативна игра): Кооперативната игра G е дефинирана со парот (N, v) , каде што $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ е конечно множество на актери, а $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$ е карактеристична функција која што на секоја коалиција $C \subseteq N$ ѝ припишува реален број $v(C)$ што се вика вредност на коалицијата. Притоа 2^N претставува партитивното множество на N кое се состои од сите подмножества на N и $v(\emptyset) = 0$.

Може да се каже дека членовите во енергетската заедница учествуваат во кооперативната игра:

$$G = (N, v) \quad (4.6)$$

во која меѓусебно директно тргуваат со енергија, а имаат колективен трошок еднаков на $C(N)$. Вредноста $v(N)$ на коалицијата N е синоним за колективната финансиска придобивка што коалицијата ја остварува како резултат на нејзиното постоење и се пресметува како разлика на трошоците при некооперативно и кооперативно делување:

$$v(N) = \sum_{i \in N} C_{NB}(\{i\}) - C(N) \quad (4.7)$$

Главното прашање со кое се занимава теоријата на кооперативни игри е како да се распредели вредноста на коалицијата $v(N)$. Кога распределбата е праведна, ниту еден член на коалицијата нема да има причина да делува некооперативно и да ја напушти коалицијата. Членот i од множеството $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ е мотивиран да соработува со други членови само ако нивната соработка резултира во додадена вредност што тие можат да ја поделат меѓу себе, а којашто не би постоела без нивната соработка. Проширувањето на една коалиција со нов член е оправдано само доколку членот не ја намалува вредноста на коалицијата на којашто се придружува. Во терминологија на теоријата на кооперативни игри, соработката помеѓу разни актери во играта (N, v) е оправдана доколку карактеристичната функција $v(N)$ на таа игра е суперадитивна.

Дефиниција (Суперадитивност): Карактеристичната функција v е суперадитивна ако вредноста на коалицијата $C \cup D$ составена од две дисјунктни коалиции $C, D \subseteq N, C \cap D = \emptyset$ е најмалку еднаква збирот на вредностите на карактеристичните функции на коалициите C и D :

$$v(C \cup D) \geq v(C) + v(D) \quad (4.8)$$

Откако главната коалиција N ќе биде формирана, потребно е да се обезбеди нејзината стабилност. Се смета дека една коалиција е стабилна доколку ниту еден нејзин член не сака да ја напушти. Стабилноста на коалицијата се обезбедува со праведна распределба на колективната придобивка $v(N)$ што коалицијата ја остварува со нејзиното постоење.

Нека векторот $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ претставува вектор со исплати на членовите на заедницата и нека поединечната исплата на секој член се означува со $x_i, \forall i \in N$. Исплатата $x_i, \forall i \in N$ на член i го означува делот од вредноста (колективната придобивка) $v(N)$ на коалицијата што е алоциран за тој член.

Дефиниција (Импутација): Во кооперативната игра (N, v) , векторот \mathbf{x} се смета за импутација доколку ја распределува вредноста на коалицијата така што:

- 1) $x_i \geq v(\{i\}), \forall i \in N$, секој член на коалицијата има придобивка од членството во коалицијата (индивидуална рационалност)

- 2) $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$, вредноста на коалицијата целосно е распределена меѓу нејзините членови (ефикасност).

За една коалицијата да биде стабилна, векторот \mathbf{x} дополнително треба да обезбеди таква распределба на $v(N)$ што ниту едно подмножество на членови C нема да си ја подобри позицијата ако се отцепи од главната коалиција N . За векторот \mathbf{x} што ги задоволува сите три услови се вели дека е во јадрото на кооперативната игра.

Дефиниција (Јадро): Јадро на кооперативната игра е множеството од сите импутации \mathbf{x} коишто го задоволуваат условот:

$$\sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \forall C \subseteq N \quad (4.9)$$

Една коалиција е стабилна доколку постои најмалку една импутација \mathbf{x} којашто го задоволува условот (4.9), т.е. доколку јадрото на кооперативната игра не е празно множество. Кога јадрото е празно, тогаш во коалицијата N постои една подкоалиција што има позитивен вишок.

Дефиниција (Вишок): Вишокот што го има една коалиција $C \subseteq N$ се пресметува според релацијата:

$$\varepsilon(C, \mathbf{x}) = v(C) - \sum_{i \in C} x_i, \forall C \subseteq N \quad (4.10)$$

Оваа вредност суштински укажува на вкупното незадоволство, во смисла на опортунитетни финансиски трошоци, на коалицијата C [44]. Методите базирани на теорија на кооперативни игри се стремат да изнајдат таква распределба што ќе резултира во стабилизирачки вектор на исплата, т.е. во вектор на исплата кој е во јадрото на кооперативната игра и кој има негативен вишок. Пример за вакви методи се методот за распределба на придобивката со методот на Нешово пазарење, нуклеолусот, методот МинВар, методот на Шеплиевата вредност итн.

4.2.2.1 Нешово пазарење

Методот на Нешово пазарење, предложен од Џон Неш во 1950 година [34], е дефиниран со следниот оптимизациски проблем:

$$\max \prod_{i=1}^n x_{ES,i} \quad (4.11)$$

така што ќе бидат задоволени ограничувањата:

$$x_{ES,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{ES}(\{i\}), \forall i \in N \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ES,i} = v(N) \quad (4.13)$$

Како решение на овој оптимизациски проблем, секој член на заедницата завршува со еднаков дел од колективната придобивка, како што е посочено во [146]. Така,

резултатот ќе биде вектор на исплата x_{ES} чиешто елементи се меѓусебно еднакви и кој ги задоволуваат условите на Парето оптималност, ефикасност и индивидуална рационалност. Векторот x_{ES} задоволува Парето оптималност затоа што исплатите на сите членови се еднакви. Според тоа, подобрување на исплатата на еден член ќе биде на сметка на намалување на исплатата на друг член. Дополнително, се вели дека исплатата е ефикасна, затоа што во целост ја распределува колективната придобивка меѓу сите членови на заедницата. Конечно, векторот x_{ES} гарантира индивидуална рационалност затоа што на никој член не му ја влошува состојбата во споредба со случајот кога тој не е дел од заедницата. Недостатокот на овој метод е тоа што тој не гарантира групна рационалност, па решението што го нуди не е во јадрото. Финансиската заштеда што ја остварува секој член од заедницата кога се применува Нешово пазарење е еднаква на:

$$x_{ES,i} = \frac{v(N)}{n} \quad (4.14)$$

4.2.2.2 Нуклеолус

Нуклеолусот е метод за распределба на вредноста на коалицијата $v(N)$ што е предложено од Шмеидлер во 1969 година [142]. Во основа, одредувањето на нуклеолусот се сведува на минимизација на најголемиот вишок на сите подкоалиции, т.е. на решавање на следниот оптимизациски проблем:

$$\min \varepsilon \quad (4.15)$$

така што ќе бидат задоволени ограничувањата:

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad (4.16)$$

$$\varepsilon + \sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \forall C \subseteq N \quad (4.17)$$

$$\varepsilon \in \mathbb{R}, x_i \in \mathbb{R}, \forall i \in N \quad (4.18)$$

Првото ограничување во оптимизацискиот проблем води сметка решението да го задоволува условот на ефикасност. Второто ограничување води сметка за задоволување на условот на групна рационалност, а третото ограничување го дефинира доменот на максималниот вишок ε и исплатите x_i на членовите на заедницата. Решението на овој оптимизациски проблем се нарекува пред-нуклеолус. После првата итерација, пред-нуклеолусот се користи како параметар во следниот оптимизациски проблем, кој согласно [39] претставува модификација на претходниот. За да се одреди нуклеолусот, последователно се решаваат низа оптимизациски проблеми согласно постапката дефинирана во [39]. Главната предност на нуклеолусот е тоа што тој секогаш гарантира решение што е во јадрото на кооперативната игра, т.е. решение што ја стабилизира коалицијата. За ваквото решение секогаш може да се тврди дека е праведно. Дури и кога јадрото е празно, нуклеолусот нуди решение кое на ниеден член не му дозволува да си ја подобри позицијата со делување во друга насока. Меѓутоа, за пресметките на

нуклеолусот потребни се големи компјутерски ресурси, а тоа ја спречува неговата примена на коалиции (енергетски заедници) со голем број на членови. Затоа, ова правило за распределба нема да биде применето во нумеричките анализи на оваа дисертација, а наместо него ќе се користи друго правило што е предложено во литературата како негова замена.

4.2.2.3 МинВар

Методот на распределба на колективната придобивка со најмала варијанса (МинВар) (анг. *MinVar*) (MV) е предложен во [27] како замена за пресметковно поинтензивниот метод нуклеолус. Методот MV ја распределува вредноста (колективната придобивка) на коалицијата $v(N)$ на начин што гарантира стабилност на коалицијата. Векторот на исплата \mathbf{x} се добива како резултат на оптимизациски проблем дефиниран со квадратно програмирање. Целна функција на оптимизацискиот проблем е варијансата (дисперзијата) на векторот на исплата \mathbf{x} . Оптимизацискиот проблем ја минимизира варијансата на елементите на \mathbf{x} водејќи сметка \mathbf{x} да биде во јадрото на кооперативната игра:

$$\min \frac{\sum_{i \in N} x_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i \in N} x_i}{n} \right)^2 \quad (4.19)$$

така што ќе бидат задоволени ограничувањата:

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad (4.20)$$

$$\sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \forall C \subseteq N \quad (4.21)$$

$$x_i \geq 0, \forall i \in N \quad (4.22)$$

Слично како нуклеолусот, МинВар обезбедува праведна исплата за членовите (исплата што ја стабилизира коалицијата). Векторот на исплата добиен како резултат на оптимизацискиот проблем на MV се означува со \mathbf{x}_{MV} . За разлика од нуклеолусот, MV се базира на еден оптимизациски проблем, а не на низа последователни оптимизациски проблеми. Тоа значително го намалува потребното време за пресметки во споредба со нуклеолусот и овозможува негова примена во поголеми коалиции. Сепак, пред да се изврши оптимизацискиот проблем дефиниран погоре, потребно е да се пресмета вредноста $v(C)$ на сите подкоалиции што може да произлезат од главната коалиција N . Како резултат на тоа, MV има пресметковна комплексност еднаква на $O(2^n)$ што, слично како за Шеплиевата вредност, е ограничувачки фактор за практична примена на овој метод во заедници со повеќе од неколку десетици членови.

4.2.2.4 Шеплиева вредност

Методот на Шеплиева вредност (анг. *Shapley value*) (SV) е предложена од Лојд Шепли, кој во 1951 година за истата добил Нобелова награда за економија [40]. Овој метод на секој член на заедницата му припишува дел од колективната придобивка кој е

пропорционален на неговиот маргинален придонес во сите подкоалиции на N во кои може да членува. Во [40], Шепли го дефинира уделот што се припишува на членот i на следниот начин: „вредноста $\phi_i(v)$ на играта v ќе претставува функција со којашто на секој член $i \in N$ се припишува реален број $\phi_i(v)$ кој ги задоволува следните аксиоми“:

- 1) Симетрија: $v(C \cup \{i\}) = v(C \cup \{j\})$, $\forall C \subseteq N, \forall i, j \in C, C \cap \{i, j\} = \emptyset$, за коишто важи $\phi_i(v) = \phi_j(v)$;
- 2) Ефикасност: $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$;
- 3) Адитивност: $\phi_i(v + u) = \phi_i(v) + \phi_i(u)$;
- 4) Неважен член: $v(C \cup \{i\}) = v(C)$, $\forall C \subseteq N, \forall i \in C, C \cap \{i\} = \emptyset$, каде што $\phi_i(v) = 0$.

Дефиниција (Шеплиева вредност): Шеплиевата вредност претставува правило за еднозначно распределување на вредноста на коалицијата меѓу нејзините членови, така што ќе бидат задоволени аксиомите на симетрија, ефикасност, адитивност и аксиомата на неважен член:

$$\phi_i(v) = \sum_{C \subseteq N, i \in C} \frac{c!(n-c-1)!}{n!} [v(C \cup \{i\}) - v(C)] \quad (4.23)$$

каде n и c се вкупниот број на членови во коалициите N и C , соодветно. SV е во јадрото на кооперативната игра ако карактеристичната функција $v(N)$ на кооперативната игра е конвексна. Најчесто, карактеристичните функции на кооперативни игри не се конвексни, па SV не гарантира исплата што е во јадрото. Од друга страна, многу трудови сметаат дека решението што го дава SV е меритократско затоа што се базира на просечен маргинален придонес со соодветен тежински фактор, согласно (4.23). Кога се применува SV , исплатата на членот i ќе биде означена со $x_{SV,i} = \phi_i(v)$.

4.3 Ценовни механизми за локални пазари на електрична енергија

Методите за распределба на колективната придобивка и колективниот трошок, презентирани во 4.1 и 4.2, се базираат на концептот на виртуелно мерење [26]. Покрај оваа класа на методи, во литературата постојат и т.н. ценовни механизми за локални пазари на електрична енергија. Во една заедница што врши директно тргување со енергија преку ценовни механизми, управителот на заедницата испраќа ценовни сигнали до членовите на заедницата со цел да ги мотивира да купат или продадат енергија, во зависност од состојбата на локалниот пазар. Цените на електричната енергија на локалниот пазар се пропорционални на потрошувачката, а обратно пропорционални на производството. Така, кога на локалниот пазар недостасува локално произведена енергија, тогаш цената за електричната енергија е висока, со цел да се мотивираат членовите на заедницата да штедат или да произведуваат енергија. Од друга страна, кога членовите на енергетската заедница произведуваат повеќе отколку

што трошат, тогаш цената на електричната енергија на локалниот пазар е ниска, што постигнува спротивен ефект, т.е. мотивира зголемена потрошувачка. Презентирани се три постоечки ценовни механизми што се користат за пресметка на цените за електрична енергија: механизмот за делење на колективна сметка, механизмот на средна цена и механизмот на количник на понуда и побарувачка.

4.3.1 Механизам за делење на колективна сметка

Според механизмот на делење на колективна сметка (анг. *bill sharing*) (BS), сметката за електрична енергија на секој член се пресметува само врз основа на енергијата што тој ја разменува со дистрибутивната мрежа [21]. Овој ценовен механизам е доста сличен со методот на индивидуална нето-наплата, но, за разлика од индивидуална нето-наплата кадешто се користат цените λ and μ , BS користи модифицирани цени. Според тоа, трошокот за електрична енергија на членот i се пресметува како:

$$C_{BS}(\{i\}) = \lambda_{BS} \sum_{t \in T} P_{im,i}(t) \Delta t - \mu_{BS} \sum_{t \in T} P_{ex,i}(t) \Delta t \quad (4.24)$$

Цената за енергијата преземена од мрежата λ_{BS} и цената за енергијата предадена во мрежата μ_{BS} го отсликуваат енергетскиот биланс на заедницата за пресметковниот период T . Тие се пресметуваат на следниот начин:

$$\lambda_{BS} = \lambda \frac{\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N} P_{\ell,i}(t) - P_{sc,N}(t) \right)}{\sum_{t \in T} \sum_{i \in N} P_{im,i}(t)} \quad (4.25)$$

$$\mu_{BS} = \mu \frac{\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N} P_{g,i}(t) - P_{sc,N}(t) \right)}{\sum_{t \in T} \sum_{i \in N} P_{ex,i}(t)} \quad (4.26)$$

Модифицираната цена за енергијата преземена од мрежата λ_{BS} е пропорционална на односот меѓу (1) моќноста преземена од мрежата во точката на приклучување на целата заедница и (2) сумата на моќностите преземени од сите членови на заедницата во нивните индивидуални точки на приклучување. По аналогија, модифицираната цена за енергијата предадена во мрежата μ_{BS} се пресметува врз основа на моќноста предадена во мрежата на колективно и индивидуално ниво. Цените λ_{BS} и μ_{BS} се временски непроменливи во текот на еден пресметковен период.

Откако за еден член ќе се пресмета трошокот за електрична енергија $C_{BS}(\{i\})$, неговата индивидуална финансиска придобивка за тој период $x_{BS,i}$ се пресметува како разлика меѓу трошокот од индивидуална нето-наплата и трошокот од BS:

$$x_{BS,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{BS}(\{i\}) \quad (4.27)$$

Таа укажува на финансиската заштеда што членот i ја остварува кога е дел од енергетската заедница во којашто се применува механизмот BS.

4.3.2 Механизам на средна цена

Механизмот на средна цена (анг. *mid-market rate*) (MMR) го проширува концептот презентираан во потточка 4.3.1 преку воведување на временски променливи цени [22]. Така, трошокот за електрична енергија на членот i , според овој ценовен механизам, се пресметува како:

$$C_{MMR}(\{i\}) = \sum_{t \in T} \lambda_{MMR}(t) p_{im,i}(t) \Delta t - \sum_{t \in T} \mu_{MMR}(t) p_{ex,i}(t) \Delta t \quad (4.28)$$

MMR ги ограничува временски променливите цени што се користат за тргување на локалниот пазар ($\lambda_{MMR}(t)$ и $\mu_{MMR}(t)$) меѓу цените за енергија што се предава и презема на мрежата (μ и λ). Ова ограничување може да се напише како $\mu \leq \lambda_{MMR}(t), \mu_{MMR}(t) \leq \lambda$. Со оглед на тоа што цените $\lambda_{MMR}(t)$ и $\mu_{MMR}(t)$ се временски променливи, тие се пресметуваат за секој интервал t . Формулите за пресметка на моментните вредности на $\lambda_{MMR}(t)$ и $\mu_{MMR}(t)$ го отсликуваат моментниот енергетски биланс во заедницата [21].

Се издвојуваат три случаи:

- 1) Кога вкупно произведената моќност е еднаква на потрошувачката

$$\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) = \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t), \text{ вредноста на цените е еднаква на } \lambda_{MMR}(t) = \mu_{MMR}(t) = c_{p2p}(t),$$

каде:

$$c_{p2p}(t) = \frac{\lambda + \mu}{2} \quad (4.29)$$

и истата се нарекува средна пазарна цена.

- 2) Кога вкупно произведената моќност ја надминува потрошувачката

$$\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) > \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t):$$

$$\lambda_{MMR}(t) = c_{p2p} \quad (4.30)$$

$$\mu_{MMR}(t) = \frac{c_{p2p} \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) + \mu \left(\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) \right)}{\sum_{i \in N} p_{g,i}(t)} \quad (4.31)$$

- 3) Кога вкупно произведената моќност е помала од потрошувачката

$$\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) < \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t):$$

$$\lambda_{MMR}(t) = \frac{c_{p2p} \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) + \lambda \left(\sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) \right)}{\sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t)} \quad (4.32)$$

$$\mu_{MMR}(t) = c_{p2p} \quad (4.33)$$

Исплатата $x_{MMR,i}$ на член i се пресметува како разлика на трошокот од индивидуална нето-наплата и трошокот од MMR:

$$x_{MMR,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{MMR}(\{i\}) \quad (4.34)$$

Таа укажува на финансиската заштеда што членот i ја остварува кога е дел од енергетската заедница во којашто се применува механизмот MMR.

4.3.3 Механизам на количник на понуда и побарувачка

Механизмот на количник на понуда и побарувачка (анг. *supply and demand ratio*) (*SDR*), претставен во [23], се заснова за следните принципи:

- 1) Внатрешните цени $\lambda_{SDR}(t)$ и $\mu_{SDR}(t)$ се ограничени така што

$$\mu \leq \lambda_{SDR}(t), \mu_{SDR}(t) \leq \lambda;$$
- 2) Врската меѓу цените и количникот на понудата (предадената енергија) и побарувачката (преземената енергија) е инверзно пропорционален;
- 3) Економскиот биланс во енергетската заедница е загарантиран.

Износот на фактурата на електрична енергија на членот i се пресметува според:

$$C_{SDR}(\{i\}) = \sum_{t \in T} \lambda_{SDR}(t) p_{im,i}(t) \Delta t - \sum_{t \in T} \mu_{SDR}(t) p_{ex,i}(t) \Delta t \quad (4.35)$$

каде количникот меѓу вкупната понуда и побарувачка (во точката на приклучување на енергетската заедница) е еднаков на количник на збирната моќност што сите членови ја предаваат на мрежата поединечно и збирната моќност што сите членови ја преземаат од мрежата, поединечно:

$$SDR(t) = \frac{\sum_{i \in N} p_{ex,i}(t)}{\sum_{i \in N} p_{im,i}(t)} \quad (4.36)$$

Овој количник се пресметува за секој временски чекор од анализата и служи за одредување на внатрешните цени за директно тргување со енергија:

$$\mu_{SDR}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda \cdot \mu}{(\lambda - \mu)SDR(t) + \mu}, & 0 \leq SDR(t) \leq 1 \\ \mu, & SDR(t) > 1 \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\lambda_{SDR}(t) = \begin{cases} \mu_{SDR}(t)SDR(t) + \lambda(1 - SDR(T)), & 0 \leq SDR(t) \leq 1 \\ \mu & , SDR(t) > 1 \end{cases} \quad (4.38)$$

Исплатата $x_{SDR,i}$ за членот i се пресметува како разлика на трошокот кога членот е сам $C_{NB}(\{i\})$ и неговиот трошок кога се користи механизмот SDR $C_{SDR}(\{i\})$:

$$x_{SDR,i} = C_{NB}(\{i\}) - C_{SDR}(\{i\}) \quad (4.39)$$

Вредноста $x_{SDR,i}$ е еднаква на финансиската заштеда што членот i ја остварува кога е дел од енергетската заедница во којашто се применува механизмот SDR.

Глава 5

Метод за виртуелна нето-наплата

Методите за колективно директно тргување дискутирани во претходната глава имаат различно ниво на практична применливост. Применливоста на еден метод зависи од тоа колку лесно тој може технички да се имплементира, но и колку лесно може да се вклопи во постоечката законска и правна рамка на електроенергетскиот сектор. Искуството покажува дека во реални услови, директното тргување со енергија наједноставно се имплементира преку концептот на виртуелно мерење [26]. Преку соодветна правна рамка, денес сè поприсутен станува методот на виртуелно „нето-мерење“ и тоа во Соединетите Американски Држави, Бразил, Израел, Мексико [26] и одредени земји од Европа [58], [149]. Овој метод се применува, на пример, кога група потрошувачи здружено инвестираат во колективен фотоволтаичен генератор што ќе го користат за задоволување на сопствените потреби за електрична енергија. Виртуелното нето-мерење им овозможува на членовите на заедницата да се „претплатат“ на енергијата што е произведена од фотоволтаичниот генератор и да ја користат како таа да е произведена од систем што им е поставен зад нивното електрично броило. Во текот на работата на фотоволтаичниот генератор, енергијата што тој ја произведува секој месец се дели меѓу членовите на заедницата пропорционално на нивната инвестиција. Меѓутоа, треба да се има предвид дека виртуелното нето-мерење, како и индивидуалното нето-мерење, се базира на балансирање на производство и потрошувачката на месечно ниво и не води сметка за размената на енергија со дистрибутивната мрежа во реално време. Тоа може да има негативни последици врз (1) дистрибутивната мрежата и (2) праведноста на распределбата на колективната придобивка.

Во однос на ефектите врз дистрибутивната мрежа, виртуелното нето-мерење ја третира дистрибутивната мрежа како идеална батерија со неограничен капацитет. Така, членовите на заедницата го „складираат“ вишокот производство од колективниот фотоволтаичен генератор во дистрибутивната мрежа, а потоа, во целиот останат период за наплата, тој им е достапен во целост, без никакви загуби на енергија. Тоа не само што не дава вистинска слика за енергетските биланси во заедницата, туку и ги демотивира нејзините членови да ја користат енергија од фотоволтаичниот генератор во реално време. Индиректно, тоа придонесува за дебалансите на ниво на електроенергетски систем. Во однос на втората точка, сите членови на заедницата имаат придобивка (дел од вкупното производство) што е пропорционална на нивната инвестиција. Иако овој пристап на прв поглед може да делува праведно, тој воопшто не ја отсликува реалната заслуга на секој член во заедницата. За илустрација на неправедноста што произлегува од виртуелното нето-мерење, доволно е да се разгледа еден граничен, хипотетички случај.

Нека постои енергетска заедница со n членови кои здружено инвестирале во фотоволтаичен генератор што ќе го користат за задоволување на нивните потреби за електрична енергија. Нека сите членови на таа заедница, освен k -тиот член, трошат енергија само во текот на ноќта, додека k -тиот член троши енергија само во текот на денот. Дополнително, нека k -тиот член троши доволно енергија за локално да го искористи целото производство на фотоволтаичниот генератор на заедницата. На крајот на месецот, k -тиот член ќе има придобивка што е пропорционална само на неговата инвестиција, иако тој практично бил одговорен за искористување на целото производство од колективниот генератор. Од друга страна, останатите членови исто така ќе имаат придобивка, иако тие трошеле енергија само во текот на ноќта, кога колективниот фотоволтаичен генератор не произведува енергија. Оттука произлегува и неправедноста на виртуелното нето-мерење. Во таа смисла, концептот на виртуелно нето-мерење е корисен за промовирање на здружени енергетски проекти, но тој не успева правилно да ја рефлектира вредноста на поединечните членови на заедницата. Дополнително, методот на виртуелно нето-мерење потешко се применува во заедници со потрошувачи-производители со индивидуално дистрибуирано производство.

Затоа, во оваа глава е предложен методот за виртуелно нето-наплата (анг. *virtual net-billing*) (VNB). Методот за виртуелна *нето-наплата* претставува продолжение на индивидуалната нето-наплата, на сличен начин како што методот на виртуелно *нето-мерење* претставува продолжение на индивидуалното нето-мерење. На самиот почеток на главата, дадена е математичката формулација на предложениот метод за виртуелна нето-наплата. Предложениот метод ја третира енергетската заедница како еден потрошувач-производител чија сметка се пресметува со нето-наплата, а придобивката на заедницата се распределува меѓу нејзините членови во реално време. Тоа се постигнува со правилото за пропорционална распределба (анг. *proportional fair sharing*) што е предложено и презентирano во продолжение. Со примена на ова правило, секој член добива дел од колективната придобивка што е пропорционална со неговиот придонес во создавањето на таа придобивка, во реално време. На крај на оваа глава, својствата на методот на виртуелно нето-наплата теоретски се анализирани со примена на теорија на кооперативни игри.

5.1 Формулација на виртуелна нето-наплата

За да се задржи генералноста на описот, нека се разгледува енергетска заедница со потрошувачи-производители кои директно тргуваат со енергија. Методот за виртуелна нето-наплата ја дефинира постапката според која се споделување (директно тргува) енергијата. Овој метод се основа на следните принципи:

- На индивидуално ниво, секој член на енергетската заедница го задржува делот од локалното производство што го троши зад точката на приклучување, т.н. сопствена потрошувачка;

- На ниво на заедница, секој член на енергетската заедница, со останатите членови на енергетската заедница смее да го споделува само вишокот од сопственото производство $p_{ex,i}(t)$;
- На ниво на заедница, секој член на енергетската заедница добива дел од сопствената потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ кој е еднаков на $p'_{sc,i}(t)$
- Споделувањето на енергијата се врши по претходно договорена цена π .

Овие принципи се преточени во единствена равенка со која може да се пресмета трошокот за енергија на секој член i од енергетската заедница.

Дефиниција (Виртуелна нето-наплата): Трошокот за електрична енергија на член i за одреден период за наплата, пресметана согласно предложениот метод за виртуелна нето-наплата, е еднаков на:

$$C_{VNB}(\{i\}) = \lambda \sum_{t \in T} (p_{im,i}(t) - p'_{sc,i}(t)) \Delta t + \pi \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t \quad (5.1)$$

Во (5.1) фигурираат три собирока. Првиот собирук, го претставува износот што членот i го плаќа на снабдувачот за енергијата што ја презел од мрежата $p_{im,i}(t)$, намалена за делот од сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,i}(t)$ што нему му се припишува. Од гледна точка на снабдувачот, членот i , во момент t има потреба од моќност еднаква на $(p_{im,i}(t) - p'_{sc,i}(t))$, што е различна од неговата реална потреба $p_{im,i}(t)$. Тоа е така затоа што членот i ја обезбедил разликата $p'_{sc,i}(t)$ од вишокот производство на останатите членови во заедницата. Правилото според кое на членот i му се доделува износот $p'_{sc,i}(t)$ е презентираан подолу во оваа глава. Вториот собирук во (5.1) му наплаќа на членот i за енергијата што била споделена со него во рамки на заедницата. На тој начин се обезбедуваат средства со коишто може да им се плати на членовите во заедницата за моќноста што тие ја инјектирале во мрежата. Третиот собирук го опишува износот што му се исплаќа на членот i за енергијата што и тој самиот ја инјектирал во мрежата.

5.2 Правило на пропорционална распределба

Кога се користи методот за виртуелна нето-наплата, на секој член од заедницата се припишува дел од колективната сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ еднаков на $p'_{sc,i}(t)$. Тоа се прави со помош на правилото на пропорционална распределба (анг. *proportional fair sharing*) (PFS). Правилото за пропорционална распределба ги има следните својства:

- Во реално време алоцира дел од финансиските заштеди за член i врз основа на неговиот придонес во креирање на колективната сопствена потрошувачка на вишокот;

- Правилно го отсликува енергетскиот биланс во енергетската заедница;
- Се пресметува само врз основа на енергијата што секој член ја разменува со мрежата во неговата точка на приклучување.

Предложеното правило треба да обезбеди распределба на колективната придобивка на заедницата $v(N)$ меѓу членовите врз основа на нивниот пропорционален придонес во создавањето на таа придобивка. Како што подоцна ќе биде докажано, придонесот на членот i во создавање на колективната придобивка $v(N)$ е еднаков со неговиот придонес во создавање на вкупната сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$.

Нека сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ биде распределена меѓу членовите на коалицијата, така што секој член ќе добие:

$$p'_{sc,i}(t) = \alpha_i(t) p'_{sc,N}(t) \quad (5.2)$$

каде $p'_{sc,i}(t)$ е вредноста припишана на членот i , а $\alpha_i(t)$ е пропорционалниот придонесот на i во создавањето на $p'_{sc,N}(t)$.

Тогаш, се поставува прашањето „Кој е пропорционалниот придонес $\alpha_i(t)$ на членот i во создавање на колективната сопствена потрошувачка $p'_{sc,N}(t)$?“

Од изразот (3.24) следи дека членот i може да придонесе во создавањето на $p'_{sc,N}(t)$ со преземање на моќност од мрежата кога другите членови од заедницата имаат вишок производство (да биде нето-потрошувач во исто време кога постојат нето-производители) или со предавање на вишокот производство во мрежата кога во заедницата има членови кои истовремено преземаат моќност од мрежата (да биде нето-производител во исто време кога има нето-потрошувачи).

Нека множеството со сите членови на коалицијата биде претставено како унија на множествата на нето-потрошувачи и нето-производители $N = N_{im} \cup N_{ex}$, $N_{im} \cap N_{ex} = \emptyset$, каде N_{im} е множество на нето-потрошувачи, а N_{ex} е множество на нето производители. Предложеното правило се базира на следните три чекори:

- Распредели ја сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ меѓу множествата N_{im} и N_{ex} според нивниот придонес во создавање на $p'_{sc,N}(t)$;
- Распредели го делот на колективната сопствена потрошувачка на вишокот.. што припаѓа на N_{ex} меѓу членовите $i \in N_{ex}$ (нето-производителите) според нивниот придонес во вкупната нето-предадена моќност $\sum_{i \in N} p_{ex,i}(t)$;
- Распредели го делот на колективната сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ што припаѓа на N_{im} меѓу членовите $i \in N_{im}$ (нето-потрошувачите) според нивниот придонес во вкупната нето-преземена моќност $\sum_{i \in N} p_{im,i}(t)$;

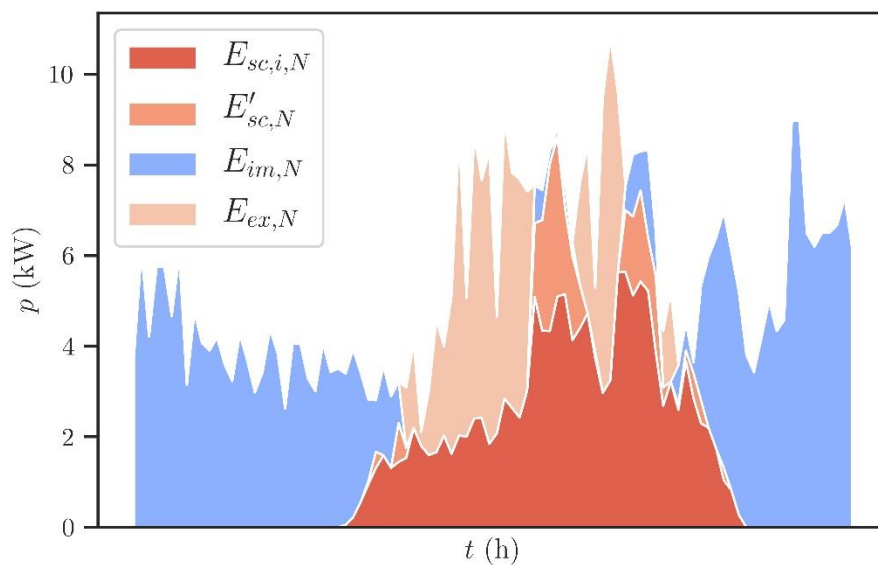
Колективната сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$ го претставува преклопувањето на сумарните дијаграми на нето-производителите и нето потрошувачите. Со цел да дојде до тоа преклопување, нето-производителите N_{ex} во моментот t мора во мрежата да предадат најмалку $p'_{sc,N}(t)$, а нето-потрошувачите N_{im} мора да преземат од мрежата најмалку $p'_{sc,N}(t)$. Во апсолутна вредност, двете множества мора да алоцираат еднаква количина од нивната моќност за да има позитивна колективна сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t) > 0$. Со оглед на тоа што нивните придонеси се еднакви, $1/2 p'_{sc,N}(t)$ се припишува на N_{ex} , а $1/2 p'_{sc,N}(t)$ се припишува на N_{im} . Во вториот и третиот чекор, овие вредности се распределуваат меѓу членовите на двете множества. Поточно, во рамки на множеството N_{ex} , придонесот на i е претставен со односот $p_{ex,i}(t) / \sum_{j \in N} p_{ex,j}(t)$. Истовремено, во рамки на множеството N_{im} , придонесот на i е претставен со односот $p_{im,i}(t) / \sum_{j \in N} p_{im,j}(t)$.

Дефиниција (Правило на пропорционална распределба): Правилото на пропорционална распределба на заштедите според придонесот $\alpha_i(t)$ на членот i е дефинирано со следната релација:

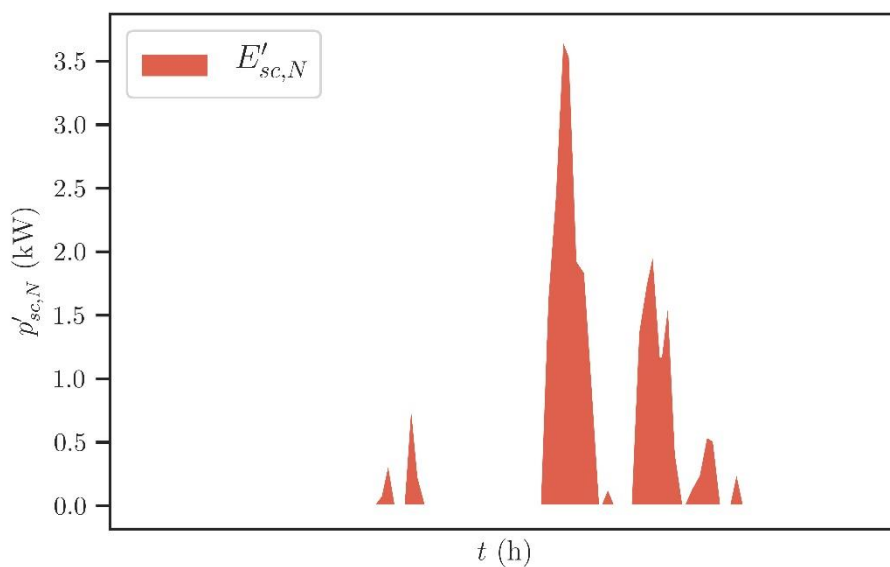
$$\alpha_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{p_{ex,i}(t)}{\sum_{j \in N} p_{ex,j}(t)} & , p_{ex,i}(t) > 0 \\ \frac{1}{2} \frac{p_{im,i}(t)}{\sum_{j \in N} p_{im,j}(t)} & , p_{im,i}(t) > 0 \\ 0 & , \text{останато} \end{cases} \quad (5.3)$$

Се забележува дека $0 \leq \alpha_i(t) \leq 1, \forall i \in N$ и $\sum_{i \in N} \alpha_i(t) = 1, \forall t \in T$.

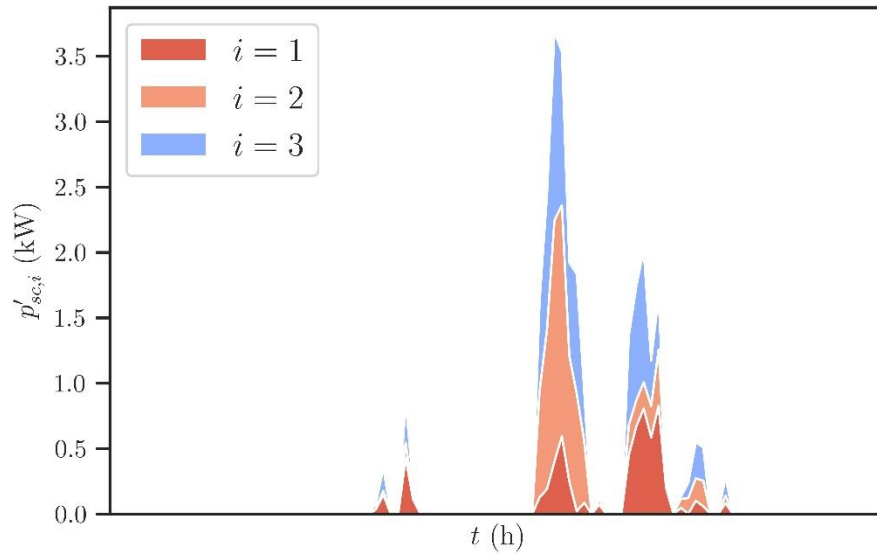
За илустрација на методот за виртуелна нето-наплата со предложеното правило за пропорционална распределба, што е интегрален дел од методот, анализирана е енергетска заедница со три члена. Слика 5.1 го покажува енергетскиот биланс на целата енергетска заедница во текот на еден ден. Од интерес за директното тргување е сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$, која е прикажана издвоено на Слика 5.2. Постигнатата распределба за сопствената потрошувачка на вишокот со помош на правилото за пропорционална распределба е прикажана на Слика 5.3. Како резултат на оваа распределба, на крајот од месецот, секој член има исплата што е пропорционална на неговиот придонес во создавање на сопствената потрошувачка на вишокот.



Слика 5.1. Биланси на енергија за еден ден во енергетска заедница ($n = 3$)



Слика 5.2. Сопствена потрошувачка на вишокот во заедницата ($n = 3$)



Слика 5.3. Распределба на сопствената потрошувачка на вишокот меѓу членовите на заедницата според методот за виртуелна нето-наплата ($n = 3$)

5.3 Анализа на методот за виртуелна нето-наплата со помош на теорија на кооперативни игри

Во оваа потточка, направена е анализа којашто покажува дека методот за виртуелна нето-наплата задоволува одредени својства од теоријата на кооперативни игри. Поточно, спроведената анализа покажува дека карактеристичната функција на кооперативната игра $v(N)$, уште позната како вредност на коалицијата, задоволува суперадитивност и дека јадрото на кооперативната игра е празно.

Усвоено е дека вредноста на коалицијата се пресметува како разлика меѓу вкупните трошоци кога членовите на заедницата делуваат некооперативно и кога тие делуваат кооперативно:

$$v(N) = \sum_{i \in N} C_{NB}(\{i\}) - \sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\})$$

Така, вредноста на коалицијата $v(N)$ ја дефинира колективната придобивка од кооперативното делување на сите членови на коалицијата. Овој израз може дополнително да се трансформира:

$$\begin{aligned} v(N) &= \sum_{i \in N} C_{NB}(\{i\}) - \sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\}) \\ &= \sum_{i \in N} [\lambda \sum_{t \in T} p_{im,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t - \\ &\quad - (\lambda \sum_{t \in T} (p_{im,i}(t) - p'_{sc,i}(t)) \Delta t + \\ &\quad + \pi \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t) \end{aligned}$$

од каде што следи:

$$\begin{aligned}
v(N) &= \sum_{i \in N} [\lambda \sum_{t \in T} p_{im,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t - \\
&\quad - \lambda \sum_{t \in T} p_{im,i}(t) \Delta t + \lambda \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t - \\
&\quad - \pi \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t + \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t] . \\
&= \sum_{i \in N} (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t \\
&= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} p'_{sc,i}(t) \Delta t
\end{aligned}$$

Водејќи сметка дека сопствена потрошувачка на вишокот производство $p'_{sc,N}(t)$ се распределува на сите членови:

$$p'_{sc,N}(t) = \sum_{i \in N} p'_{sc,i}(t) \quad (5.4)$$

вредноста (колективната придобивка) на коалицијата N ја добива следната компактна форма:

$$v(N) = (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t \quad (5.5)$$

Изведената равенка (5.5) го потврдува она што интуитивно е јасно, дека вредноста на коалицијата N зависи од способноста на нејзините членови меѓусебно да споделуваат енергија, односно од нивната способност да имаат сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t)$. Формално, вредноста на заедницата $v(N)$ е позитивна кога:

- $\lambda > \pi$, вишокот локално производство се тргува по цена којашто е пониска од цената на енергијата преземена од мрежата,
- $\exists t \in T, p'_{sc,N}(t) > 0$, постои најмалку еден временски интервал во кој моќноста инјектирана во мрежата од едни членови истовремено е преземена од други членови на коалицијата.

Од првиот услов се забележува дека придобивката на коалицијата е пропорционална на разликата $(\lambda - \pi)$. Со оглед на тоа што цената λ ја дефинира снабдувачот, членовите на коалицијата се мотивирани да споделуваат енергија по што е можно пониска цена π . Несакани дополнителни трошоци од директното тргување се избегнуваат ако цената на споделената енергија е во граници $\mu \leq \pi \leq \lambda$ [41]. Вториот услов покажува дека вредноста на коалицијата е позитивна доколку енергијата предадена во мрежата од едни членови истовремено е преземена од други. Оваа е можно доколку во коалицијата постојат членови со разновидни дијаграми на производство и потрошувачка, што е речиси секогаш исполнето во пракса.

Дефиниција: За членовите $i, j \in N$ се вели дека имаат разновидни дијаграми за производство и потрошувачка доколку постои најмалку еден временски момент t во кој членот i е нето-производител (предава моќност на мрежата), а членот j е нето-потрошувач (презема моќност од мрежата), т.е. $\exists t \in T, p_{im,i}(t) > 0 \wedge p_{ex,j}(t) > 0$.

Секоја коалиција што има најмалку два члена со разновидни дијаграми на производство и потрошувачка има позитивна сопствена потрошувачка на вишокот $p'_{sc,N}(t) > 0$. Имајќи предвид дека вредноста на коалицијата зависи од колективната сопствена потрошувачка на вишокот, во следниот дел од текстот се претпоставува дека коалицијата има членови со разновидни дијаграми на производство и потрошувачка. Оправданоста на оваа претпоставка може да се потврди од [150] и од емпириските резултати презентирани подолу во докторката дисертација.

Дополнително, може да се покаже дека вредноста на коалицијата дефинирана во потточка 4.2.2 и вредноста дефинирана во оваа глава се еднакви. Во 4.2.2 вредноста на коалицијата е дефинирана според:

$$v(N) = \sum_{i \in N} C_{NB}(\{i\}) - C(N)$$

додека вредноста на коалицијата што се пресметува со методот на виртуелна нето-наплата е еднаква на:

$$v(N) = \sum_{i \in N} C_{NB}(\{i\}) - \sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\})$$

Притоа, $C(N)$ се пресметува според релацијата:

$$\begin{aligned} C(N) &= \lambda \left[\sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{g,i}(t) \right]_+ \Delta t \\ &\quad - \mu \left[\sum_{i \in N} p_{g,i}(t) - \sum_{i \in N} p_{\ell,i}(t) \right]_+ \Delta t \\ &= \lambda \sum_{i \in N} p_{im,N}(t) \Delta t - \mu \sum_{i \in N} p_{ex,N}(t) \Delta t \end{aligned}$$

додека за $\sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\})$ важи:

$$\sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\}) = \sum_{i \in N} \left(\begin{aligned} &\lambda \sum_{t \in T} (p_{im,i}(t) - p'_{sc,i}(t)) \Delta t \\ &+ \pi \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,i}(t) \Delta t \end{aligned} \right)$$

а имајќи предвид дека $\pi = \mu$ се добива:

$$\sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\}) = \sum_{i \in N} \left(\begin{aligned} &\lambda \sum_{t \in T} (p_{im,i}(t) - p'_{sc,i}(t)) \Delta t \\ &- \mu \sum_{t \in T} (p_{ex,i}(t) - p'_{sc,i}(t)) \Delta t \end{aligned} \right)$$

па следи:

$$\begin{aligned}\sum_{i \in N} C_{VNB}(\{i\}) &= \lambda \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in Nim} p_{im,i}(t) - p'_{sc,N}(t) \right) \Delta t \\ &\quad - \mu \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in Nex} p_{ex,i}(t) - p'_{sc,N}(t) \right) \Delta t \\ &= \lambda \sum_{t \in T} p_{im,N}(t) \Delta t - \mu \sum_{t \in T} p_{ex,N}(t) \Delta t\end{aligned}$$

од каде што се покажува дека двете равенки се еднакви.

5.3.1 Суперадитивност

Како што беше презентирано во претходната глава, едно од корисните својства што може да ги има карактеристичната функција на кооперативната игра (N, v) е суперадитивност.

Теорема 1: Карактеристичната функција $v(N) = (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t$ на кооперативната игра (N, v) е суперадитивна.

Доказ: За множествата $C, D \subseteq N, C \cap D \neq \emptyset$ следува:

$$\begin{aligned}v(C \cup D) &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,C \cup D}(t) \Delta t \\ v(C \cap D) &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,C \cap D}(t) \Delta t \\ v(C) &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t) \Delta t \\ v(D) &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,D}(t) \Delta t\end{aligned}$$

Вредностите $v(C \cup D)$, $v(C \cap D)$, $v(C)$ и $v(D)$ се ненегативни затоа што $\lambda > \pi$ и $\exists t \in T, p'_{sc,N}(t) \geq 0$. За да се докаже суперадитивноста на v , треба е да се покаже дека важи неравенството $v(C \cup D) \geq v(C) + v(D)$. Според равенката (3.24), колективната сопствена потрошувачка на вишокот на секоја од овие коалиции е еднаква на:

$$\begin{aligned}p'_{sc,C \cup D}(t) &= \min \left(\sum_{i \in C \cup D} p_{ex,i}(t), \sum_{i \in C \cup D} p_{im,i}(t) \right) \\ p'_{sc,C}(t) &= \min \left(\sum_{i \in C} p_{ex,i}(t), \sum_{i \in C} p_{im,i}(t) \right) \\ p'_{sc,D}(t) &= \min \left(\sum_{i \in D} p_{ex,i}(t), \sum_{i \in D} p_{im,i}(t) \right)\end{aligned}$$

Од $C, D \subseteq (C \cup D)$ следува дека:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in C \cup D} p_{ex,i}(t) &= \sum_{i \in C} p_{ex,i}(t) + \sum_{i \in D} p_{ex,i}(t) \\ \sum_{i \in C \cup D} p_{im,i}(t) &= \sum_{i \in C} p_{im,i}(t) + \sum_{i \in D} p_{im,i}(t) \end{aligned}$$

За прегледност, се воведува поедноставена нотација $\sum_{i \in C} p_{ex,i}(t) = a'$, $\sum_{i \in D} p_{ex,i}(t) = a''$, $\sum_{i \in C} p_{im,i}(t) = b'$, $\sum_{i \in D} p_{im,i}(t) = b''$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in C \cup D} p_{ex,i}(t) &= \sum_{i \in C} p_{ex,i}(t) + \sum_{i \in D} p_{ex,i}(t) \\ \sum_{i \in C \cup D} p_{im,i}(t) &= \sum_{i \in C} p_{im,i}(t) + \sum_{i \in D} p_{im,i}(t) \end{aligned}$$

Треба да се покаже дека важи $\min(a' + a'', b' + b'') \geq \min(a', b') + \min(a'', b'')$. За таа цел ќе бидат анализирани сите можни сценарија.

Нека $\min(a' + a'', b' + b'') = a' + a''$. Ако $\min(a', b') = a'$, $\min(a'', b'') = a''$, следи дека $a' + a'' \geq a' + a''$, што очигледно важи. Ако $\min(a', b') = a'$, $\min(a'', b'') = b''$, следи дека $a' + a'' \geq a' + b''$ важи затоа што $\min(a'', b'') = b''$, т.е. $a'' > b''$. Ако $\min(a', b') = b'$, $\min(a'', b'') = a''$, следи дека $a' + a'' \geq b' + a''$ важи затоа што $\min(a', b') = b'$, т.е. $a' > b'$. Ако $\min(a', b') = b'$, $\min(a'', b'') = b''$, следи дека $a' + a'' \geq b' + b''$ важи затоа што $\min(a', b') = b'$, $\min(a'', b'') = b''$, т.е. $a' > b'$ и $a'' > b''$. По аналогија, истата анализа може да се примени за да се покаже дека $\min(a' + a'', b' + b'') \geq \min(a', b') + \min(a'', b'')$ важи кога $\min(a' + a'', b' + b'') = b' + b''$, од каде што е тривијално да се заклучи дека:

$$v(C \cup D) \geq v(C) + v(D)$$

т.е. дека предложената карактеристична функција $v(N)$ е суперадитивна. Ова својство на карактеристичната функција укажува на тоа дека членовите во заедницата што учествуваат во оваа кооперативна игра имаат придобивка од меѓусебната соработка.

5.3.2 Стабилност

Една коалиција се смета за стабилна кога сите нејзини членови се мотивирани да делуваат кооперативно и да останат дел од таа коалиција. Математички, коалицијата е стабилна доколку јадрото на кооперативната игра во која таа учествува не е празно.

Теорема 2: Јадрото на кооперативната игра базирана на методот на виртуелна нето-наплата (N, v) не е празно ако $\mu \leq \pi \leq \lambda$.

Доказ: За докажување на теорема 2, доволно е да се покаже дека кооперативната игра е балансирана. Според теоремата на Бондарева-Шепли, јадрата на балансираните игри не се празни [40]. Една игра е балансирана доколку постои множеството со тежински фактори $0 \leq \delta_S \leq 1$ за коишто важи дека:

$$\sum_{S \in 2^N : i \in S} \delta_S = 1$$

и коешто го задоволува условот:

$$\sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S) \leq v(N)$$

Во изразот $\sum_{S \in 2^N : i \in S} \delta_S = 1$, ознаката $S \in 2^N : i \in S$ ги претставува сите подмножества на N во коишто се наоѓа членот i . Изразот $\sum_{S \in 2^N : i \in S} \delta_S = 1$ треба да важи за секој член i поединечно. Поаѓајќи од $\sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S) \leq v(N)$ може да се напише:

$$\sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S) = \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S \left((\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,S}(t) \Delta t \right)$$

Нека моќноста $p''_{sc,i}(t)$ е делот од $p'_{sc,S}(t)$ што се припишува на i кој е член на S . Со воведување на замената $p'_{sc,S}(t) = \sum_{i \in S} p''_{sc,i}(t)$, која уште може да се напише како $p'_{sc,S}(t) = \sum_{i \in N} p''_{sc,i}(t)$ затоа што $p''_{sc,i}(t) = 0, \forall i \notin N$, се добива:

$$\begin{aligned} \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S) &= \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S \left((\lambda - \pi) \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} p''_{sc,i}(t) \Delta t \right) \\ &= \sum_{i \in N} \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset : i \in S} \delta_S \left((\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p''_{sc,i}(t) \Delta t \right) \end{aligned}$$

Имајќи предвид дека $\sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset : i \in S} \delta_S = 1$, за изразот $\sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S)$ се добива:

$$\begin{aligned} \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \delta_S v(S) &\leq \sum_{i \in N} \sum_{S \in 2^N \setminus \emptyset : i \in S} \delta_S \left((\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t \right) \\ &= \sum_{i \in N} \left((\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,i}(t) \Delta t \right) \sum_{S \in 2^N \setminus \{\emptyset\} : i \in S} \delta_S \\ &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} p'_{sc,i}(t) \Delta t \\ &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t \\ &= v(N) \end{aligned}$$

што докажува дека предложената кооперативна игра е стабилна.

Следно, анализирани се својствата на правилото на пропорционална распределба базирано на $\alpha_i(t)$.

Теорема 3: Векторот на исплата \mathbf{x} пресметан според правилото на пропорционална распределба $\alpha_i(t)$ секогаш е импутација, а е во јадрото ако $\sum_{t \in T} (p'_{sc,N}(t) \sum_{i \in C} \alpha_i(t)) \geq \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t)$ за секоја $C \subseteq N$.

Доказ: За да се покаже дека векторот \mathbf{x} пресметан според пропорционалниот придонес $\alpha_i(t)$ е импутација, потребно е да се покаже дека ги задоволува условите за:

- 1) $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$ (ефикасност);
- 2) $x_i \geq v(\{i\}), \forall i \in N$ (индивидуална рационалност);

Ефикасноста се покажува на следниот начин:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} x_i &= \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} (\lambda - \pi) p'_{sc,i}(t) \Delta t \\ &= \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} (\lambda - \pi) \alpha_i(t) p'_{sc,N}(t) \Delta t \\ &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} (p'_{sc,N}(t) \Delta t) \sum_{i \in N} \alpha_i(t) \\ &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t \\ &= v(N) \end{aligned}$$

Водејќи сметка дека $v(\{i\}) = 0$, индивидуалната рационалност е задоволена затоа што $(\lambda - \pi) \geq 0$ и $p'_{sc,i}(t) \geq 0$.

Следно, за да се покаже дека векторот \mathbf{x} е во јадрото, треба да се покаже дека важи $\sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \forall C \subseteq N$, кога $\sum_{t \in T} (p'_{sc,N}(t) \sum_{i \in C} \alpha_i(t)) \geq \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t)$. Нека $C \subseteq N$ е произволна коалиција. Воочуваме дека важи:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in C} x_i &= \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} (\lambda - \pi) \alpha_i(t) p'_{sc,N}(t) \Delta t, \\ v(C) &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t) \Delta t. \end{aligned}$$

Нека $\alpha_i(t)$ го претставува пропорционалниот придонес на $i \in N$. Ако важи условот условот $\sum_{t \in T} (p'_{sc,N}(t) \sum_{i \in C} \alpha_i(t)) \geq \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t)$ тогаш се добива:

$$\begin{aligned}\sum_{i \in C} x_i &= \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} (\lambda - \pi) \alpha_i(t) p'_{sc,N}(t) \Delta t \\ &= (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} \left(p'_{sc,N}(t) \sum_{i \in C} \alpha_i(t) \right) \Delta t \\ &\geq (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,C}(t) \Delta t \\ &= v(C)\end{aligned}$$

што покажува дека $\sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \forall C \in N$.

Оваа дискусија на својствата на методот за виртуелна нето-наплата покажува дека тој гарантира ненегативна исплата за секој член според неговиот придонес и дека нуди решенија што ја стабилизираат коалицијата, кога е задоволен одреден услов. Овие својства делумно ја поткрепуваат првата хипотеза на докторската дисертација, затоа што покажуваат дека методот целосно ја распределува колективната придобивка и дека обезбедува ненегативни исплати на членовите на заедницата.

Глава 6

Примена и својства на предложениот метод

Во оваа глава се презентирани резултатите од примената на методот за виртуелна нето-наплата. Низ текстот, акронимот за овој метод е VNB, а истиот произлегува од англискиот термин „*virtual net-billing*“. Спроведената анализа има за цел да ја потврди првата хипотеза на докторската дисертација која е наведена во потточка 1.4, а која гласи: „Еден метод за директно тргување со енергија, наменет за енергетски заедници, е праведен и пресметковно ефикасен доколку ја распределува колективната придобивка на енергетската заедница во реално време, пропорционално на придонесот што секој член го има во создавање на таа придобивка“. Дел од својствата на методот VNB, од аспект на праведност, се аналитички докажани во Глава 5. Во оваа глава, анализите се прават со примена на компјутерски симулации. Во недостаток на реални мерења од енергетски заедници, анализираниите енергетски заедници се хипотетички. Постапката за создавање на една хипотетичка енергетска заедница се состои во комбинирање на потрошувачи-производители од реални податоци за домаќинства со фотоволтаици во Соединетите Американски Држави [151]. За секоја заедница случајно се избира нејзината големината, потрошувачите-производители што се нејзини членови и периодот којшто се анализира. Освен праведноста, анализирано е и времето што е потребно за извршување на пресметките на предложениот метод. За да се добие јасна слика за неговите предности и недостатоци, методот е спореден со пет постоечки методи за директно тргување. Петте избрани методи се презентирани во Глава 4, а нивните акроними се прикажани во Табела 6.1. Од овие пет методи BS, MMR и SDR претставуваат ценовни механизми, додека, SV и MV се методи за распределба на колективната придобивка, базирани на теорија на кооперативни игри. Методот MV е избран за референтен затоа што ги задоволува трите дефиниции за праведност од точка 2.6.

Табела 6.1 Акроними за споредените методи за директно тргување

Акроним	Метод
VNB	Виртуелна нето-наплата
BS	Механизам на делење на колективна сметка
MMR	Механизам на средна цена
SDR	Механизам на количник на понуда и побарувачка
SV	Шеплиева вредност
MV	МинВар

Методите за распределба на колективниот трошок не се земени предвид, затоа што претходни истражувања од други автори покажале дека тие имаат бројни недостатоци [27], [44]. Во рамки на оваа глава, презентирана е следната содржина:

- Опис на базата со податоци која се користи за симулација на предложениот метод.
- Споредба на предложениот метод со останати методи: Анализирани се енергетски заедници со три, пет и десет домаќинства. Во секој од трите примери, методот VNB е спореден со петте постоечки методи од литературата.
- Анализа на праведноста на методот: Анализирани се 600 хипотетички енергетски заедници добиени со случаен избор на домаќинства од базата објавена во [151]. Заедниците имаат помеѓу 2 и 15 членови. За секоја заедница пресметани се исплатите што се добиваат од примената на шесте горенаведени методи. Праведноста на предложениот метод е споредена со праведноста на другите пет методи со помош на три нумерички индикатори.
- Анализа на пресметковна комплексност: За истите 600 хипотетички заедници, направена е споредба на времето што е потребно за пресметка со секој од анализираниите методи за директно тргување.

6.1 Користени податоци за анализа на методот

За верификација на предложениот метод, како и методите кои служат за споредба, при анализата се користени реални мерни податоци од домаќинства со фотоволтаични генератори. Податоците се преземени од веб-порталот на базата „Pecan Street“ и се однесуваат на периодот од јануари до декември 2014 година [151]. Анализираниите 99 домаќинства од оваа база се предмет на истражување и во [143]. Вкупната годишна потрошувачка на електрична енергија на домаќинствата се движи меѓу 4.766 kWh и 33.471 kWh, со средна вредност од 11.417 kWh и стандардна девијација од 5.252 kWh. Најголем дел од домаќинствата трошат меѓу 9.000 и 14.000 kWh, како што е прикажано во Табела 7.2. Фотоволтаичните генератори на домаќинствата значително се разликуваат во однос на нивната ориентација и номинален капацитет [143]. Затоа, вкупното годишно производство на електрична енергија се движи од 550 kWh од 12.714 kWh, но најчесто изнесува меѓу 6.500 kWh и 8.500 kWh.

Табела 6.2 Сумарни статистички податоци за домаќинствата од базата „Pecan Street“

	Потрошувачка (kWh)	Производство (kWh)
Средна вредност	11.417	7.306
Минимална вредност	4.766	549
Максимална вредност	33.471	12.714
Стандардна девијација	5.252	1.871

Од базата со податоци, по случаен избор се формираат енергетски заедници со однапред определен број домаќинства и така формираните енергетски заедници се користат за примена на методот и анализа на неговите карактеристики. Притоа, предложениот метод спроведува неколку операции за секој дискретен временски интервал. Поради тоа, пропорционално на димензијата и составот на заедницата, расте и пресметковното време. За да може да се симулираат голем број енергетски заедници, во разумен временски период, направени се две поедноставувања. Прво, избрано е да се симулираат енергетски заедници без батерии. Ако во симулациите се земат предвид и батерии, потребно е подолго време за извршување на пресметките, особено ако се користи оптимизациска управувачка стратегија за полнењето и празнењето на батеријата. Отстранувањето на батериите од симулацијата пак, не влијае суштински врз заклучоците од анализата, а значително ги забрзува пресметките. Второ, резолуцијата на временските дијаграми е намалена, па наместо временски чекор од 1 минута, временските дијаграми се базираат на средната активна моќност за секои 15 минути. Податоците за цените на електрична енергија се преземени од [143] и отсликуваат реални цени во државата Тексас во САД. Цената на енергијата што се презема од мрежата е еднаква на $\lambda = 8 \text{ US}\$ \text{ kWh}^{-1}$, додека цената за енергијата што се предава на мрежата е еднаква на $\mu = 3.6 \text{ US}\$ \text{ kWh}^{-1}$. Се смета дека цените важат за секој потрошувач-производител, независно дали станува збор за едно домаќинство или за енергетска заедница.

6.2 Споредба на методот со пет методи од литературата

Оваа потточка ги прикажува резултатите добиени од споредбата на предложениот метод со петте постоечки методи. Разгледани се примери за хипотетички енергетски заедници со три, пет и десет члена.

6.2.1 Енергетска заедница со три члена

Нека се анализира истата енергетска заедница која што беше дискутирана во потточка 5.2. За оваа заедница, разгледани се шест сценарија. Во секое сценарио се користи еден од горенаведените методи за директно тргување, за времетраење од еден месец. Исплатите на членовите на крајот од месецот се прикажани во Табела 6.3, додека енергетските биланси се прикажани во Табела 6.4.

Табела 6.3 Исплати на членовите на заедницата пресметани со шесте методи за директно тргување изразени во US\$ ($n = 3$)

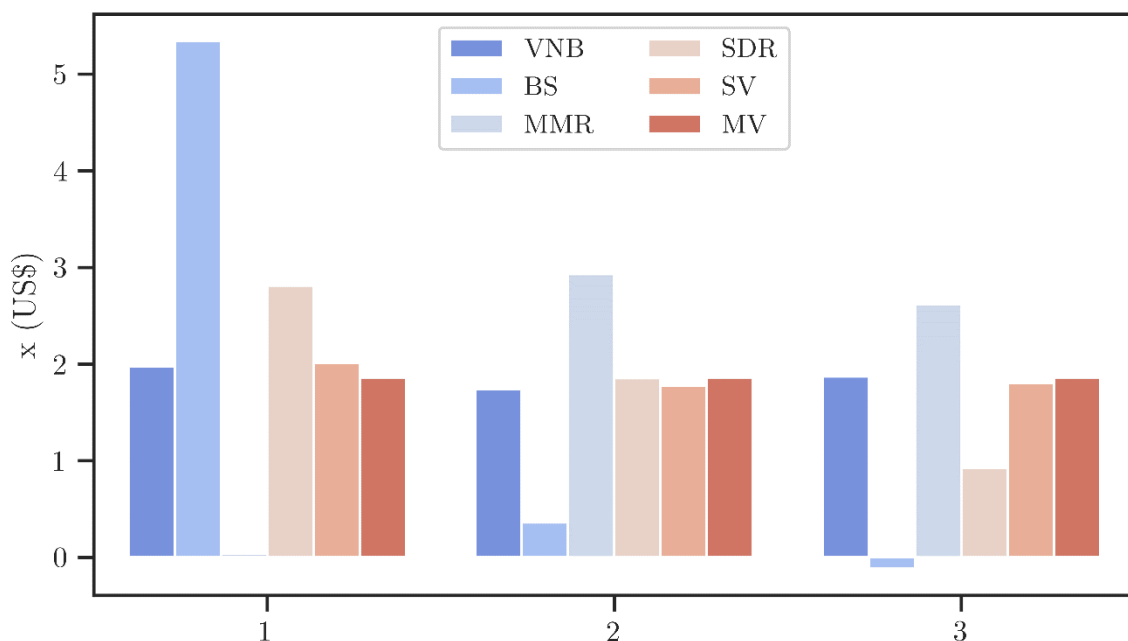
	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
x_1	1,976	5,347	0,041	2,812	2,012	1,863
x_2	1,741	0,361	2,931	1,855	1,777	1,863
x_3	1,872	-0,119	2,617	0,922	1,800	1,863
$v(N)$	5,589	5,589	5,589	5,589	5,589	5,589
Во јадрото	Да	Не	Не	Да	Да	Да

Колективната придобивка на заедницата $v(N)$ е збир на елементите на векторот x . Без разлика на методот кој се анализира, колективната придобивка секогаш е еднаква и во случајов изнесува \$5,589. Тоа значи дека методите не се разликуваат во однос на нивната способност да создадат придобивка, како што беше покажано во 5.3, затоа што придобивката што ја генерираат произлегува од сопствената потрошувачка на вишокот енергија $E'_{sc,N}$. За конкретната заедница, таа е еднаква на $E'_{sc,N} = 127,030$ kWh.

Табела 6.4 Енергетски биланс на анализираната заедница ($n = 3$)

E_l (kWh)	E_g (kWh)	E_{im} (kWh)	E_{ex} (kWh)	$E_{sc,N}$ (kWh)	$E'_{sc,N}$ (kWh)	$E_{sc,i,N}$ (kWh)
3679,497	2095,780	2208,728	625,010	1470,769	127,030	1343,739

Од друга страна, анализираните методи за директно тргување видно се разликуваат во начинот на кој ја распределуваат таа придобивка меѓу членовите на заедницата, како што може да се види на Слика 6.1. Најмалку рамномерна распределба на колективната придобивка нудат методите BS и MMR. Овие два методи не ја стабилизираат коалицијата, затоа што векторот на исплата пресметан со нив не е во јадрото на кооперативната игра. Се воочува уште дека методот BS му припишува негативна исплата на третиот член на заедницата, што означува финансиска загуба споредено со случајот кога тој делува индивидуално. Од друга страна, предложениот метод VNB нуди доста рамномерна распределба на исплатата, слично како методите базирани на теорија на кооперативни игри, SV и MV.

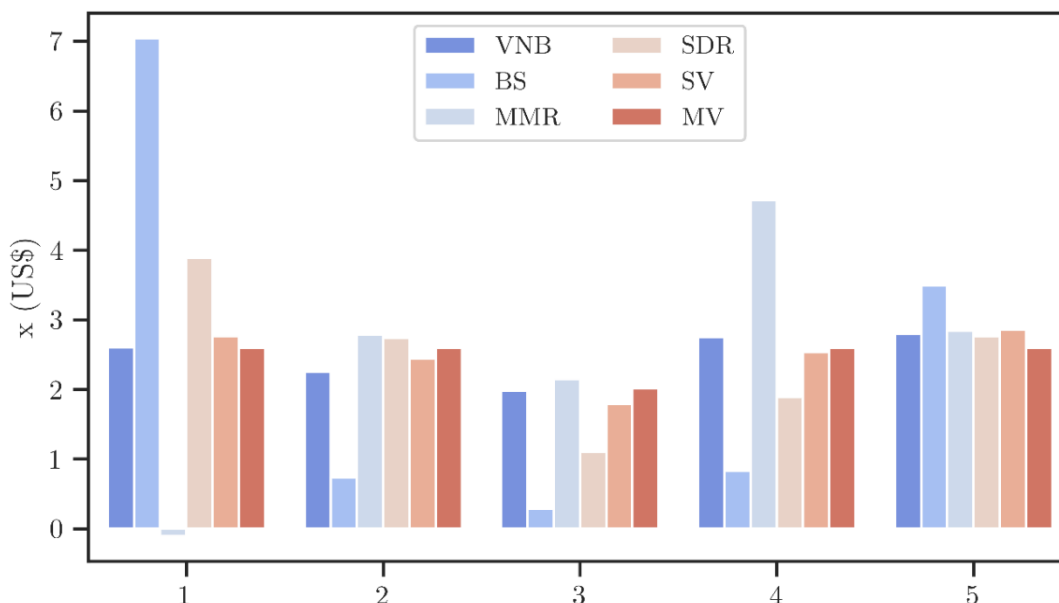
Слика 6.1. Графички приказ на исплатите на членовите од енергетската заедница ($n = 3$)

6.2.2 Енергетска заедница со пет члена

На трите члена од претходната заедница се додаваат уште два члена, така што заедницата се состои од пет потрошувачи-производители. Притоа, во новата заедница, исплата на членовите може да се подобри или да се влоши, во зависност од методот што се користи. Распределбата на колективната придобивка $v(N)$ постигната со секој од методите за директно тргување е прикажана во Табела 6.5, а енергетскиот биланс на заедницата е прикажан во Табела 6.6. Резултатите покажуваат дека, во случајов, само предложениот метод VNB и методите SV и MV ја подобруваат состојбата на сите членови во споредба со претходно. Со други зборови, овие методи нудат решенија што се во јадрото на кооперативната игра. Методите BS, MMR и SDR, од друга страна, не нудат решенија што се во јадрото на кооперативната игра. Се забележува уште дека методот MMR на првиот член од заедницата му припишува негативна исплата.

Табела 6.5 Исплати на членовите на заедницата пресметани со шесте методи за директно тргување изразена во US\$ ($n = 5$)

	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
x_1	2,605	7,047	-0,111	3,893	2,768	2,593
x_2	2,254	0,732	2,788	2,741	2,446	2,593
x_3	1,979	0,283	2,150	1,102	1,788	2,017
x_4	2,751	0,834	4,720	1,892	2,534	2,593
x_5	2,800	3,492	2,843	2,761	2,854	2,593
$v(N)$	12,389	12,389	12,389	12,389	12,389	12,389
Во јадрото	Да	Не	Не	Не	Да	Да



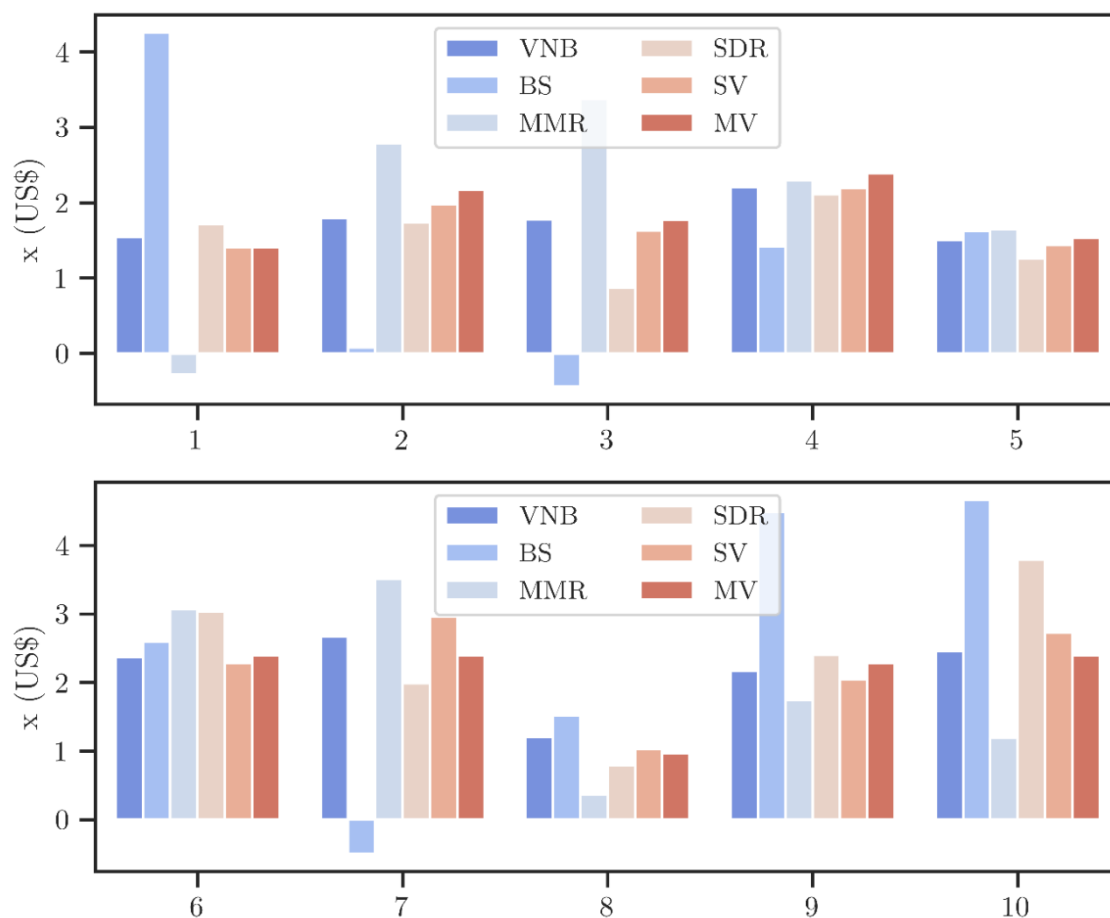
Слика 6.2. Графички приказ на исплатите на членовите од енергетската заедница ($n = 5$)

Табела 6.6 Енергетски биланс на анализираната заедница ($n = 5$)

E_l (kWh)	E_g (kWh)	E_{im} (kWh)	E_{ex} (kWh)	$E_{sc,N}$ (kWh)	$E'_{sc,N}$ (kWh)	$E_{sc,i,N}$ (kWh)
6154,167	3650,965	3740,066	1236,865	2414,100	281,567	2132,533

6.2.3 Енергетска заедница со десет члена

Како што бројот на членови во заедницата се зголемува, така станува сè потешко да се обезбеди распределба на колективната придобивка $v(N)$ што е во јадрото на кооперативната игра. Тоа го покажуваат резултатите од анализата на заедница составена од 10 члена, која што е добиена со додавање на 5 нови члена на заедницата од претходната потточка, прикажани на Слика 6.3. Од Табела 6.7 се забележува дека освен референтниот метод MV, ниту еден од другите методи, вклучително и предложениот VNB, не нуди решение што е во јадрото на кооперативната игра. Притоа, BS и MMR резултираат во негативни исплати, а VNB, SDR и SV не го задоволуваат условот на групна рационалност.

Слика 6.3. Графички приказ на исплатите на членовите од заедницата ($n = 10$)

Тоа значи дека меѓу десетте членови на заедницата, постои таква подгрупа што би имала поголема колективна заштеда доколку се отцепи од заедницата. Иако овој услов теоретски ја доведува во прашање стабилноста на коалицијата, во следната потточка ќе биде покажано дека дополнителната придобивка на таа заедница е толку мала, што е практично занемарлива. Од друга страна, од резултатите во Табела 6.7 јасно се забележува дека предложениот метод VNB има приближни исплати како и референтниот метод MV, т.е. дека векторот на исплата x_{VNB} е приближно еднаков на векторот на исплата x_{MV} .

Табела 6.7 Исплати на членовите на заедницата пресметани со шесте методи изразени во US\$ ($n = 10$)

	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
x_1	1,543	4,257	-0,278	1,717	1,406	1,406
x_2	1,800	0,081	2,784	1,735	1,983	2,171
x_3	1,779	-0,440	3,375	0,874	1,630	1,776
x_4	2,206	1,422	2,299	2,110	2,192	2,394
x_5	1,506	1,622	1,645	1,259	1,438	1,538
x_6	2,371	2,598	3,069	3,037	2,288	2,394
x_7	2,672	-0,500	3,516	1,990	2,967	2,394
x_8	1,207	1,522	0,366	0,794	1,029	0,965
x_9	2,169	4,486	1,741	2,403	2,050	2,280
x_{10}	2,459	4,665	1,197	3,794	2,730	2,394
$v(N)$	19,713	19,713	19,713	19,713	19,713	19,713
Во јадрото	Не	Не	Не	Не	Не	Да

6.3 Праведност на методот

Како што претходно беше дискутирано, методите што нудат решение кое што е во јадрото на кооперативната игра секогаш се праведни, додека методите што предизвикуваат финансиска загуба за некој член секогаш се неправедни. Меѓутоа, постојат и такви случаи, како во примерот на десетчлената заедница, кога векторот на исплата x не е во јадрото на кооперативната игра, ниту пак има негативна исплата. За тие случаи, векторот на исплата x не задоволува групна рационалност, па потребно е да се истражат два аспекта:

- колкаво е максималното незадоволство што се појавува во заедницата (од големината на тоа незадоволство ќе зависи праведноста), и
- колку векторот на исплата x се поклопува, т.е. колку е сличен, со референтниот вектор x_{MV} пресметан со методот MV.

Во таа смисла, методот VNB е анализиран со помош на три нумерички индикатори: Џејновиот индекс J [141], индексот на праведност F [51] и максималниот вишок [44]. Џејновиот индекс J и индексот за праведност F покажуваат колку решението добиено

со VNB е слично на решението добиено со референтниот метод MV. Од друга страна, максималниот вишок $\bar{\varepsilon}(C, \mathbf{x})$ го квантифицира максималното незадоволство на најмалку задоволната подгрупа во коалицијата.

Џејновиот индекс J (анг. *Jain's index*) формално е дефиниран како во [141]:

$$J = \frac{\left[\sum_{i \in N} q_i \right]^2}{n \sum_{i \in N} q_i^2} \quad (6.1)$$

каде што $q_i = x_i / x_{MV,i}$. Согласно равенката (6.1) една распределба на колективната придобивка е праведна кога $J = 1$. Џејновиот индекс J го квантифицира поклопувањето на двата споредени вектори, а ги поседува следните својства: независност од големина на популација, независност од мерна големина и скала, ограниченост на интервал $0 \leq J \leq 1$ и непрекинатост.

Индексот на праведност F , предложен во [51], го пресметува растојанието помеѓу нормализираниот вектор на исплатата \mathbf{x} и нормализираниот вектор добиен со методот MV:

$$F = \sum_{i \in N} \left| \frac{x_i}{\sum_{k \in N} x_k} - \frac{x_{MV,i}}{\sum_{k \in N} x_{MV,k}} \right| \quad (6.2)$$

Индексот на праведност F има вредности во опсегот $0 \leq F \leq 2$ ако $x_i, x_{MV,i} \geq 0$, а во спротивно тој нема горна граница, како што е покажано во [51]. Кога исплатата е праведна, вредноста на индексот на праведност изнесува $F = 0$.

Вишокот што го има една коалиција $C \subseteq N$ се пресметува според релацијата:

$$\varepsilon(C, \mathbf{x}) = v(C) - \sum_{i \in C} x_i, \forall C \subseteq N$$

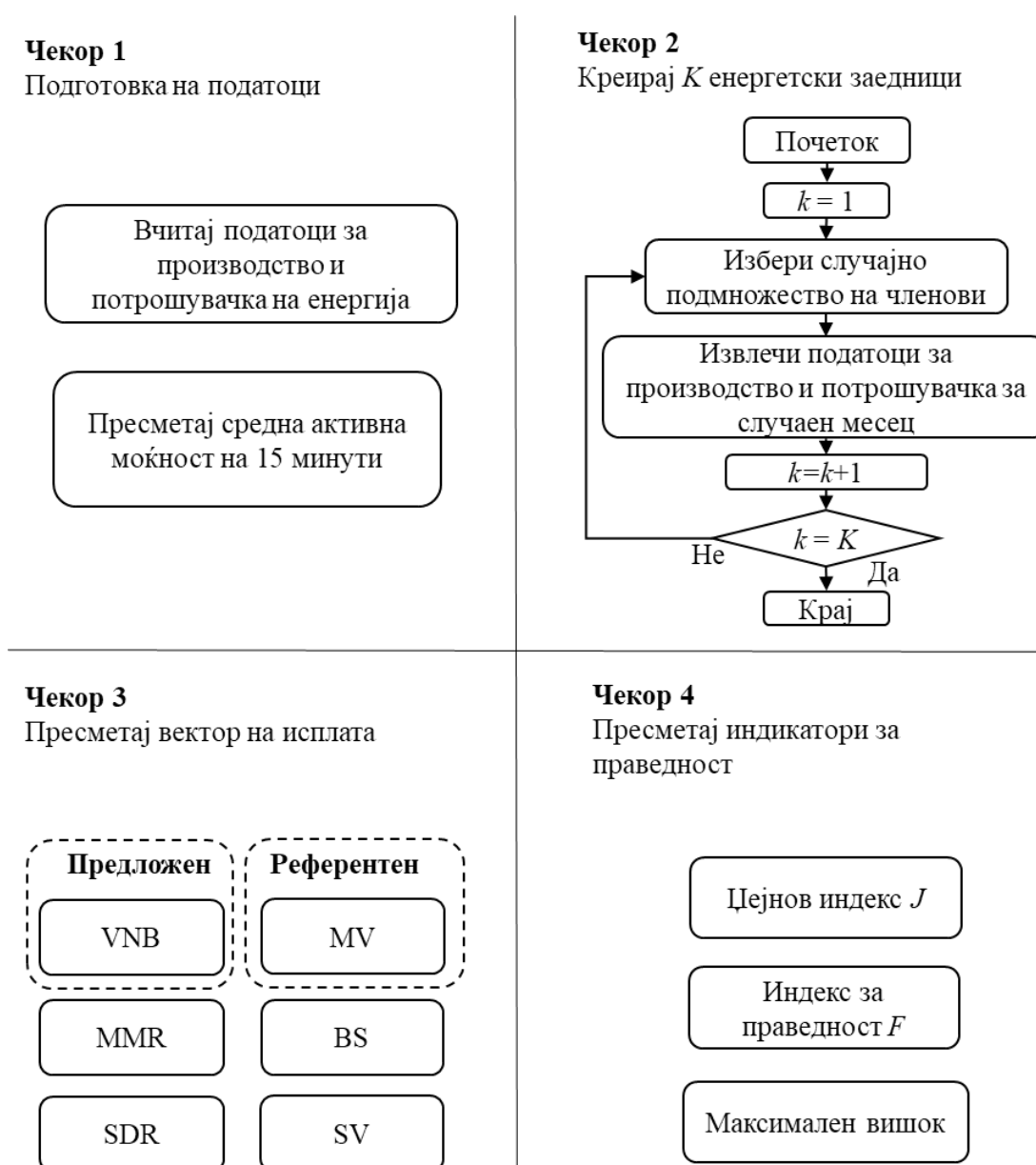
Оваа вредност укажува на вкупното незадоволство, во смисла на опортунитетни финансиски трошоци, на коалицијата C [44]. За да се одреди максималниот вишок, изразот за пресметка на $\varepsilon(C, \mathbf{x})$ се применува за секој член на партитивното множество на N . Оттука, максималното незадоволство што може да се појави кај некоја коалиција $C \subseteq N$ се означува со:

$$\bar{\varepsilon}(C, \mathbf{x}) = \max \varepsilon(C, \mathbf{x}), \forall C \subseteq N \quad (6.3)$$

Доколку максималниот вишок $\bar{\varepsilon}(C, \mathbf{x})$ е помал или еднаков на нула, тогаш векторот на исплата \mathbf{x} е во јадрото на кооперативната игра и делува стабилизирачки врз коалицијата. Доколку пак максималниот вишок $\bar{\varepsilon}(C, \mathbf{x})$ е поголем од нула, тогаш коалицијата C може да си ја подобри својата позиција доколку се отцепи од главната коалиција N .

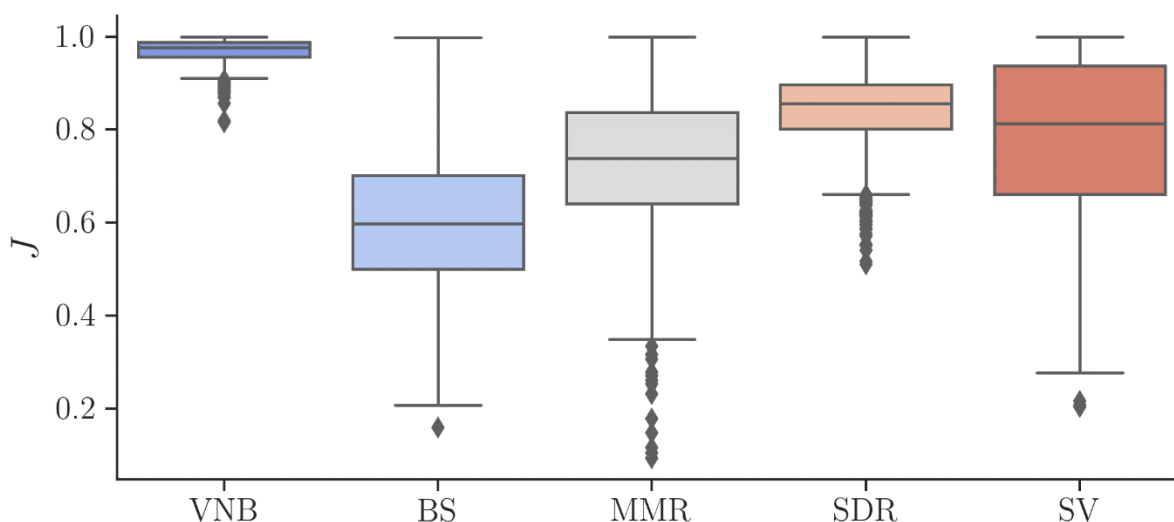
6.3.1 Статистичка анализа на голем број енергетски заедници

За да се добијат генерализирани заклучоци за однесувањето за VNB и останатите пет методи, анализирани се 600 хипотетички енергетски заедници. Формирањето на секоја заедница е спроведено, со случаен избор на домаќинства со фотоволтаици од базата „Pescan Street“. Притоа, дијаграмите на производство и потрошувачка за секое домаќинство се сведени на 15-минутни интервали. За така формираната заедница, анализирани се шест сценарија, секое со по еден метод за директно тргување. Врз основа на пресметаните вектори на исплата, пресметани се сумарни статистички информации за вредностите на индикаторите. Графички приказ на преземените чекори во анализата е даден на Слика 6.4.



Слика 6.4. Приказ на чекорите во анализата

Резултатите од анализата на Џејновиот индекс J се прикажани на Слика 6.5. Користејќи го MV како референтен метод, вредности на J се пресметани за VNB, BS, MMR, SDR и SV. Висока вредност за J укажува на сличност меѓу MV и анализираниот метод. Кај енергетски заедници со два члена, методот VNB има вредност $J = 1$, што значи дека нуди решение што е идентично со референтниот метод MV. Во просек, за сите анализирани заедници, методот VNB има највисока вредност на J , која е еднаква на $J = 0,968$. Оваа вредност е 15,660-61,400% повисока во споредба со вредноста на J пресметана со BS, MMR, SDR и SV. Меѓу тие четири методи, BS има најниска вредност ($J = 0,600$), а SDR нуди највисока вредност ($J = 0,837$) за овој индекс.



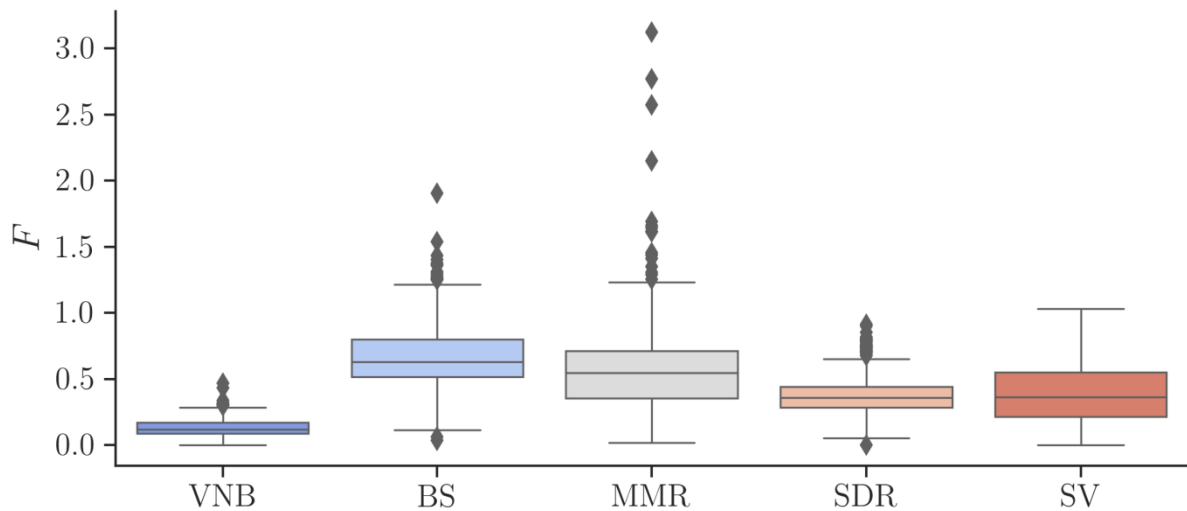
Слика 6.5. Вредности за Џејновиот индекс J добиени од анализата на 600 енергетски заедници

Слични резултати можат да се забележат и од анализата на индексот за праведност F , која е прикажана на Слика 6.6. Вредностите на F потврдуваат дека методот VNB нуди најслични решенија со решенијата на методот MV, затоа што резултира во најниски вредности за F . Освен овој заклучок, F дава корисни информации и за останатите методи за директно тргување. Така, од Слика 6.6 се гледа дека, кај некои енергетски заедници, методот MMR резултира во вредност $F > 2$.

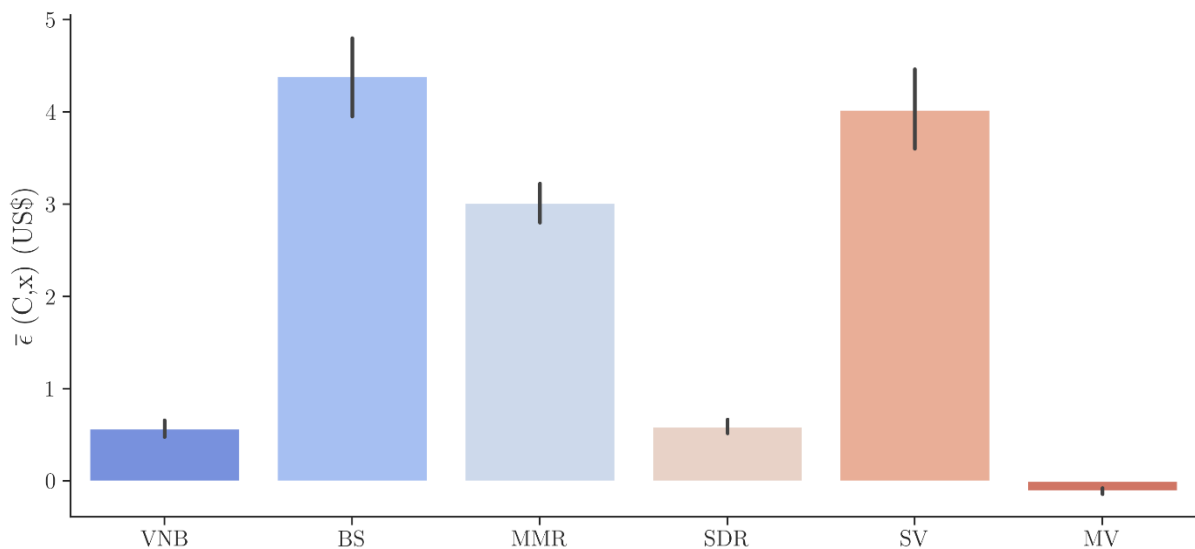
Како што е дискутирано во [51], ограниченоста на овој индекс $0 \leq F \leq 2$ важи кога $x_i, x_{MV,i} \geq 0$. Во случајов, вредност за F што е поголема од 2 покажува дека постои енергетска заедница кај која еден од векторите \mathbf{x}_{MMR} или \mathbf{x}_{MV} има негативна исплата. Со оглед на тоа што векторот на исплата од методот MV е секогаш позитивен $\mathbf{x}_{MV} > 0$, се заклучува дека вредностите $F > 2$ се добиваат поради негативни исплати во векторот \mathbf{x}_{MMR} .

Од трите индикатори, најнезависна, но и најригорозна мерка за праведноста на еден метод дава максималниот вишок. Резултатите за просечната вредност на максималниот вишок се прикажани на Слика 6.7. Се забележува дека, во просек, максималниот вишок

е негативен само кога се користи референтниот метод MV ($\bar{\epsilon}(C, \mathbf{x}_{MV}) = -11US\phi$). Меѓутоа, во практични услови, применливоста на MV е ограничена поради неговата голема пресметковна комплексност. Меѓу останатите методи, предложениот метод VNB има негативен максимален вишок во 28% од случаите, додека BS, MMR, SDR и SV имаат негативен вишок 10%, 9%, 23% и 16% од случаите. Тоа значи дека предложениот метод почесто нуди исплата што е во јадрото на кооперативната игра.



Слика 6.6. Вредности на индексот за праведност F добиени при анализа на 600 заедници



Слика 6.7. Вредности на максималниот вишок добиени при анализа на 600 заедници

Предностите на VNB, од аспект на праведност, се гледаат и преку просечната вредност на максимален вишок. VNB има најнизок просечен максимален вишок, еднаков на 56 US¢. Од друга страна, максималниот вишок на методите BS, MMR, SDR и SV, е еднаков на 438 US¢, 302 US¢, 59 US¢ и 402 US¢, соодветно.

6.4 Пресметковна ефикасност на методот

Пресметковната ефикасност е вториот значаен параметар од којшто зависи практичноста на еден метод за директно тргување. Времето што е потребно за извршување на пресметките со секој од методите за директно тргување е дадено во Табела 6.8. Овие резултати се добиени на компјутер со i7-6500U процесор со 2.5GHz и RAM меморија од 8 GB, со код што е имплементиран во Пајтон 3.6.

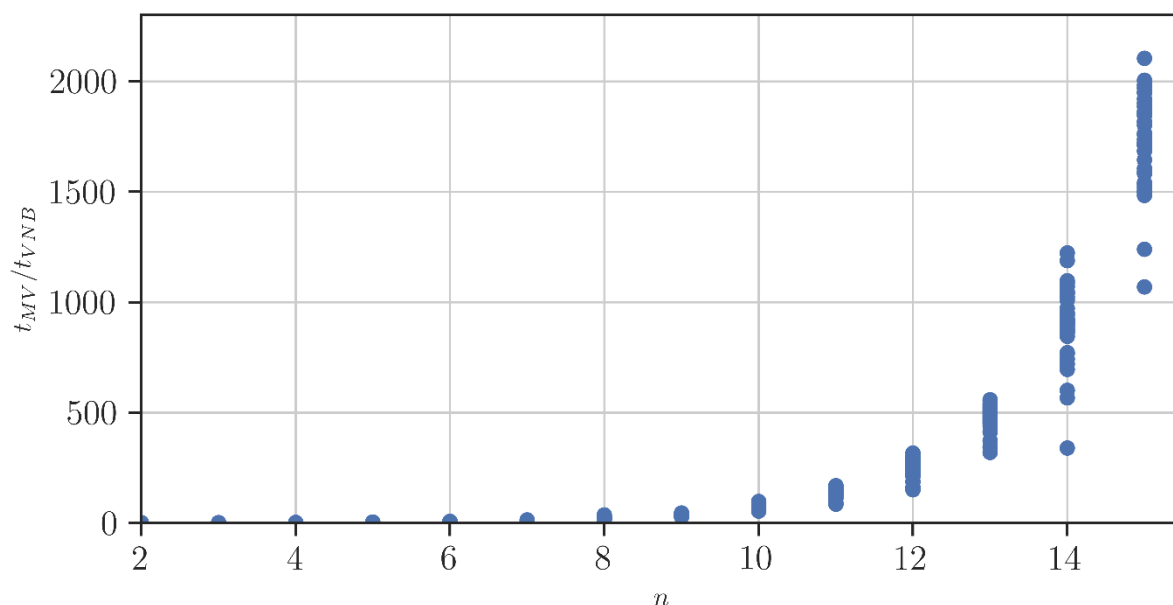
Во просек, методот VNB е за 0,21 секунди побавен од BS, 0,09 секунди побавен од MMR и 0,1 секунда побавен од SDR. Сепак, времето што е потребно за извршување на пресметките на VNB, BS, MMR или SDR не надминува една секунда. Истовремено, BS, MMR и SDR нудат помала праведност од предложениот метод VNB. Имајќи го предвид тоа, намалената брзина на VNB во однос на BS, MMR и SDR е занемарлива во споредба со предноста што ја нуди од аспект на праведност. Од друга страна, пресметките на методот VNB траат значително пократко од пресметките на методите базирани на теорија на кооперативни игри (SV и MV). За енергетска заедница со 15 члена, на предложениот метод VNB му се потребни просечно 0,445 секунди за да ги изврши пресметките, додека на методите SV и MV им се потребни меѓу 10 и 15 минути. Со секој нов член додаден во заедницата, времетраењето на пресметките на референтниот метод MV се удвојува. Тоа не е случај за предложениот метод VNB. Ова се воочува и од Табела 6.9, каде што се прикажани просечните времиња за пресметка од сите методи, категоризирани по бројот на членови во заедницата. Подобрувањето што VNB ги нуди во споредба со референтниот MV е прикажано на Слика 6.8, каде со t_{MV} и t_{VNB} се означени времињата за MV и VNB, соодветно. Сликата покажува дека за заедница со 15 члена, VNB ги забрзува пресметките за околу 1000-2100 пати.

Табела 6.8 Сумарни статистички податоци за потребно пресметковно време (секунди)

	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
Средна вредност	0,240	0,030	0,150	0,140	100,790	102,060
Максимална вредност	0,870	0,110	0,490	0,550	1138,680	1147,570
Минимална вредност	0,060	0,020	0,050	0,040	0,040	0,090
Стандардна девијација	0,130	0,010	0,070	0,070	218,200	220,930

Табела 6.9 Просечни времиња за пресметка по број на членови во заедница (секунди)

n	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
2	0,070	0,026	0,060	0,057	0,052	0,103
3	0,123	0,030	0,093	0,091	0,139	0,189
4	0,110	0,026	0,084	0,081	0,231	0,279
5	0,129	0,027	0,094	0,090	0,487	0,538
6	0,146	0,026	0,104	0,093	1,012	1,066
7	0,173	0,026	0,115	0,107	2,122	2,184
8	0,205	0,029	0,131	0,112	4,522	4,603
9	0,231	0,033	0,146	0,124	9,114	9,236
10	0,272	0,034	0,162	0,149	19,621	19,878
11	0,319	0,039	0,182	0,180	42,517	43,014
12	0,363	0,040	0,202	0,218	89,288	90,299
13	0,386	0,038	0,213	0,214	177,961	180,097
14	0,394	0,038	0,217	0,215	349,890	354,111
15	0,455	0,040	0,266	0,252	761,713	771,324



Слика 6.8. Забрзување на пресметки на VNB во споредба со MV

6.5 Дискусија на резултатите

За да се избегне слободно толкување на терминот „праведност“, при дискусија на резултатите земени се предвид трите дефиниции презентирани во Глава 2 за Меритократска индивидуална рационалност, Минимизирана нееднаквост и Коалициона стабилност.

Првата дефиниција подразбира праведност базирана на пропорционалност, согласно Аристотеловата идеја [136] и Хомансовата теорија за праведност [138]. Методот VNB целосно е во склад со оваа дефиниција, затоа што (1) гарантира исполнетост на условот за индивидуална рационалност и (2) пресметува исплати што се пропорционални со индивидуалниот придонес на членовите во создавањето на колективната придобивка. Овие својства произлегуваат од математичката формулација на предложениот метод, а се потврдуваат и со нумеричките резултати.

Втората дефиниција ја третира праведноста како состојба на минимална нееднаквост меѓу членовите во заедницата. Математички, ова својство не е вградено во формулацијата на методот VNB, како што е на пример вградено во формулација на методот MV. Според тоа, би се очекувало дека VNB нема секогаш да ја минимизира нееднаквоста меѓу членовите на заедницата. На пример, ако во заедницата има еден член што секогаш предава моќност на мрежата, а дваесет члена што секогаш преземаат моќност од мрежата, ќе постои голема нееднаквост во распределбата на колективната придобивката. Меѓутоа, поради стохастичката природа на потрошувачката на електрична енергија и варијабилноста на производството од фотоволтаичните генератори, кога VNB се применува кај домаќинства ваквите примери ретко се остваруваат во пракса. Тоа се покажува и со компјутерските симулации, од вредностите на Џејновиот индекс J и индексот за праведност F . Преку анализата на 600 енергетски заедници се воочува дека векторот на исплата на VNB во голема мера се поклопува со векторот на исплата од MV. Затоа што методот MV цели кон што порамномерна распределба, се заклучува дека и VNB постигнува слична цел. Иако не е основна намена на VNB, оваа последица се појавува како резултат на стохастичната природа на производството и потрошувачка во домаќинствата. Според тоа, може да се заклучи дека VNB ја задоволува и втората дефиниција.

Третата дефиниција се заснова на теоријата на кооперативни игри и таа е математички најригорозна. Според неа, еден метод е праведен ако нуди вектор на исплата што е во јадрото на кооперативната игра, т.е. вектор на исплата што ги задоволува условите на ефикасност, индивидуална и групна рационалност. Од трите услови, условот за групна рационалност најтешко се задоволува. Резултатите покажуваат дека референтниот метод MV е единствениот метод којшто секогаш го задоволува овој услов. Од методите што не гарантираат задоволеност на условот за групна рационалност, VNB нуди најголема праведност. Тоа се покажува преку (1) вредноста на максималниот вишок и (2) процентот на случаи во кои методот VNB го задоволува условот за групна рационалност, прикажани на Слика 6.7. Во споредба со сите останати методи, VNB најчесто го задоволува условот за групна рационалност и тоа во 28% од случаите. Кога овој услов не е задоволен, просечниот максимален вишок на методот е понизок од тој на останатите методи и во просек изнесува околу 0,56 US\$, како што е прикажано на Слика 6.7.

Иако главниот фокус на резултатите е ставен на економските придобивки, вреди да се повтори дека придобивките што ги ужива една заедница не се само економски, туку

се и социјални и еколошки [2], [59]. Во таа смисла, останува на членовите на заедницата да одредат дали условот за групна рационалност, кој покрива само еден аспект од концептот на праведност, е неопходен за еден метод да се смета за праведен. Дискусијата потребна за одговарање на тоа прашање не е во фокусот на оваа дисертација и останува отворена за истражувачите од областа на општествени науки.

Во Табела 6.10 е дадена споредбена анализа на методите од аспект на праведност и пресметковна комплексност. Очигледно, BS и MMR не може да се сметаат за праведни, затоа што не гарантираат индивидуална рационалност, не гарантираат рамномерна исплата ниту пак исплата што е во јадрото на кооперативната игра. Овој заклучок е спротивен на тврдењето од [152], каде авторите велат дека MMR нуди исплата што е во јадрото на кооперативната игра. Разликата меѓу резултатите на [152] и резултатите добиени во оваа дисертација има два корени. Од една страна, таа се должи за различната математичка формулација на MMR која е применета во [152] (базирана на произведена и потрошената енергија, а не на енергијата разменета со мрежата). Од друга страна, таа се должи на тоа што авторите на [152] се повикуваат на доказ од друг труд, кој не е директно применлив за MMR.

За разлика од методите BS и MMR, методот SDR гарантира индивидуална рационалност и се пресметува согласно заслугата на секој член. Затоа, овој метод ја задоволува првата дефиниција за праведност. Од друга страна, исплатите на SDR не се особено рамномерни и не се во јадрото на кооперативната игра, па методот SDR не ги задоволува втората и третата дефиниција за праведност. Овој заклучок е добро дополнување на истражувањето презентирани во [44]. Поточно, авторите на [44] нудат детален преглед на девет различни методи и ги дискутираат нивните предности и недостатоци, но, притоа не го земаат предвид методот SDR. Се проценува дека меѓу методите што ги анализираат, методот SDR ќе има најдобри резултати, после теоретски праведните методи.

SV е метод кој најексплицитно ја отелотворува првата дефиниција, затоа што пресметува исплата за секој член според неговиот просечен придонес во сите заедници во коишто може да се најде. Споредено со VNB и SDR, SV нуди најмала сличност со MV. Оттука се заклучува дека SV не гарантира рамномерност на исплатата и не ја задоволува втората дефиниција. Од резултатите уште се забележува дека, SV не гарантира исплата што е во јадрото на кооперативната игра, затоа што кооперативната игра не е конвексна. Затоа, овој метод не ја задоволува ни третата дефиниција. Како што претходно беше наведено, само методот MV ги задоволува сите три дефиниции. Меѓутоа, MV е практично најмалку применлив поради долгото време потребно за неговите пресметки. Ако се направи екстраполација на резултатите прикажани во Табела 6.9, на MV ќе му бидат потребни околу 6 часа за да го пресмета векторот на исплата во заедница со 20 члена, а околу 7000 часа за заедница со 30 члена.

Табела 6.10 Споредбена анализа на методите за директно тргување од аспект на праведност и пресметковна комплексност

	VNB	BS	MMR	SDR	SV	MV
Мерит. индивид. рационалност	✓	×	×	✓	✓	✓
Минимизирана нееднаквост	✓	×	×	×	×	✓
Коалициона стабилност	×	×	×	×	×	✓
Мало време за пресметки	✓	✓	✓	✓	×	×

Поради тоа, разумно е да се бараат соодветни алтернативи за овој метод и останатите слични методи, како што е нуклеолусот. Резултатите покажуваат дека методот VNB, што е предложен во оваа дисертација, е соодветна замена, затоа што, во споредба со останатите методи, тој нуди најмал компромис меѓу пресметковната ефикасност и праведноста. Оваа дискусијата и резултатите од оваа глава ја поткрепуваат првата хипотеза поставена во дисертацијата.

Глава 7

Анализа на билансите на моќност на потрошувачи-производители и енергетски заедници

Предложениот метод во Глава 5 се базира на билансите на моќност во заедницата. Придобивката за енергетската заедница што ја создава предложениот метод е пропорционална со сопствената потрошувачка. Имајќи го тоа предвид, со цел подобро да се разбере степенот на таа придобивка, спроведена е статистичка анализа на билансите на моќност на голем број енергетски заедници и членовите во неа. Потоа, за овие заедници, пресметани се низа технички индикатори, меѓу кои што е и стапката на сопствена потрошувачка SCR. Оттука, развиени се неколку статистички модели за апроксимирање на стапката на сопствена потрошувачка SCR и тоа на ниво на индивидуални потрошувачи-производители и на ниво на енергетски заедници. Од аспект на колективно директно тргување со енергија, вредноста на SCR е важна затоа што дава информација (1) за делот од енергијата произведена од фотоволтаичниот генератор што локално се троши и (2) за делот од енергијата што се предава на мрежата. Тоа ја прави корисна за пресметување на заштедите на сметката на електрична енергија, но и за проценка на количината на енергија што еден потрошувач-производител ја предава на мрежата.

Во таа смисла, резултатите презентирани во продолжение треба да бидат придонес на оваа дисертација и да ја потврдат втората хипотеза поставена во потточка 1.4: „Постои статистички значителна корелација помеѓу стапката на сопствена потрошувачка (SCR) и односот меѓу произведената и потрошената електрична енергија (GTDR) на ниво на индивидуален потрошувач-производител и на ниво на енергетска заедница“. Резултатите се добиени во три чекора:

- **Чекор 1:** Имплементација на математичкиот апарат од Глава 3 во програмските јазици Пајтон 3.6 (анг. *Python 3.6*) и Матлаб 2015а. (анг. *Matlab 2015a*). Извршувањето на анализите со овој програмски код дава комплетна слика за моќноста на производство, моќноста на потрошувачка, моќноста што е разменета со мрежата и моќностите на полнење или празнење на батеријата, доколку потрошувачот-производител поседува батерија.
- **Чекор 2:** Пресметка и статистичка анализа на вредностите на техничките индикатори SCR, SSR, LOLP, f и GTDR.

- **Чекор 3:** Апроксимација на сопствената потрошувачка на индивидуално и колективно ниво.

Резултатите ги идентификуваат факторите што ја зголемуваат сопствената потрошувачка и влијаат врз намалување на трошоците за електрична енергија на членовите на заедницата.

7.1 Користени податоци во статистичката анализа

Во анализата спроведена во оваа глава, користени се податоци од базата „Pescan Street“ [151] (кои беа користени и во Глава 6) и податоци од базата Smart PV, која содржи временски серии за производство и потрошувачка на домаќинства со фотоволтаични генератори лоцирани во Кипар [153]. Втората база на податоци е воведена со цел да се провери генералноста на заклучоците. Збирните статистички податоци за производството и потрошувачката на електрична енергија во домаќинствата од базата „Smart PV“ се дадени во Табела 7.1.

Табела 7.1 Сумарни статистички податоци за домаќинствата од базата „Smart PV“

	Потрошувачка (kWh)	Производство (kWh)
Средна вредност	7.179	4.661
Минимална вредност	4.729	3.840
Максимална вредност	15.426	5.272
Стандардна девијација	2.169	332

Потрошувачката на електрична енергија на годишно ниво се движи меѓу 4.729 kWh и 15.426 kWh, со просечната потрошувачка од 7.179 kWh и стандардна девијација од 2.169 kWh. Просечната потрошувачка на анализираните домаќинства е повисока од просечната потрошувачката на електрична енергија според Државниот завод за статистика на Кипар (6.288 kWh) [154]. Годишно произведената електрична енергија се движи меѓу 3.840 kWh и 5.272 kWh, со средна вредност од 4.661 kWh и стандардна девијација од 332 kWh.

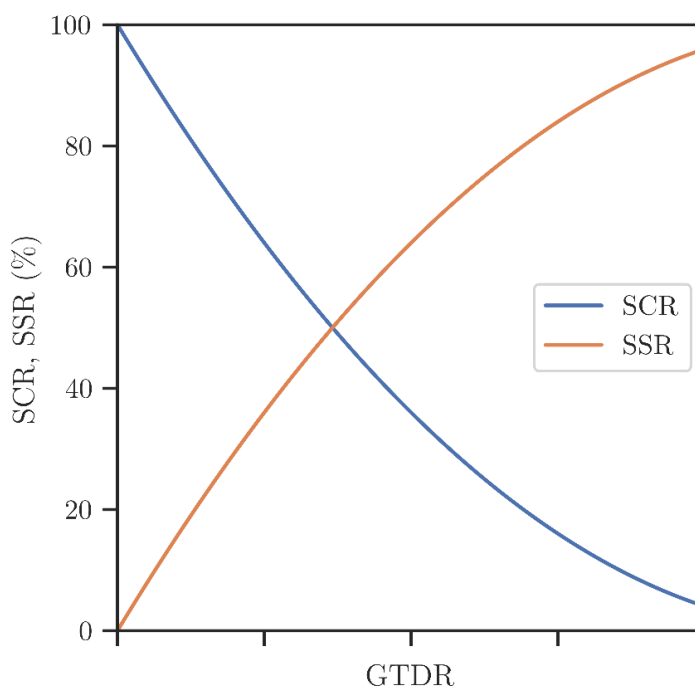
7.2 Статистичка анализа на индикаторите за билансите на потрошувачка и локално производство

Како што локалното производство на едно домаќинство расте (како што расте GTDR), така се подобрува и неговата енергетска независност SSR, но на сметка на сè помала стапка на сопствена потрошувачка SCR (затоа што сè поголемо количество на енергија се инјектира во мрежата). Оваа зависност меѓу трите индикатори е првично дискутирана во [155], но суштински произлегува од основните математички дефиниции на индикаторите. Водејќи се според равенките за пресметка на индикаторите, авторите на [155] презентираат теоретски криви со кои SCR и SSR се исцртани како функција од

GTDR. Овие криви, реконструирани на Слика 7.1, ја прикажуваат математичката зависност на трите индикатори, а подоцна ќе послужат како основа за апроксимација на сопствената потрошувачка. Следните две потточки подетално ја презентираат спроведената статистичката анализа на SCR, SSR, f и LOLP.

7.2.1 Домаќинства со фотоволтаичен генератор

Индикаторите се пресметани со примена на податоците од базите „Pecan Street“ и „Smart PV“. Табела 7.2 ги содржи сумарните статистички резултати за пресметаните вредности на SCR, SSR и LOLP за домаќинствата од првата база. Се забележува дека стапката на сопствена потрошувачка SCR се наоѓа во опсегот 24,79-81,33%, со просечна вредност од 49,87% и стандардна девијација од 13,63%. Истовремено, анализираните домаќинства просечно задоволуваат $SSR = 33,78\%$ од сопствените потреби за енергија, а се однесувале како нето-потрошувач во текот на $LOLP = 72,66\%$ проценти од годината.

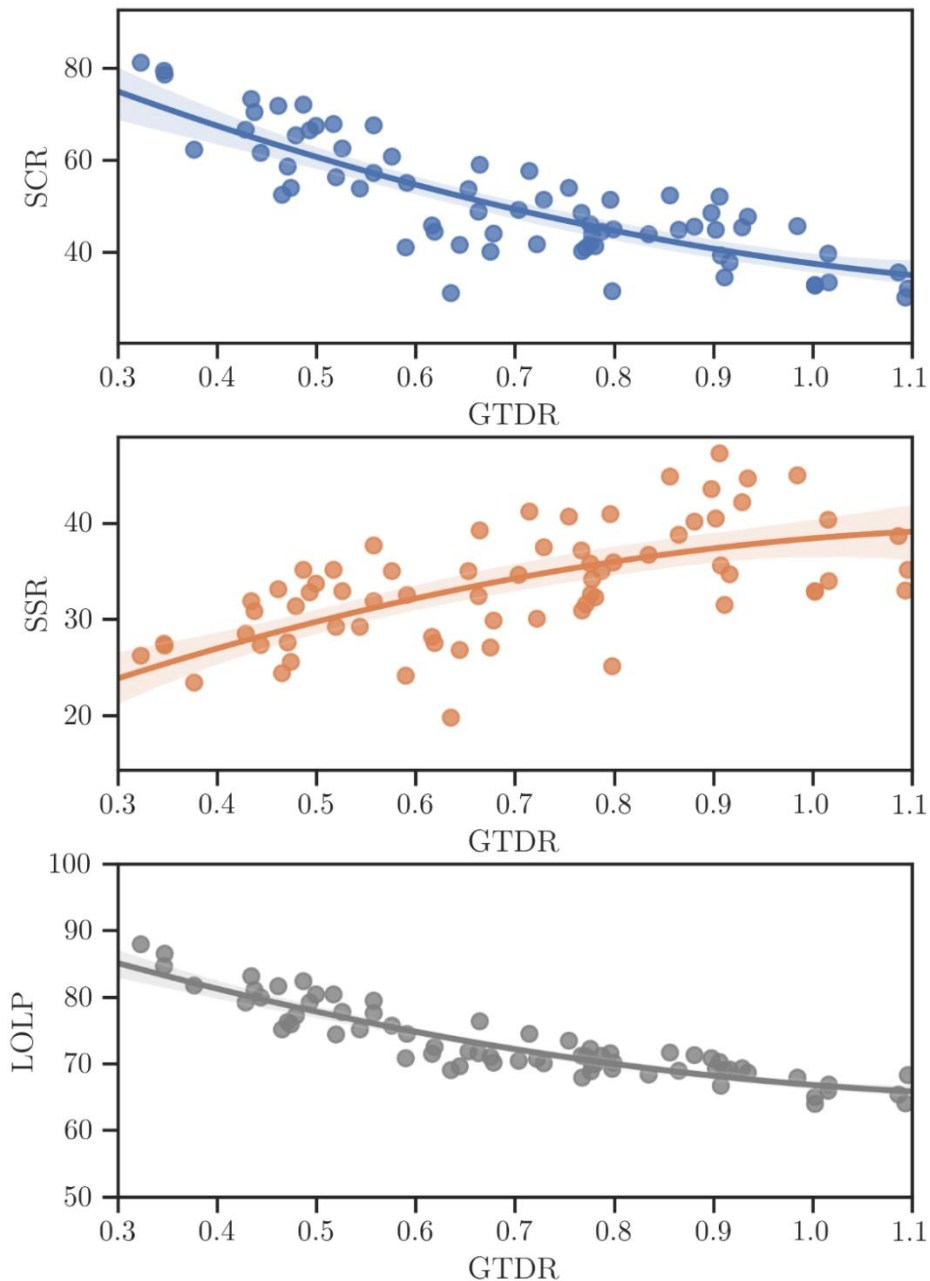


Слика 7.1. Теоретска зависност на SCR и SSR од GTDR [155]

Табела 7.2 Сумарни статистички податоци за индикаторите за потрошувачка и локално производство за домаќинствата од базата „Pecan Street“

	SCR (%)	SSR (%)	LOLP (%)
Средна вредност	49,87	33,78	72,66
Минимална вредност	24,79	15,94	63,20
Максимална вредност	81,33	47,26	87,99
Стандардна девијација	13,63	6,55	5,96

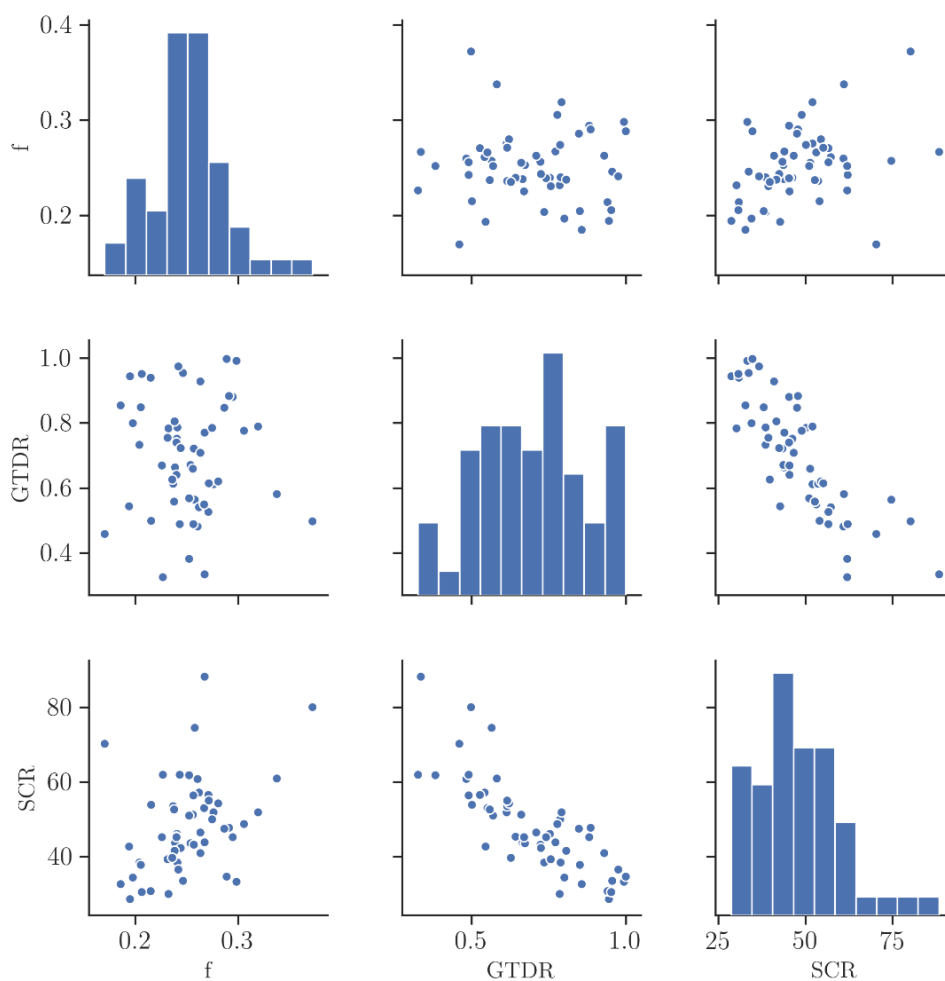
Пресметаните вредности на SCR, SSR и LOLP се исцртани графички, а потоа вметната е квадратна функција која го апроксимира трендот на резултатите, како што е прикажано на Слика 7.2.



Слика 7.2. Нелинеарна зависност на SCR, SSR и LOLP од GTDR; база „Pecan Street“

Добиените криви го следат обликот што бил очекуван во [155]. Се забележува дека SCR се однесува обратно пропорционално од GTDR, додека SSR расте пропорционално со GTDR. Тоа укажува дека домаќинствата што произведуваат многу повеќе отколку

што трошат, инјектираат поголем процент од локалното производство во мрежата, т.е. имаат ниска вредност за SCR. Истовремено, тие задоволуваат и поголем процент од сопствените потреби, т.е. имаат висока вредност на стапката на енергетска независност SSR. Покрај резултатите за SCR и SSR, Слика 7.2 уште покажува дека и индикаторот LOLP има слична зависност, кога е претставен во функција од GTDR. До сега не е воочена ваквата зависност во релевантната научна литература. До одреден степен, зависноста е очекувана. LOLP го означува процентот на време во кое еден потрошувач-производител презема моќност од мрежата (се однесува како нето-потрошувач). Затоа, не изненадува дека LOLP опаѓа како што локалното производство расте. Она што е интересно е дека зависноста е статистички одредена, а не произлегува директно од математичката дефиницијата на двата индикатора. Дел од овие резултати се публикувани во [Труд 4]. Стапките на сопствена потрошувачка SCR и енергетска независност SSR може најлесно да се подобрат доколку домаќинството помести дел од својата потрошувачка во периодот кога има најголемо сончево зрачење. Како што е прикажано на Слика 7.3, стапката на сопствена потрошувачка SCR расте пропорционално со факторот на дневна потрошувачка на енергија f .



Слика 7.3. SCR, GTDR и f пресметани со податоци од базата „Smart PV“

Резултатите за оваа слика се добиени со анализа на домаќинствата од базата „Smart PV“, а истите се користени во анализите на [Труд 2]. Факторот на дневна потрошувачка f може да се зголеми доколку домаќинството има флексибилни уреди чијашто потрошувачка може временски да се помести.

7.2.2 Домаќинства со фотоволтаичен генератор и батерија

Батериите се користат за складирање на вишокот произведена енергија во текот на денот и нејзино искористување подоцна, во текот на ноќта, кога фотоволтаичниот генератор не произведува енергија. На тој начин тие го модифицираат нето-потрошувачкиот дијаграм на домаќинството. Во однос на дистрибутивната мрежа, делува како домаќинството да поместува дел од својата потрошувачка во периодот кога има најголемо сончево зрачење. За управување на батериите постојат различни управувачки стратегии. Во потточка 3.2 се презентирани три управувачки стратегии и тоа една детерминистичка и две оптимизациски. Оттука произлегуваат две прашања:

- 1) Каково влијание имаат батериите врз вредностите на SCR, SSR и LOLP?
- 2) Каково влијание има управувачката стратегија на батеријата врз вредностите на SCR, SSR и LOLP?

За да се одговорат овие прашања, билансите на моќност на домаќинствата се пресметани уште еднаш, така што во секое домаќинство е предвидена и работата на една батерија. За разлика од податоците за производството и потрошувачката, временските дијаграми за работата на батеријата (полнење, празнење, складирана енергија) не се директно измерени, туку се добиени по пат на компјутерски симулации. Симулациите се извршени за батерија со номинален нето-капацитет од $E_{max,i} = 7,7$ kWh, максимална моќност од $P_{max,i} = 3$ kW и ефикасност на полнење/празнење за која, поради едноставност, е претпоставена константа вредност од $\eta_{ch} = \eta_{dis} = 0,92$ %. Техничките податоци на батеријата се преземени од [143]. По добивање на ново-пресметаните биланси на моќност, индикаторите SCR, SSR и LOLP се пресметани одново, за секое домаќинство. Врз основа на тие резултати, прашањето „Каково влијание имаат батериите врз вредностите на SCR, SSR и LOLP?“ може да се одговори од резултатите презентирани во Табела 7.3.

Табела 7.3 Просечни вредности за SCR, SSR и LOLP за домаќинства со фотоволтаични генератори со и без батерија; база „Pescan Street“

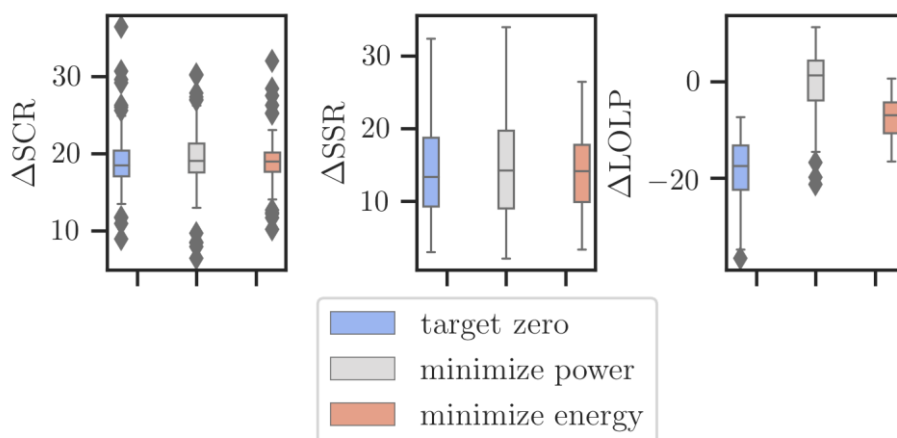
	Без батерија	Со батерија		
		target zero	min. power	min. energy
SCR (%)	49,87	68,99	69,15	69,00
SSR (%)	33,78	48,17	48,59	47,93
LOLP (%)	72,67	54,08	72,49	65,19

Се забележува дека просечните вредностите на трите индикатори се подобруваат кога во домаќинството се поставува батерија. Повеќе информации за ефектот кој што батеријата го има врз трите индикатори се дадени на Слика 7.4. Сликата ја прикажува промената на вредноста на секој индикатор после поставување на батерија, пресметана со помош на равенката:

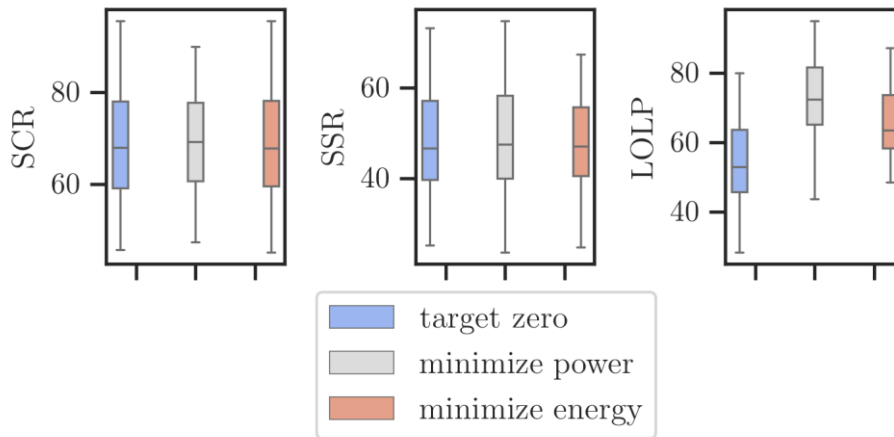
$$\Delta X = X_{(\text{со батерија})} - X_{(\text{без батерија})}$$

каде X е генерална ознака за некој индикатор, а се заменува со SCR, SSR и LOLP, соодветно. Кај домаќинствата со батерија, сопствената потрошувачка SCR и стапката на енергетска независност SSR се зголемиле за околу 20% и 12% соодветно. Веројатност за загуба на товарот LOLP, пак, зависи од тоа која управувачка стратегија е применета. На пример, стратегијата „target zero“ дава пониски вредност за веројатноста на загуба на товар LOLP („target zero“: 54,08%), споредено со двете вредностите за LOLP добиени од двете оптимизациски стратегии („minimize power“: 72,49% и „minimize energy“: 65,19%)

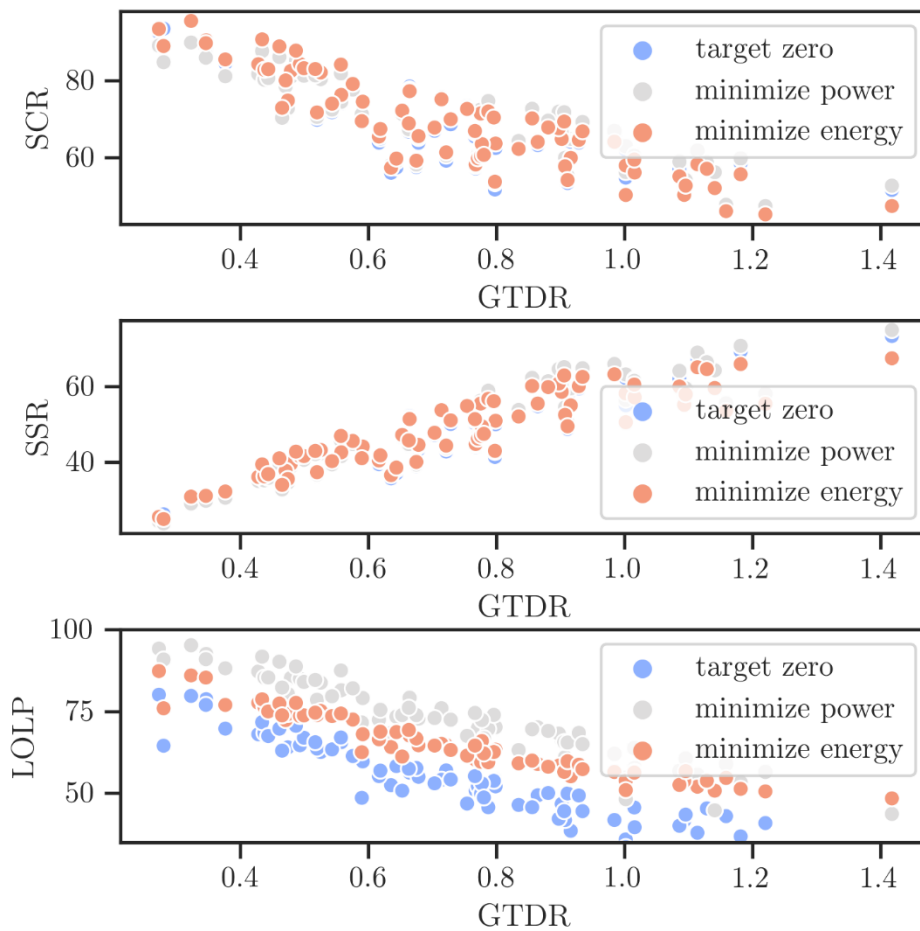
Според резултатите прикажани на Слика 7.4, нити една управувачката стратегија нема изразена предност во подобрување на стапката за сопствена потрошувачка SCR и стапката за енергетската независност SSR на домаќинството. Меѓутоа, стратегијата може значително да влијае врз зависноста на домаќинството од дистрибутивната мрежа (квантифицирана со помош на LOLP). Кога домаќинствата се симулирани со батерија, се добиваат вредности за SCR, SSR и LOLP од Слика 7.5. Се разбира, ако наместо оваа батерија, се постави батерија со поголем капацитет, вредностите на анализирани индикатори дополнително се подобруваат. Покрај тоа, од Слика 7.6 се забележува дека SCR и SSR го следат истиот тренд како и во случајот кога домаќинствата немаат батерија. Сликата повторно илустрира дека управувачката стратегија на батеријата нема големо влијание врз SCR и SSR, но значително влијае врз LOLP.



Слика 7.4. Промена на SCR, SSR и LOLP поради батерија; база: „Pecan Street“



Слика 7.5. Вредност на SCR, SSR и LOLP во домаќинства со батерии; база: „Pecan Street“



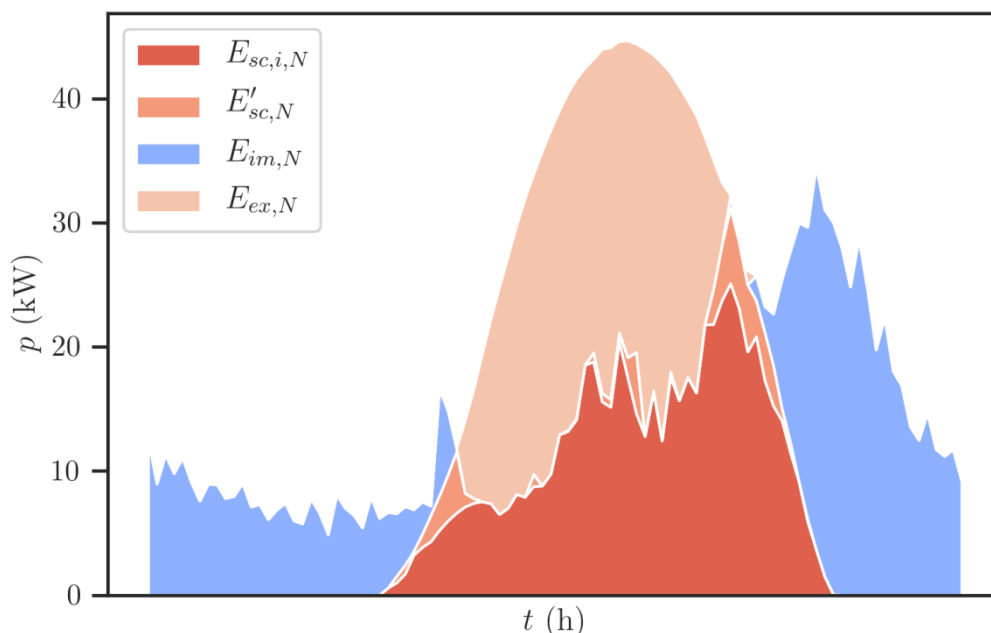
Слика 7.6. Зависност на SCR, SSR и LOLP од GTDR за потрошувач-производител со батерија; база: „Pecan Street“

7.2.3 Енергетски заедници

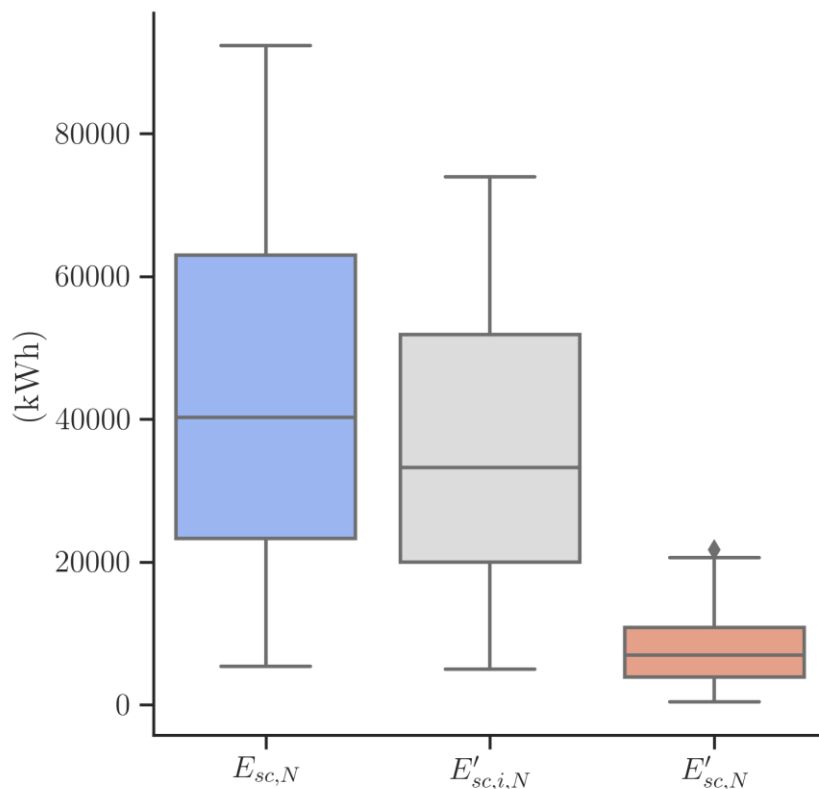
Следејќи ја постапката за создавање на хипотетички енергетски заедници од Глава 6, создадени се 200 хипотетички заедници. Со оглед на случајниот начин на којшто се формираат заедниците, заедниците анализирани во оваа потточка не се исти со тие од Глава 6. За вака формираните заедници, пресметани се билансите на енергија во заедницата.

Типичен временски дијаграм за дневниот енергетски биланс на една заедницата е прикажан на Слика 7.7. Слика 7.8 ги прикажува вредностите за вкупната сопствена потрошувачка $E_{sc,N}$ и нејзините составни делови: збирот на индивидуалната сопствена потрошувачка $E_{sc,i,N}$ и сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$. Сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$ приближно изнесува помеѓу 7% и 28% од вкупната сопствена потрошувачка на заедницата $E_{sc,N}$, како што е прикажано на Слика 7.9.

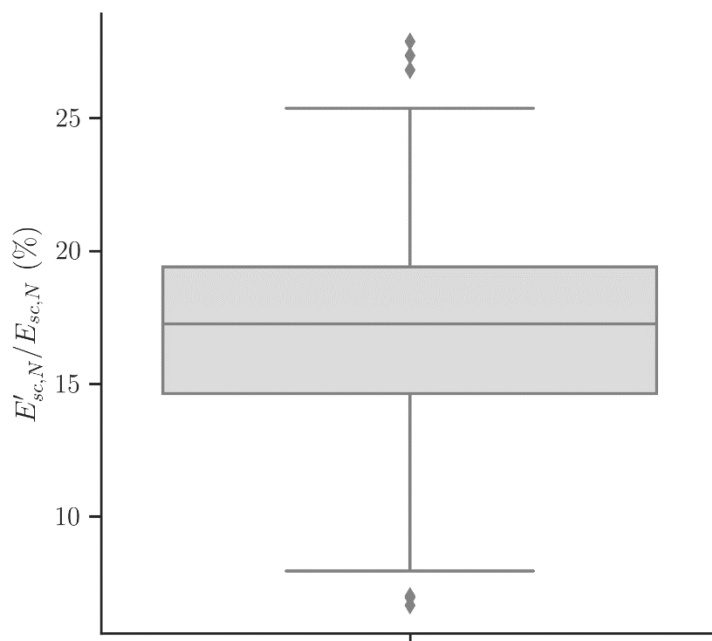
Овој параметар е анализиран и како функција од големината на енергетската заедница. Како што е дискутирано во точка 5.3.1, со зголемување на заедницата, се зголемува колективната придобивка на сите членови поради зголемување на сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$. Од нумеричките резултати во оваа точка се заклучува и дека просечната сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$, за секој член од заедницата, исто така се зголемува, што како што се гледа од Слика 7.10. Монотоно растечкиот тренд прикажан на Слика 7.10 го потврдува аналитичкиот резултат од точка 5.3.1.



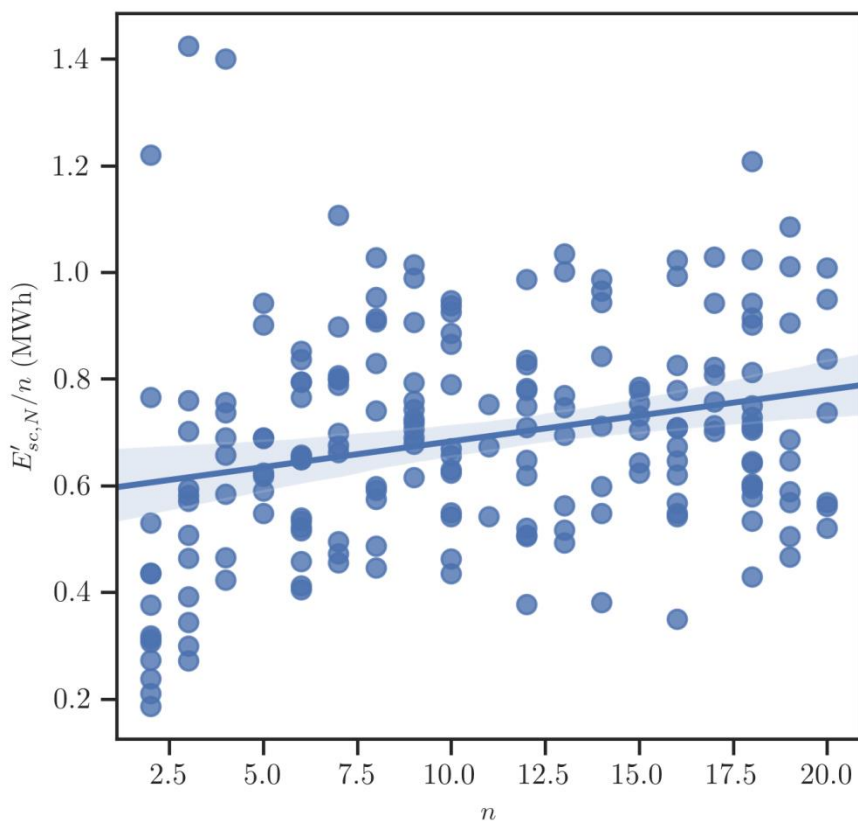
Слика 7.7. Типичен дијаграм за биланс на енергија во хипотетичка енергетска заедница



Слика 7.8. Статистички резултати за сопствената потрошувачка на енергија во 200 анализирани заедници; база: „Pecan Street“



Слика 7.9. Сопствена потрошувачка на вишокот ($E'_{sc,N}$) изразена како процент од вкупната сопствена потрошувачка на заедницата ($E_{sc,N}$) за 200 анализирани заедници; база: „Pecan Street“

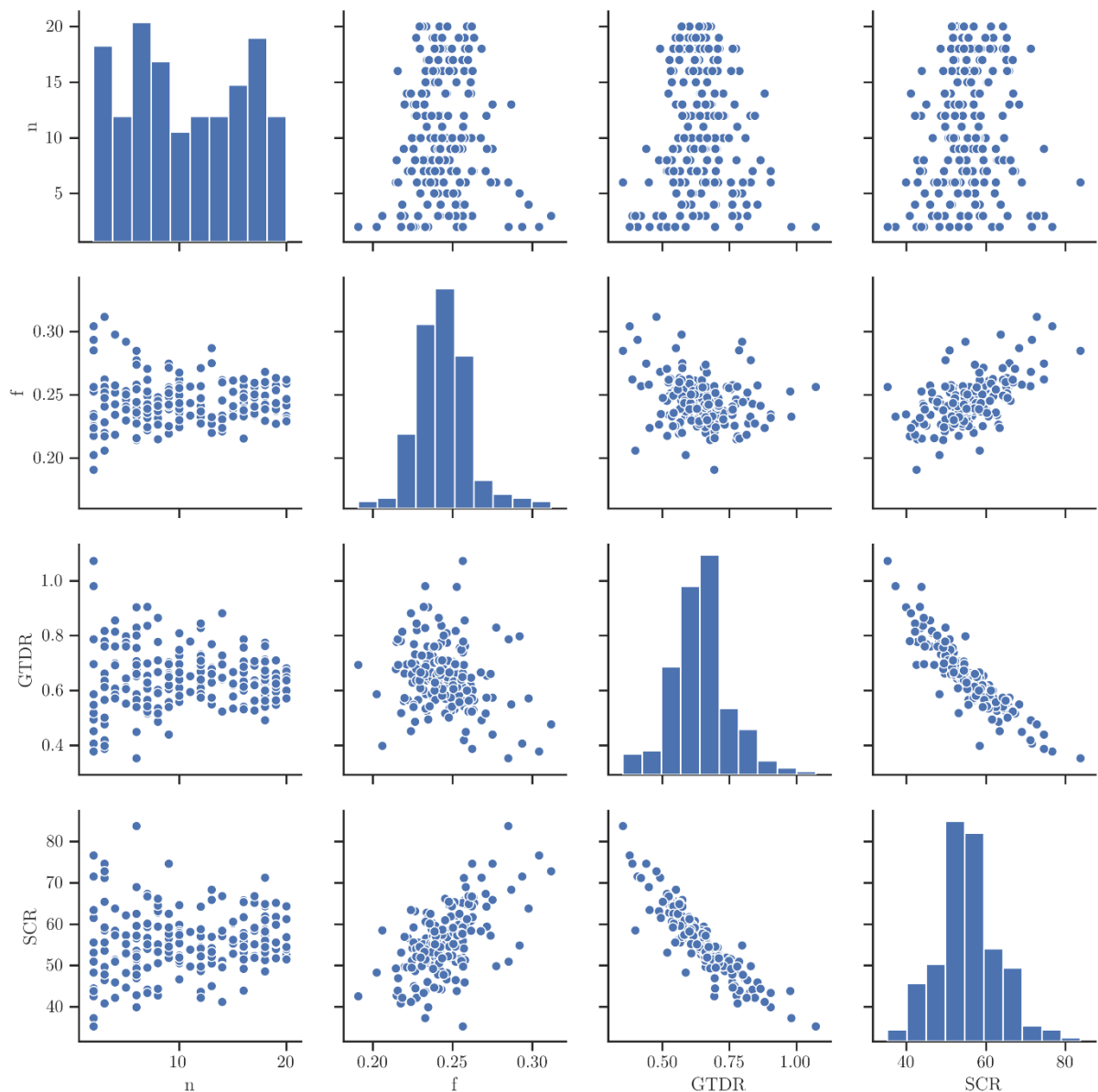


Слика 7.10. Просечна сопствена потрошувачка на вишокот по член на заедницата; база: „Pecan Street“

За анализираните заедници, пресметани се и вредностите за индикаторите SCR, SSR, LOLP, GTDR и f . Сумарните статистички резултати од оваа анализа се покажани во Табела 7.4. Воочено е дека постојат значителни корелации меѓу вредностите на GTDR, SCR и f , кои се видливи на Слика 7.11. Особено важна е зависноста што стапката на сопствена потрошувачка SCR ја има од GTDR (обратно-пропорционална) и f (право пропорционална). Оваа утврдена зависност подоцна ќе послужи при апроксимирање на вредноста на SCR преку вредностите на GTDR и f .

Табела 7.4 Сумарни статистички податоци за индикатори за биланси на потрошувачка и локално производство за хипотетички заедници; база „Pecan Street“

	SCR (%)	SSR (%)	LOLP (%)	GTDR	f (%)
Средна вредност	55,724	35,282	72,809	0,647	0,245
Минимална вредност	35,289	23,329	62,977	0,353	0,191
Максимална вредност	83,801	43,708	86,844	1,072	0,312
Стандардна девијација	7,550	2,561	3,432	0,110	0,017



Слика 7.11. Корелација меѓу бројот на членови во заедницата n , факторот на дневна потрошувачка f , односот на производството и потрошувачка GTDR и стапката на сопствена потрошувачка SCR; база: „Pecan Street“

7.3 Апроксимацијата на сопствената потрошувачка

Врз основа на претходната анализа, презентирани се резултатите од линеарната регресија на четири големини: стапката на сопствена потрошувачка на домаќинство со фотоволтаичен генератор, стапката на сопствена потрошувачка на енергетска заедница, сопствена потрошувачка на енергетска заедница и сопствена потрошувачка на вишокот на енергетската заедница.

Секоја од овие големини се апроксимира со равенка од облик:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

каде y_i е зависна променлива, т.е. големината што се апроксимира, векторот $\mathbf{X} = \{X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}\}$ се нарекува вектор со независни променливи и се состои од големини што се корелирани со y_i , векторот $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k+1}\}$ ги содржи коефициентите што се добиваат како резултат на линеарната регресија, а ε_i е отстапување меѓу точните и апроксимираните вредности. За познати вредности на y_i и векторот \mathbf{X} , постапката се сведува на одредување на такви вредности за $\boldsymbol{\beta}$ што ја минимизираат грешката ε_i .

Соодветноста на статистичкиот модел, кој е резултат од линеарната регресија, се квантифицира со помош на коефициентот на детерминираност:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

\bar{y} ја означува средната вредност на зависната променлива за сите домаќинства во множеството со вкупно n членови, а \hat{y}_i е апроксимираната вредност за членот i . Точноста на апроксимацијата уште се квантифицира со помош на средната апсолутна грешка (анг. *mean absolute error*) (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \cdot 100$$

7.3.1 Апроксимација на стапката на сопствена потрошувачка SCR на домаќинства со фотоволтаичен генератор

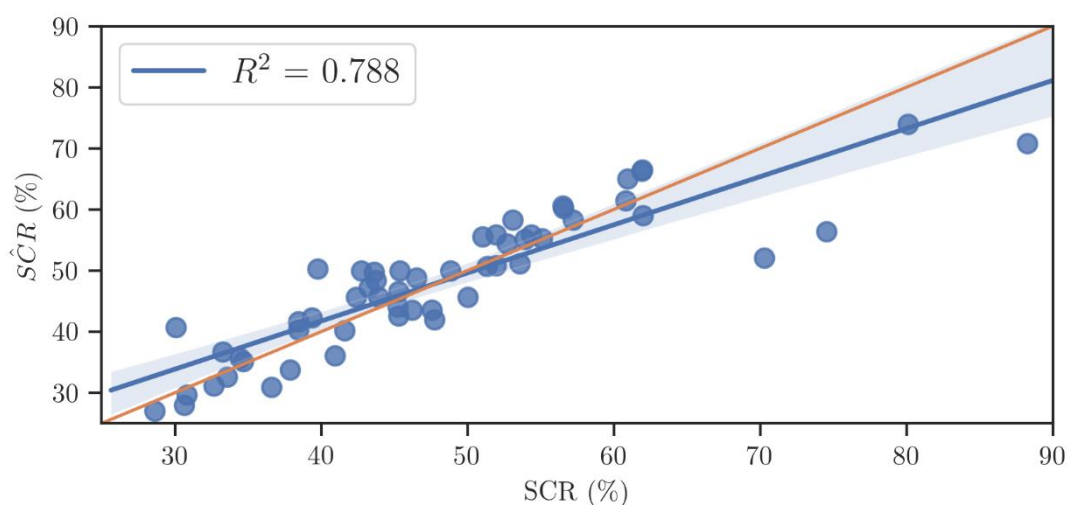
Авторите на [156] и [157] применуваат линеарна регресија за апроксимација на сопствената потрошувачка (во kWh) за поединечни домаќинства со фотоволтаичен генератор. Притоа, векторот со независни променливи \mathbf{X} во нивниот модел ги содржи вкупната потрошувачка на електрична енергија, вкупното производство на електрична енергија и факторот на дневна потрошувачка f . Во статистичкиот модел предложен подолу, наместо вкупната потрошувачка и вкупното производство, користен е нивниот однос, т.е. индикаторот GTDR.

Овој пристап се базира на претходно анализираните корелации, прикажани детално на Слика 7.3. Според тоа, апроксимацијата на SCR се базира на линеарната равенката:

$$SCR_i = \beta_0 + \beta_1 GTDR_i + \beta_2 f_i + \varepsilon_i$$

Во анализата, користени се податоците од базата „Smart PV“. Резултатите се прикажани во Табела 7.5, а соодветноста на моделот е прикажана на Слика 7.12. Се гледа дека коефициентот на детерминираност од линеарната регресија е еднаков на $R^2 = 0,788$,

додека подесениот коефициент на детерминираност, кој го зема предвид влијанието на додавање на статистички незначајни променливи, е еднаков на 0,780. Средната апсолутна грешка на апроксимацијата е еднаква на 4,051%. Грешката и нецелосното поклопување на статистичкиот модел се должат на тоа што распределбата на вредностите на стапката на сопствена потрошувачка не е Гаусова, но се должат и на малиот примерок од 55 домаќинства со фотоволтаици. Во табелата се дадени и вредностите на трите коефициенти од векторот β добиени од анализата. Поради тоа што p вредноста од t -тестот на овие коефициенти е помала од 0,001, нул-хипотезата H_0 се исфрла и се заклучува дека корелациите меѓу двата коефициенти и стапката на сопствена потрошувачка SCR се статистички значителни.



Слика 7.12. Соодветност на линеарниот модел за апроксимација на SCR во индивидуални домаќинства со фотоволтаични генератори; база: „Smart PV“

Табела 7.5 Резултати од линеарна регресија на SCR за индивидуално домаќинство

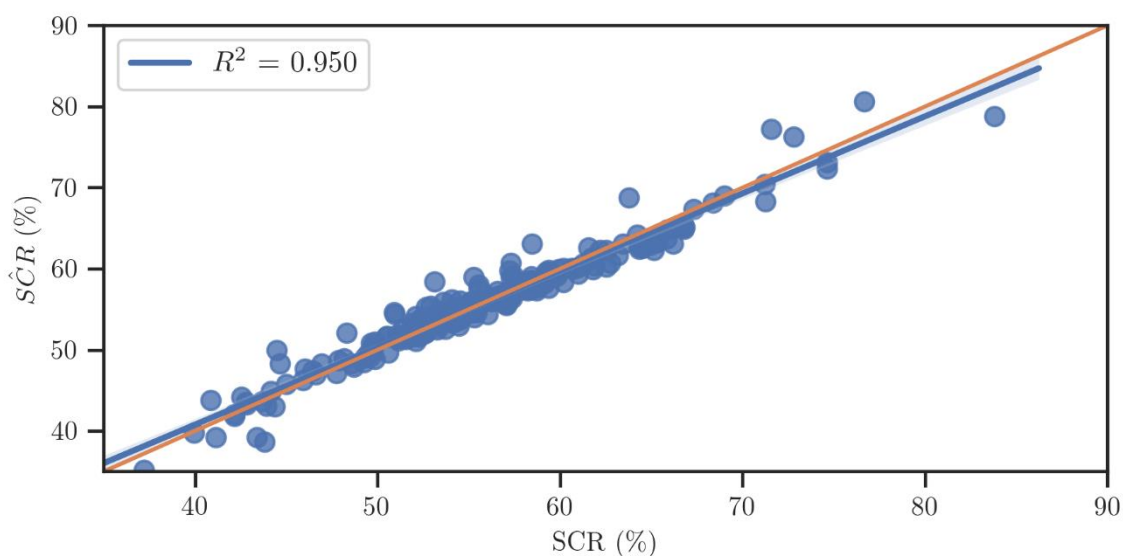
Параметар	Вредност
R^2	0,788
Подесен R^2	0,780
β_0	58,301 ($p < 0,001$)
β_1	-57,640 ($p < 0,001$)
β_2	119,104 ($p < 0,001$)
Примероци	55
MAE (%)	4,051

7.3.2 Апроксимација на стапката на сопствена потрошувачка SCR на енергетска заедница

Користејќи го истиот статистички модел, регресионата анализа е спроведена со податоците од енергетските заедници симулирани во потточка 7.2.3. Резултатите, прикажани во Табела 7.6, покажуваат дека, како и претходно, сите независни променливи имаат статистички значајна корелација со SCR ($p < 0,001$). Во случајов, се воочува уште дека моделот е комплетен и нуди добро поклопување меѓу точните и пресметаните вредности на SCR ($R^2 = 0,950$). Тоа го потврдува и средната апсолутна грешка, која е намалена во однос на претходната анализа и сега изнесува MAE=1,205%. Поклопувањето на резултатите е прикажано на Слика 7.13.

Табела 7.6 Резултати од линеарна регресија на SCR на енергетски заедници ($n = 200$)

Параметар	Вредност
R^2	0,950
Подесен R^2	0,950
β_0	51,072 ($p < 0,001$)
β_1	-55,707 ($p < 0,001$)
β_2	166,294 ($p < 0,001$)
Примероци	200
MAE (%)	1,205



Слика 7.13. Соодветност на линеарниот модел за апроксимација на SCR во енергетски заедници; база: „Pecan Street“ ($n = 200$)

7.3.3 Апроксимација на сопствената потрошувачка $E_{sc,N}$ во енергетска заедница

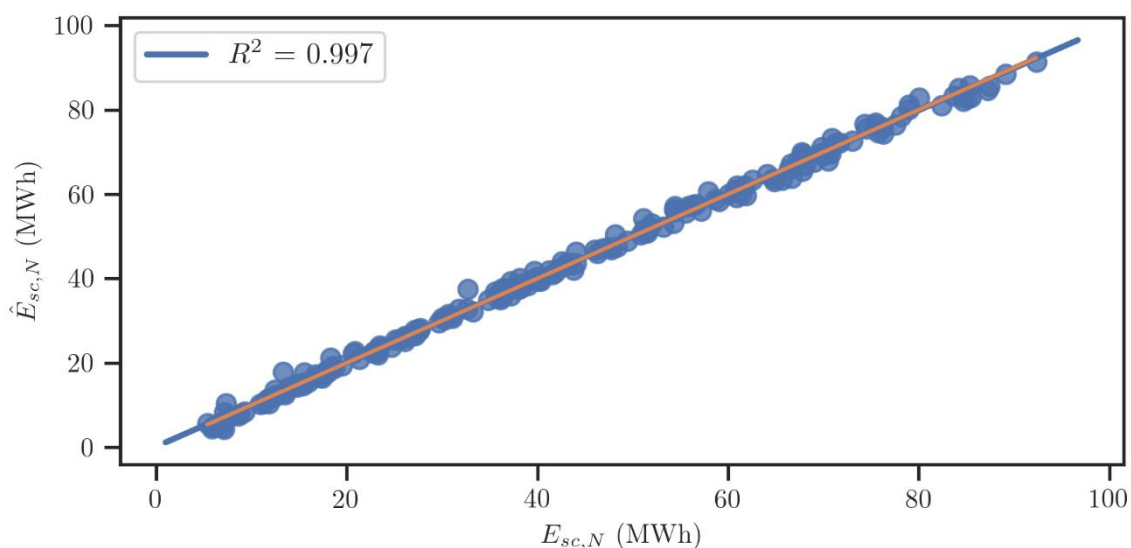
Вредноста на сопствената потрошувачка $E_{sc,N}$ на енергетска заедница N се апроксимира со помош на моделот применет во [156] и [157]:

$$E_{sc,N} = \beta_0 + \beta_1 E_{g,N} + \beta_2 E_{\ell,N} + \beta_3 f_N + \varepsilon_N$$

Резултатите од линеарната регресија, прикажани во Табела 7.7, покажуваат многу добро поклопување на точните и проценетите вредности на сопствена потрошувачка.

Табела 7.7 Резултати од линеарна регресија на сопствената потрошувачка на енергетски заедници ($n = 200$)

Параметар	Вредност
R^2	0,997
Подесен R^2	0,997
β_0	-17,307 ($p < 0,001$)
β_1	0,1433 ($p < 0,001$)
β_2	0,276 ($p < 0,001$)
β_3	65,552 ($p < 0,001$)
Примероци	200
MAE (%)	0,955



Слика 7.14. Соодветност на линеарниот модел за апроксимација на сопствена потрошувачка на енергетски заедници; база: „Pecan Street“ ($n = 200$)

Коефициентот на детерминираност е еднаков на $R^2 = 0,997$, а средната апсолутна грешка е еднаква на $MAE = 0,955\%$. Дополнително, забележано е дека сите независни променливи вклучени во статистичкиот модел ($E_{g,N}$, $E_{\ell,N}$ и f) имаат статистички значајна корелација со колективната сопствена потрошувачка $E'_{sc,N}$. Соодветноста на моделот е прикажана графички на Слика 7.14.

7.3.4 Апроксимација на сопствена потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$ во енергетска заедница

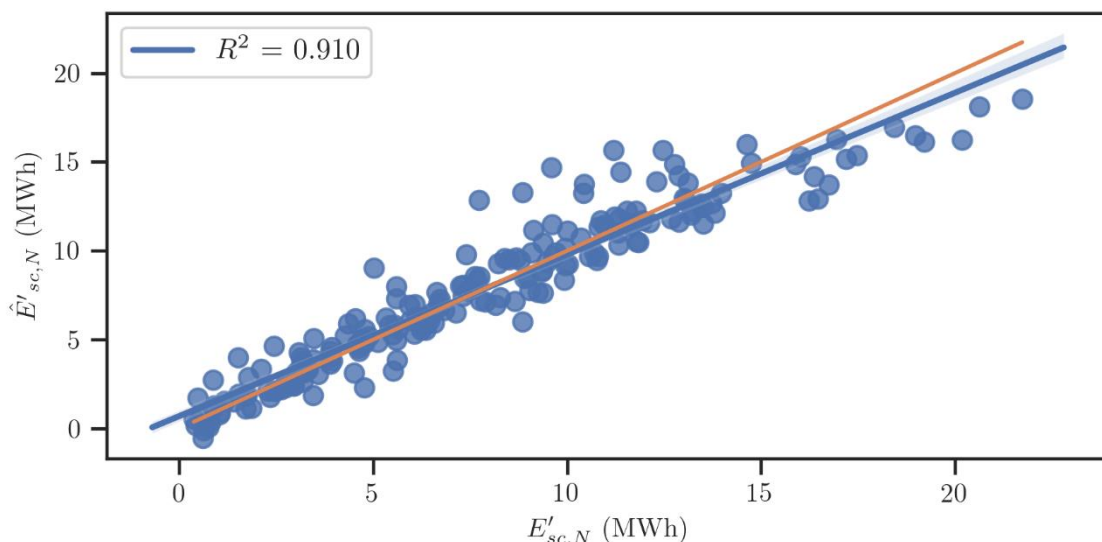
Сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$ е поврзана со придобивката од формирање на енергетската заедница. Тоа формално е покажано во Глава 5, каде за вредноста на енергетската заедница се добива:

$$v(N) = (\lambda - \pi) \sum_{t \in T} p'_{sc,N}(t) \Delta t = (\lambda - \pi) E'_{sc,N}$$

Слично како претходно, за апроксимација на оваа големина, применет е линеарниот модел од [156] и [157]:

$$E'_{sc,N} = \beta_0 + \beta_1 E_{g,N} + \beta_2 E_{\ell,N} + \beta_3 f_{d,N} + \varepsilon_N$$

Од резултатите се забележува дека применетиот модел дава добра апроксимација на сопствена потрошувачка на вишокот, како што е прикажано во Табела 7.8 и Слика 7.15.



Слика 7.15. Соодветност на линеарниот модел за апроксимација на сопствена потрошувачка на вишокот на енергетски заедници; база: „Pecan Street“ ($n = 200$)

Табела 7.8 Резултати од линеарна регресија на сопствената потрошувачка на вишокот на енергетски заедници ($n = 200$)

Параметар	Вредност
R^2	0,910
Подесен R^2	0,908
β_0	-7,701 ($p < 0,001$)
β_1	-0,030 ($p < 0,001$)
β_2	0,0869 ($p < 0,001$)
β_3	29,095 ($p < 0,001$)
Примероци	200
MAE (%)	1,101

Пресметаниот коефициент на детерминираност е еднаков на $R^2 = 0,910$ и малку се разликува од подесениот R^2 , кој е еднаков на 0,908. Средната апсолутна грешка од апроксимацијата е еднаква на $MAE = 1,101\%$. Како и претходно, независни променливи $E_{g,N}$, $E_{t,N}$ и $f_{d,N}$ имаат статистички значајна корелација со колективната сопствена потрошувачка $E_{sc,N}$ ($p < 0,001$).

7.4 Релевантност на резултатите за предложениот метод

Со помош на спроведената статистичката анализа, квантифицирана е сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$, која е клучен параметар во методот VNB. Резултатите покажуваат дека таа изнесува меѓу 7% и 28% од вкупната сопствена потрошувачка на заедницата $E_{sc,N}$ и дека има монотоно растечки тренд по член на заедницата, како што може да се забележи од Слика 7.9 и Слика 7.10. Со други зборови, резултатите покажуваат дека со зголемување на заедницата се зголемува и придобивката што членовите на заедницата можат да ја поделат меѓу себе, што го потврдува заклучокот добиен аналитички во 5.3.1.

Вториот дел од анализата покажува дека сопствената потрошувачка на вишокот $E'_{sc,N}$, но и другите параметри кои влијаат врз заштедата на заедницата, може да се апроксимираат. Од спроведената линеарна регресија се забележува дека количникот на произведената и потрошената енергија GTDR има статистички значителна корелација со стапката со сопствена потрошувачка SCR и тоа на индивидуално и колективно ниво. Овие резултати ја поткрепуваат втората хипотеза поставена во дисертацијата. Два применети модела, едниот базиран на GTDR и f , а другиот преземен од [156], овозможуваат проценка на важни параметри за сопствената потрошувачка со релативно

висока точност. Дополнително, покажано е дека статистичкиот модел од [156], кој оригинално е наменет за индивидуални домаќинства со фотоволтаици, може да се користи и за енергетски заедници.

Се заклучува дека за проценка на параметрите што се поврзани со сопствената потрошувачка на едно домаќинство или заедница, потребни се само основни информации за произведената и потрошената енергија, а не и детални временски дијаграми. Притоа, треба да се има предвид дека конкретните линеарни равенки добиени погоре се корисни само за домаќинства што се сродни со анализираните и дека коефициентите на добиените равенки не се генерални. Сепак, придонесот е методолошки, затоа што пристапот е доволно генерален за да може да се користи за добивање на нови линеарни равенки, кои ќе бидат применливи за некој друг регион од интерес.

Глава 8 Заклучок

Како што методите за директно тргување и размена на енергија се развиваат, крајните корисници сè полесно ќе можат да контролираат кому и по која цена ја продаваат електричната енергија што локално ја произвеле. Тоа суштински го децентрализира енергетскиот систем, пренесувајќи поголема моќ во рацете на граѓаните. Тие ќе можат да се организираат во енергетски заедници во кои непосредно ќе разменуваат енергија, со цел да ги намалат своите трошоци и да остварат други еколошки и социјални придобивки. Анализата на наведената литература покажува дека успешното функционирање на една енергетска заедница е тесно поврзано со тоа колку праведно се распределуваат трошоците и придобивките во рамки на таа заедница. Недостатокот на праведност може да поттикне незадоволство кај членовите на заедницата и може да предизвика нејзино постепено распаѓање.

Кога членовите на заедницата директно тргуваат со енергија, праведноста во заедницата произлегува од избраниот метод за директно тргување. Од тој аспект, воочена е разлика меѓу методите што се користат во пракса и методите што се предложени во научната литература. Од една страна, методите што се користат во пракса се едноставни, затоа што се базирани на интуитивни правила за пропорционална распределба. Меѓутоа, тие се суштински неправедни и нивната примена треба да се напушта како што оваа област созрева. Од друга страна, методите од научната литературата се базираат на иновативни ценовни механизми, математичко програмирање и теорија на игри. Освен тоа што не се толку интуитивни, овие методи имаат време на пресметка што може да трае толку долго, што се практично неприменливи во реални услови, особено кај енергетски заедници со многу членови. Токму овој компромис, меѓу практичноста и праведност на методите за директно тргување, беше главна мотивација за истражувањето.

Во таа насока, поставени беа две хипотези. Првата хипотеза тврди дека еден метод за директно тргување е праведен и пресметковно ефикасен ако ја распределува колективната придобивка меритократски и во реално време. Втората хипотеза појаснува од каде произлегува колективната придобивка што е предмет на првата хипотеза.

Имајќи ги предвид овие хипотези, на почетокот на дисертацијата беше предложена теоретска рамка со која што може да се анализираат енергетските заедници. За да се појасни што се подразбира под терминот „праведност“, изнесени беа три различни дефиниции и беа дадени потребните појаснувања. Потоа, презентираше беше математичкиот апарат за билансите на моќност и енергија во енергетски заедници и прегледани беа десет репрезентативни методи за колективно директно тргување, врз основа на претходно дефинираниот математички апарат. Пет од тие методи беа користени подоцна, за споредба со методот за виртуелна нето-наплата, кој е предложен

во дисертацијата. Предложениот метод е концептуално дополнување на методот за индивидуална нето-наплата и ги наследува сите предности што нето-наплатата ги има пред нето-мерењето. Користејќи реални мерни податоци за домаќинства со фотоволтаици, симулирани беа голем број на енергетски заедници, а тие служеа за споредба на методот за виртуелна нето-наплата и останатите пет методи. Еден од петте методи од литературата беше избран како референтен, затоа што ги задоволува трите претходно изнесени дефиниции за праведност. Со комбинација на теоретска анализа и компјутерски симулации, поткрепени беа двете хипотези што беа поставени на почетокот на истражувањето. Заклучено беше дека предложениот метод задоволува две од трите дефиниции за праведност, има најслични резултати со референтниот (праведен) метод и резултира во најмало незадоволство во заедницата, во споредба со останатите четири методи од литературата. Истовремено, предложениот метод пресметковно помалку е захтевен споредено со референтниот метод и нуди поголема флексибилност во начинот на кој може да се користи затоа што пресметките може се извршат во реално време или на крајот од секој месец. Во двата случаи, времетраењето на пресметките на предложениот метод за заедница од 15 члена траат помалку од една секунда. Од друга страна, референтниот метод не може да се користи за пресметки во реално време, бидејќи неговите пресметки се значително подолготрајни. На пример, за заедница од 15 члена, пресметките со референтниот метод траат околу 15 минути. За заедници со триесет члена, пресметките на референтниот метод траат околу 7000 часа, поради што тој е практично неприменлив. Со оглед на тоа што предложениот метод за виртуелна нето-наплата нуди најголема праведност меѓу останатите методи, тој е најсоодветна практична замена за референтниот метод.

8.1 Придонеси во областа на истражување

Спроведеното истражување го дава следниот придонес кон литературата за директно тргување и разменување на енергија во енергетски заедници:

- Направен е темелен преглед на постоечката литература од областа на енергетските заедници и директното тргување со енергија. Дискутирана е Европската регулатива и трендовите за демократизација на енергетскиот сектор.
- Предложена е теоретска рамка за анализа на праведноста на различни методи за директно тргување. Таа се состои од три дефиниции на праведност и три нумерички индикатори. Овој пристап е применлив за анализа на праведноста и на други методи во идни истражувања.
- Развиен е метод за директно тргување со енергија кој е праведен и едноставен за практична имплементација. Методот ја третира енергетската заедница како еден потрошувач-производител чија сметка се пресметува со нето-наплата, а придобивката ја распределува меѓу членовите на заедницата, според нивниот индивидуален придонес. Со примена на теоријата на кооперативни игри и со

помош на голем број компјутерски симулации, анализирани се својствата на методот и поткрепена е првата хипотеза на дисертацијата.

- Преку компјутерски симулации, квантифицирана е праведноста на шест методи за директно тргување (предложениот метод и пет постоечки методи). За разлика од досегашните истражувања наведени во консултираната литература, во дисертацијата за прв пат се спроведува анализа во која петте постоечки методи се меѓусебно споредени на голем примерок ($K=600$) на енергетски заедници.
- Предложен е детален математички модел за енергетските биланси во енергетска заедница. Воведено е временско и структурно разложување на сопствената потрошувачка на енергија, што дава јасна слика за начинот на кој се генерира колективната придобивка во заедницата.
- Утврдена е статистички значителна корелација меѓу сопствената потрошувачка и односот меѓу вкупно произведената и потрошената енергија. Показано е дека (1) стапката на сопствена потрошувачка и (2) енергијата на сопствената потрошувачка на колективно ниво може да се апроксимираат само врз основа на лесно достапни податоци за енергетска заедница. Тоа ја поткрепува втората хипотеза поставена во дисертацијата и нуди генерална методологија што може да се користи и за анализа на други енергетски заедници.

На ниво на индивидуални потрошувачи-производители, истражувањето ги нуди следните придонеси:

- Утврдена е статистички значителна корелација меѓу сопствената потрошувачка и односот меѓу вкупно произведената и потрошената енергија. Показано е дека стапката на сопствена потрошувачка на индивидуално ниво може да се апроксимира само користејќи лесно достапни податоци за едно домаќинство.
- Квантифицирани се ефектите од постоењето/користењето на батерија врз енергетските биланси на домаќинство со фотоволтаичен генератор и моќноста што тоа ја разменува со мрежата. Односот меѓу произведената и потрошената енергија е предложен како индиректен показател за стапката на сопствена потрошувачка на домаќинството.

Врската меѓу горенаведените придонеси и трудовите коишто се публикувани во текот на истражувањето е следна:

- Во [Труд 1] е даден преглед на (1) организациските аспекти на енергетските заедници, (2) на технологиите коишто најчесто се користат во енергетски заедници и (3) на индикаторите за квантифицирање на придобивките од енергетски заедници.
- Во [Труд 2] анализирани се енергетските биланси на 55 домаќинства со фотоволтаични генератори, врз основа на реални мерни податоци. Резултатите покажуваат дека вредноста на количникот на произведената и потрошената

енергија на едно домаќинство, дефиниран како GTDR, е корелирана во стапката на сопствена потрошувачка на тоа домаќинство SCR. Со оглед на тоа што GTDR многу полесно се пресметува од SCR, предложено е дека GTDR може да служи за апроксимација на SCR, со цел полесна класификација на потрошувачите-производители од аспект на нивното влијание врз дистрибутивната мрежа.

- Во [Труд 3] е презентирани математички апарат со помош на кој може да се открие колкав дел од сопствената потрошувачка на заедницата се должи на директното тргување со енергија. Врз основа на тоа, развиен е метод за директно тргување со енергија – виртуелна нето-наплата. Со помош на теорија на кооперативни игри и компјутерски симулации, анализирани се својствата на предложениот метод. Методот е спореден со пет постоечки методи за директно тргување од литературата (BS, MMR, SDR, SV и MV) и дискутирани се неговите предности и недостатоци.
- Во [Труд 4] се анализирани ефектите што батериите ги имаат врз стапката на сопствена потрошувачка, стапката на енергетска независност и врз други технички индикатори. Трите управувачки стратегии на батериите коишто се користени во [Труд 4] првично се тестирани во [Труд 8]. Резултатите од [Труд 2] и [Труд 4] се поврзани со втората хипотеза поставена во дисертацијата. Анализата на статистичките корелации, презентирани во Глава 7, произлегува од резултатите на [Труд 2] и [Труд 4].
- Во [Труд 5], [Труд 6] и [Труд 7] се истражени ефектите што различни симулациски параметри ги имаат врз резултатите. Поточно, анализирано е влијанието што временската резолуција на симулацијата и техничките параметри на батеријата (капацитет и моќност) го имаат врз енергетските биланси на потрошувачите-производители.

8.2 Примена на резултатите од истражувањето

Резултатите од истражувањето се корисни за чинителите во електроенергетскиот сектор (снабдувачи со електрична енергија, оператори на дистрибутивен систем за електрична енергија, регулаторни тела) и за академската заедница. Поконкретно, развиениот метод за директно тргување ќе им овозможи на снабдувачите со електрична енергија да го прошират својот бизнис модел со многу мали прилагодувања на досегашниот принцип на работа. За операторите на дистрибутивниот систем, понуден е математички апарат којшто ги квантифицира енергетски биланси на потрошувачите-производители, што е корисно при носење на одлуки за максимално дозволени капацитети на дистрибуирано производство. На национално ниво, прегледот на Европските директиви и светските трендови треба да го приближат концептот на директно тргување со енергија до регулаторните тела и носителите на политики. Од интерес за нив може да биде терминологијата која е предложена во дисертацијата со цел да се даде превод на одредени современи термини. Проценето е дека ваквата

терминологија моментално недостасува во македонскиот техничкиот вокабулар. На крај, резултатите од дисертацијата треба да поттикнат идни истражувачки прашања од областа на директното тргување со енергија.

8.3 Насоки за идни истражувања

Постојат неколку насоки за дополнителни истражувања. Меѓу нив, вреди да се истакнат следните:

- Различни чинители во електроенергетскиот сектор може да имаат спротивставени цели. Според тоа, идните истражувања треба подетално да проучат како директното тргување влијае врз останатите чинители во електроенергетскиот сектор и да откријат што може да предизвика потенцијални бариери за негова практична реализација.
- Поради генералност, методот за виртуелно нето-мерење во оваа дисертација го третира само трошокот за електрична енергија, но не и трошоците за дистрибуција и пренос на електрична енергија. Во иднина, треба да се направи проширување на предложениот метод, така што тој ќе ги опфаќа и овие елементи. Анализите може да се збогатат и со пресметки на тековите на моќност во дистрибутивната мрежа.
- Симулациите во дисертацијата се направени користејќи податоци од интернационални, јавно достапни бази. Во идните истражувања може подетално да се проучи применливоста на методот за виртуелна нето-наплата во национални услови.
- Теоретската рамка којашто е предложена за анализа на праведноста на методите за директно тргување, во иднина може да се дополни и примени во други научни истражувања кои се занимаваат со споделување на заеднички, ограничени ресурси.
- На крај, докторската дисертација ги проучува методите за колективно директно тргување во енергетски заедници. Меѓутоа, постојат и методите за билатерално директно тргување, а тие отвораат целосно нови истражувачки прашања за кои е потребна темелна анализа.

Литература

- [1] A. Caramizaru and A. Uihlein, “Energy Communities: An Overview of Energy and Social Innovation,” 2020.
- [2] T. Van Der Schoor and B. Scholtens, “Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015.
- [3] J. Lowitzsch, C. E. Hoicka, and F. J. van Tulder, “Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 122, 2020.
- [4] European Commission, “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.
- [5] 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.
- [6] T. Morstyn and M. D. McCulloch, “Peer-to-Peer Energy Trading,” in *Analytics for the Sharing Economy: Mathematics, Engineering and Business Perspectives*, 2020.
- [7] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, and H. V. Poor, “Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview,” *IEEE Trans. Smart Grid*, 2020.
- [8] J. Abdella and K. Shuaib, “Peer to peer distributed energy trading in smart grids: A survey,” *Energies*. 2018.
- [9] O. Abrishambaf, F. Lezama, P. Faria, and Z. Vale, “Towards transactive energy systems: An analysis on current trends,” *Energy Strateg. Rev.*, 2019.
- [10] O. Jogunola *et al.*, “Comparative analysis of P2P architectures for energy trading and sharing,” *Energies*, 2018.
- [11] C. Park and T. Yong, “Comparative review and discussion on P2P electricity trading,” in *Energy Procedia*, 2017.
- [12] C. Zhang, J. Wu, C. Long, and M. Cheng, “Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects,” in *Energy Procedia*, 2017.
- [13] W. Tushar *et al.*, “Peer-to-peer energy systems for connected communities: A review of recent advances and emerging challenges,” *Appl. Energy*, vol. 282, part, p. 116131, 2021.
- [14] S. Moroni, V. Alberti, V. Antonucci, and A. Bisello, “Energy communities in the transition to a low-carbon future: A taxonomical approach and some policy dilemmas,” *J. Environ. Manage.*, 2019.
- [15] T. Morstyn, N. Farrell, S. J. Darby, and M. D. McCulloch, “Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants,” *Nature Energy*. 2018.

- [16] Energy Commission, “Best practices on Renewable Energy Self-consumption,” 2015.
- [17] I. Abada, A. Ehrenmann, and X. Lambin, “Unintended consequences: The snowball effect of energy communities,” *Energy Policy*, 2020.
- [18] W. Tushar, C. Yuen, H. Mohsenian-Rad, T. Saha, H. V. Poor, and K. L. Wood, “Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: The potential of game-theoretic approaches,” *IEEE Signal Process. Mag.*, 2018.
- [19] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche, and E. Sorin, “Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019.
- [20] T. Morstyn, A. Teytelboym, and M. D. McCulloch, “Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 2, 2019.
- [21] C. Long, J. Wu, C. Zhang, L. Thomas, M. Cheng, and N. Jenkins, “Peer-to-peer energy trading in a community microgrid,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2018.
- [22] Y. Zhou, J. Wu, and C. Long, “Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework,” *Appl. Energy*, 2018.
- [23] N. Liu, X. Yu, C. Wang, C. Li, L. Ma, and J. Lei, “Energy-Sharing Model with Price-Based Demand Response for Microgrids of Peer-to-Peer Prosumers,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2017.
- [24] K. Chen, J. Lin, and Y. Song, “Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model,” *Appl. Energy*, vol. 242, 2019.
- [25] Y. Zhou, J. Wu, C. Long, and W. Ming, “State-of-the-Art Analysis and Perspectives for Peer-to-Peer Energy Trading,” *Engineering*, vol. 6, no. 7. 2020.
- [26] R. Moura and M. C. Brito, “Prosumer aggregation policies, country experience and business models,” *Energy Policy*, vol. 132, 2019.
- [27] I. Abada, A. Ehrenmann, and X. Lambin, “On the viability of energy communities,” *Energy J.*, vol. 41, no. 1, pp. 113–150, 2020.
- [28] T. Perger, L. Wachter, A. Fleischhacker, and H. Auer, “PV sharing in local communities: Peer-to-peer trading under consideration of the prosumers’ willingness-to-pay,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 66, 2021.
- [29] S. Norbu, B. Couraud, V. Robu, M. Andoni, and D. Flynn, “Modelling the redistribution of benefits from joint investments in community energy projects,” *Appl. Energy*, vol. 287, 2021.
- [30] A. Jafari, H. Ganjeh Ganjehlou, T. Khalili, and A. Bidram, “A fair electricity market strategy for energy management and reliability enhancement of islanded multi-microgrids,” *Appl. Energy*, vol. 270, 2020.
- [31] S. Cui, Y. W. Wang, Y. Shi, and J. W. Xiao, “A New and Fair Peer-to-Peer Energy Sharing Framework for Energy Buildings,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 5, 2020.
- [32] R. Jing, M. N. Xie, F. X. Wang, and L. X. Chen, “Fair P2P energy trading between

- residential and commercial multi-energy systems enabling integrated demand-side management,” *Appl. Energy*, vol. 262, 2020.
- [33] G. Chalkiadakis, E. Elkind, and M. Wooldridge, *Computational aspects of cooperative game theory*, 6th ed. Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning 5, 2011.
- [34] J. F. Nash, “The Bargaining Problem,” *Econometrica*, vol. 18, no. 2, 1950.
- [35] J. Wang, H. Zhong, C. Wu, E. Du, Q. Xia, and C. Kang, “Incentivizing distributed energy resource aggregation in energy and capacity markets: An energy sharing scheme and mechanism design,” *Appl. Energy*, vol. 252, 2019.
- [36] K. A. Melendez, V. Subramanian, T. K. Das, and C. Kwon, “Empowering end-use consumers of electricity to aggregate for demand-side participation,” *Appl. Energy*, vol. 248, 2019.
- [37] R. Guesnerie, “Pareto Optimality in Non-Convex Economies,” *Econometrica*, vol. 43, no. 1, 1975.
- [38] L. Mitridati, J. Kazempour, and P. Pinson, “Design and game-Theoretic analysis of community-Based market mechanisms in heat and electricity systems,” *Omega (United Kingdom)*, vol. 99, 2021.
- [39] L. Han, T. Morstyn, and M. McCulloch, “Incentivizing Prosumer Coalitions With Energy Management Using Cooperative Game Theory,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2019.
- [40] L. S. Shapley, “Cores of convex games,” *Int. J. Game Theory*, vol. 1, no. 1, 1971.
- [41] W. Lee, L. Xiang, R. Schober, and V. W. S. Wong, “Direct electricity trading in smart grid: A coalitional game analysis,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 7, 2014.
- [42] L. Han, T. Morstyn, and M. McCulloch, “Estimation of the Shapley Value of a Peer-to-peer Energy Sharing Game Using Multi-Step Coalitional Stratified Sampling,” *Int. J. Control Autom. Syst.*, pp. 1–10, 2021.
- [43] L. Han, T. Morstyn, and M. D. McCulloch, “Scaling Up Cooperative Game Theory Based Energy Management using Prosumer Clustering,” *IEEE Trans. Smart Grid*, 2020.
- [44] J. Li, Y. Ye, D. Papadaskalopoulos, and G. Strbac, “Computationally Efficient Pricing and Benefit Distribution Mechanisms for Incentivizing Stable Peer-to-Peer Energy Trading,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 2, 2021.
- [45] S. Chakraborty, T. Baarslag, and M. Kaisers, “Automated peer-to-peer negotiation for energy contract settlements in residential cooperatives,” *Appl. Energy*, vol. 259, 2020.
- [46] E. Oh and S. Y. Son, “Peer-to-Peer Energy Transaction Mechanisms Considering Fairness in Smart Energy Communities,” *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [47] F. Moret and P. Pinson, “Energy Collectives: A Community and Fairness Based Approach to Future Electricity Markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 5, 2019.
- [48] C. Long, Y. Zhou, and J. Wu, “A game theoretic approach for peer to peer energy trading,” in *Energy Procedia*, 2019, vol. 159.

- [49] Z. Li and T. Ma, “Peer-to-peer electricity trading in grid-connected residential communities with household distributed photovoltaic,” *Appl. Energy*, vol. 278, 2020.
- [50] L. S. Shapley, “17. A Value for n-Person Games,” in *Contributions to the Theory of Games (AM-28), Volume II*, 2016.
- [51] Z. Baharlouei, M. Hashemi, H. Narimani, and H. Mohsenian-Rad, “Achieving optimality and fairness in autonomous demand response: Benchmarks and billing mechanisms,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 968–975, 2013.
- [52] T. Bauwens, B. Gotchev, and L. Holstenkamp, “What drives the development of community energy in Europe? the case of wind power cooperatives,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 13, 2016.
- [53] G. Seyfang, J. J. Park, and A. Smith, “A thousand flowers blooming? An examination of community energy in the UK,” *Energy Policy*, 2013.
- [54] B. P. Koirala, Y. Araghi, M. Kroesen, A. Ghorbani, R. A. Hakvoort, and P. M. Herder, “Trust, awareness, and independence: Insights from a socio-psychological factor analysis of citizen knowledge and participation in community energy systems,” *Energy Res. Soc. Sci.*, 2018.
- [55] S. M. Hoffman and A. High-Pippert, “Community energy: A social architecture for an alternative energy future,” *Bull. Sci. Technol. Soc.*, 2005.
- [56] A. Carfora, R. V. Pansini, A. A. Romano, and G. Scandurra, “Renewable energy development and green public policies complementarities: The case of developed and developing countries,” *Renew. Energy*, vol. 115, 2018.
- [57] “REScoop.eu.” [Online]. Available: <https://www.rescoop.eu/>.
- [58] “PV-GEMEINSCHAFT.AT.” [Online]. Available: <http://pv-gemeinschaft.at/>.
- [59] B. P. Koirala, E. Koliou, J. Friege, R. A. Hakvoort, and P. M. Herder, “Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [60] Y. Kabalci, “A survey on smart metering and smart grid communication,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [61] M. Andoni *et al.*, “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100. 2019.
- [62] D. F. Dominković and G. Krajačić, “District cooling versus individual cooling in urban energy systems: The impact of district energy share in cities on the optimal storage sizing,” *Energies*, 2019.
- [63] B. van der Heijde, A. Vandermeulen, R. Salenbien, and L. Helsen, “Integrated optimal design and control of fourth generation district heating networks with thermal energy storage,” *Energies*, 2019.
- [64] M. Sonnberger, “Choosing the lesser of two evils?,” *Nat. Energy*, 2019.
- [65] I. Capellán-Pérez, N. Johanisova, J. Young, and C. Kunze, “Is community energy really non-existent in post-socialist Europe? Examining recent trends in 16 countries,”

- Energy Research and Social Science*. 2020.
- [66] N. Verkade and J. Höffken, “Collective energy practices: A practice-based approach to civic energy communities and the energy system,” *Sustain.*, 2019.
- [67] C. Romero-Rubio and J. R. de Andrés Díaz, “Sustainable energy communities: A study contrasting Spain and Germany,” *Energy Policy*, 2015.
- [68] C. Rae and F. Bradley, “Energy autonomy in sustainable communities - A review of key issues,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012.
- [69] E. M. Gui and I. MacGill, “Typology of future clean energy communities: An exploratory structure, opportunities, and challenges,” *Energy Res. Soc. Sci.*, 2018.
- [70] G. Dóci, E. Vasileiadou, and A. C. Petersen, “Exploring the transition potential of renewable energy communities,” *Futures*, 2015.
- [71] E. Heiskanen, M. Johnson, S. Robinson, E. Vadovics, and M. Saastamoinen, “Low-carbon communities as a context for individual behavioural change,” *Energy Policy*, 2010.
- [72] T. Pahkala, H. Uimonen, and V. Väre, “Flexible and customer-centred electricity system; Final report of the Smart Grid Working Group,” Helsinki, 2018.
- [73] F. Hanke and J. Lowitzsch, “Empowering vulnerable consumers to join renewable energy communities-towards an inclusive design of the clean energy package,” *Energies*, 2020.
- [74] D. Magnusson and J. Palm, “Come together-the development of Swedish energy communities,” *Sustain.*, 2019.
- [75] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, “Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region,” *Energy Convers. Manag.*, 2019.
- [76] J. Röder, D. Beier, B. Meyer, J. Nettelstroth, T. Stührmann, and E. Zondervan, “Design of renewable and system-beneficial district heating systems using a dynamic emission factor for grid-sourced electricity,” *Energies*, 2020.
- [77] H. ur Rehman, F. Reda, S. Paiho, and A. Hasan, “Towards positive energy communities at high latitudes,” *Energy Convers. Manag.*, 2019.
- [78] M. H. Kim, D. Kim, J. Heo, and D. W. Lee, “Techno-economic analysis of hybrid renewable energy system with solar district heating for net zero energy community,” *Energy*, vol. 187, p. 115916, 2019.
- [79] K. Kuriyan and N. Shah, “A combined spatial and technological model for the planning of district energy systems,” *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 21, pp. 111–131, 2019.
- [80] S. Letellier-Duchesne, S. Nagpal, M. Kummert, and C. Reinhart, “Balancing demand and supply: Linking neighborhood-level building load calculations with detailed district energy network analysis models,” *Energy*, 2018.
- [81] H. Dorotić, T. Pukšec, and N. Duić, “Multi-objective optimization of district heating and cooling systems for a one-year time horizon,” *Energy*, vol. 169, pp. 319–328, 2019.

- [82] D. F. Dominković, G. Stunjek, I. Blanco, H. Madsen, and G. Krajačić, “Technical, economic and environmental optimization of district heating expansion in an urban agglomeration,” *Energy*, vol. 197, 2020.
- [83] S. Ikeda and R. Ooka, “Application of differential evolution-based constrained optimization methods to district energy optimization and comparison with dynamic programming,” *Appl. Energy*, 2019.
- [84] F. Al-Noaimi, R. Khir, and M. Haouari, “Optimal design of a district cooling grid: structure, technology integration, and operation,” *Eng. Optim.*, 2019.
- [85] S. C. Shandiz, A. Denarie, G. Casseti, M. Calderoni, A. Frein, and M. Motta, “A simplified methodology for existing tertiary buildings’ cooling energy need estimation at district level: A feasibility study of a district cooling system in Marrakech,” *Energies*, 2019.
- [86] B. Fina, H. Auer, and W. Friedl, “Profitability of contracting business cases for shared photovoltaic generation and renovation measures in a residential multi-apartment building,” *J. Clean. Prod.*, vol. In Press, p. 121549, 2020.
- [87] B. Fina, H. Auer, and W. Friedl, “Profitability of PV sharing in energy communities: Use cases for different settlement patterns,” *Energy*, 2019.
- [88] B. Fina, A. Fleischhacker, H. Auer, and G. Lettner, “Economic Assessment and Business Models of Rooftop Photovoltaic Systems in Multiapartment Buildings: Case Studies for Austria and Germany,” *J. Renew. Energy*, 2018.
- [89] B. Fina, H. Auer, and W. Friedl, “Profitability of active retrofitting of multi-apartment buildings: Building-attached/integrated photovoltaics with special consideration of different heating systems,” *Energy Build.*, vol. 190, pp. 86–102, 2019.
- [90] M. B. Roberts, A. Bruce, and I. MacGill, “Opportunities and barriers for photovoltaics on multi-unit residential buildings: Reviewing the Australian experience,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019.
- [91] M. B. Roberts, A. Bruce, and I. MacGill, “A comparison of arrangements for increasing self-consumption and maximising the value of distributed photovoltaics on apartment buildings,” *Sol. Energy*, 2019.
- [92] M. B. Roberts, A. Bruce, and I. MacGill, “Impact of shared battery energy storage systems on photovoltaic self-consumption and electricity bills in apartment buildings,” *Appl. Energy*, 2019.
- [93] M. B. Roberts, N. Haghdadi, A. Bruce, and I. MacGill, “Characterisation of Australian apartment electricity demand and its implications for low-carbon cities,” *Energy*, 2019.
- [94] F. C. Robert, G. S. Sisodia, and S. Gopalan, “Sustainable trade-off between reliability and electricity prices for geographically isolated communities,” *Energy Reports*, 2019.
- [95] J. Koskela, A. Rautiainen, and P. Järventausta, “Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization,” *Appl. Energy*, 2019.
- [96] L. Novoa, R. Flores, and J. Brouwer, “Optimal renewable generation and battery storage sizing and siting considering local transformer limits,” *Appl. Energy*, 2019.
- [97] B. Fina, H. Auer, and W. Friedl, “Cost-optimal economic potential of shared rooftop

- PV in energy communities: Evidence from Austria,” *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 217–228, 2020.
- [98] H. Sadeghian and Z. Wang, “A novel impact-assessment framework for distributed PV installations in low-voltage secondary networks,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 2179–2194, 2020.
- [99] J. Liang, A. Shirsat, and W. Tang, “Sustainable community based PV-storage planning using the Nash bargaining solution,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2020.
- [100] A. Bosisio, M. Moncecchi, G. Cassetti, and M. Merlo, “Microgrid design and operation for sensible loads: Lacor hospital case study in Uganda,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2019.
- [101] M. M. Rafique, S. Rehman, and L. M. Alhems, “Developing zero energy and sustainable villages – A case study for communities of the future,” *Renew. Energy*, 2018.
- [102] H. Awad and M. Gül, “Optimisation of community shared solar application in energy efficient communities,” *Sustain. Cities Soc.*, 2018.
- [103] F. Spertino, S. Fichera, A. Ciocia, G. Malgaroli, P. Di Leo, and A. Ratclif, “Toward the complete self-sufficiency of an NZEBS microgrid by photovoltaic generators and heat pumps: Methods and applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2019.
- [104] G. Cardoso, T. Brouhard, N. DeForest, D. Wang, M. Heleno, and L. Kotzur, “Battery aging in multi-energy microgrid design using mixed integer linear programming,” *Appl. Energy*, 2018.
- [105] F. Boulaire *et al.*, “Benefit assessment of battery plus solar for customers and the grid,” *Energy Strateg. Rev.*, 2019.
- [106] E. Barbour, D. Parra, Z. Awwad, and M. C. González, “Community energy storage: A smart choice for the smart grid?,” *Appl. Energy*, 2018.
- [107] A. R. Murphy and A. S. Fung, “Techno-economic study of an energy sharing network comprised of a data centre and multi-unit residential buildings for cold climate,” *Energy Build.*, 2019.
- [108] S. Ruiz, J. Patino, A. Marquez-Ruiz, J. Espinosa, E. Duque, and P. Ortiz, “Optimal design of a diesel-pv-wind-battery-hydro pumped power system with the integration of electric vehicles in a colombian community,” *Energies*, 2019.
- [109] R. Rahmani, I. Moser, and A. L. Cricenti, “Modelling and optimisation of microgrid configuration for green data centres: A metaheuristic approach,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, 2020.
- [110] G. Comodi, A. Bartolini, F. Carducci, B. Nagarajan, and A. Romagnoli, “Achieving low carbon local energy communities in hot climates by exploiting networks synergies in multi energy systems,” *Appl. Energy*, 2019.
- [111] J. Cao, C. Crozier, M. McCulloch, and Z. Fan, “Optimal design and operation of a low carbon community based multi-energy systems considering EV integration,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2019.
- [112] H. Karunathilake, K. Hewage, J. Brinkerhoff, and R. Sadiq, “Optimal renewable energy supply choices for net-zero ready buildings: A life cycle thinking approach

- under uncertainty,” *Energy Build.*, 2019.
- [113] L. Moretti, M. Astolfi, C. Vergara, E. Macchi, J. I. Pérez-Arriaga, and G. Manzolini, “A design and dispatch optimization algorithm based on mixed integer linear programming for rural electrification,” *Appl. Energy*, 2019.
- [114] A. Q. Santos, Z. Ma, C. G. Olsen, and B. N. Jørgensen, “Framework for microgrid design using social, economic, and technical analysis,” *Energies*, 2018.
- [115] P. Huang *et al.*, “Transforming a residential building cluster into electricity prosumers in Sweden: Optimal design of a coupled PV-heat pump-thermal storage-electric vehicle system,” *Appl. Energy*, 2019.
- [116] C. Hachem-Vermette, F. Guarino, V. La Rocca, and M. Cellura, “Towards achieving net-zero energy communities: Investigation of design strategies and seasonal solar collection and storage net-zero,” *Sol. Energy*, 2019.
- [117] J. Wang, Z. Zhou, J. Zhao, J. Zheng, and Z. Guan, “Optimizing for clean-heating improvements in a district energy system with high penetration of wind power,” *Energy*, 2019.
- [118] A. Fleischhacker, G. Lettner, D. Schwabeneder, and H. Auer, “Portfolio optimization of energy communities to meet reductions in costs and emissions,” *Energy*, 2019.
- [119] B. Pickering and R. Choudhary, “District energy system optimisation under uncertain demand: Handling data-driven stochastic profiles,” *Appl. Energy*, 2019.
- [120] P. Sokolnikova *et al.*, “Net-zero multi-energy systems for Siberian rural communities: a methodology to size thermal and electric storage units,” *Renew. Energy*, 2020.
- [121] P. Simeoni, G. Nardin, and G. Ciotti, “Planning and design of sustainable smart multi energy systems. The case of a food industrial district in Italy,” *Energy*, 2018.
- [122] C. Wilke, A. Bensmann, S. Martin, A. Utz, and R. Hanke-Rauschenbach, “Optimal design of a district energy system including supply for fuel cell electric vehicles,” *Appl. Energy*, 2018.
- [123] A. N. Andersen and P. A. Østergaard, “A method for assessing support schemes promoting flexibility at district energy plants,” *Appl. Energy*, 2018.
- [124] R. Suciú, L. Girardin, and F. Maréchal, “Energy integration of CO₂ networks and power to gas for emerging energy autonomous cities in Europe,” *Energy*, 2018.
- [125] M. Sameti and F. Haghighat, “Integration of distributed energy storage into net-zero energy district systems: Optimum design and operation,” *Energy*, 2018.
- [126] M. A. Husted, B. Suthar, G. H. Goodall, A. M. Newman, and P. A. Kohl, “Coordinating microgrid procurement decisions with a dispatch strategy featuring a concentration gradient,” *Appl. Energy*, 2018.
- [127] X. Luo, Y. Liu, J. Liu, and X. Liu, “Optimal design and cost allocation of a distributed energy resource (DER) system with district energy networks: A case study of an isolated island in the South China Sea,” *Sustain. Cities Soc.*, 2019.
- [128] H. Dorotić, B. Doračić, V. Dobravec, T. Pukšec, G. Krajačić, and N. Duić, “Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 99, pp. 109–124, 2019.

- [129] N. Perez, P. Riederer, and C. Inard, “Development of a multiobjective optimization procedure dedicated to the design of district energy concept,” *Energy Build.*, 2018.
- [130] N. Good and P. Mancarella, “Flexibility in Multi-Energy Communities with Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, 2019.
- [131] H. J. Kooij *et al.*, “Between grassroots and treetops: Community power and institutional dependence in the renewable energy sector in Denmark, Sweden and the Netherlands,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 37, pp. 52–64, Mar. 2018.
- [132] M. Oteman, M. Wiering, and J. K. Helderma, “The institutional space of community initiatives for renewable energy: a comparative case study of the Netherlands, Germany and Denmark,” *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 4, no. 1, 2014.
- [133] V. Z. Gjorgievski, N. G. Chatzigeorgiou, V. Venizelou, G. C. Christoforidis, G. E. Georghiou, and G. K. Papagiannis, “Evaluation of Load Matching Indicators in Residential PV Systems-the Case of Cyprus,” *Energies*, vol. 13, no. 8, p. 1934, Apr. 2020.
- [134] J. Salom, J. Widén, J. Candanedo, I. Sartori, K. Voss, and A. Marszal, “Understanding net zero energy buildings: evaluation of load matching and grid interaction indicators,” in *proceedings of building simulation*, 2011, pp. 2514–2521.
- [135] S. Karytsas, D. Mendrinos, and C. Karytsas, “Measurement methods of socioeconomic impacts of renewable energy projects,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 410, no. 1.
- [136] M. M. Pillutla and J. K. Murnighan, “Fairness in bargaining,” *Social Justice Research*, vol. 16, no. 3. 2003.
- [137] H. R. Varian, “Two problems in the theory of fairness,” *J. Public Econ.*, vol. 5, no. 3–4, 1976.
- [138] J. S. Adams, “Inequity In Social Exchange,” *Adv. Exp. Soc. Psychol.*, vol. 2, no. C, 1965.
- [139] N. A. Saxena, G. Radanovic, K. Huang, D. C. Parkes, E. DeFilippis, and Y. Liu, “How do fairness definitions fare? Examining public attitudes towards algorithmic definitions of fairness,” in *AIES 2019 - Proceedings of the 2019 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society*, 2019.
- [140] R. K. Jain, D.-M. W. Chiu, and W. R. Hawe., “A quantitative measure of fairness and discrimination,” Hudson, MA, 1984.
- [141] R. Jain, A. Durreesi, and G. Babic, “Throughput fairness index: an explanation,” *ATM Forum Contrib.*, vol. 45, 1999.
- [142] D. Schmeidler, “The Nucleolus of a Characteristic Function Game,” *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 17, no. 6, 1969.
- [143] R. L. Fares and M. E., “The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility,” *Nat. Energy*, vol. 2, no. 2, p. 17001, 2017.
- [144] S. Theocharides, G. Makrides, A. Livera, M. Theristis, P. Kaimakis, and G. E. Georghiou, “Day-ahead photovoltaic power production forecasting methodology based on machine learning and statistical post-processing,” *Appl. Energy*, vol. 268, 2020.

- [145] R. Luthander, A. M. Nilsson, J. Widén, and M. Åberg, “Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency,” *Appl. Energy*, vol. 250, pp. 748–759, 2019.
- [146] S. C. K. Chau, J. Xu, W. Bow, and K. Elbassioni, “Peer-to-peer energy sharing: Effective cost-sharing mechanisms and social efficiency,” in *e-Energy 2019 - Proceedings of the 10th ACM International Conference on Future Energy Systems*, 2019.
- [147] G. C. Christoforidis *et al.*, “A model for the assessment of different Net-Metering policies,” *Energies*, 2016.
- [148] P. Chakraborty, E. Baeyens, P. P. Khargonekar, K. Poolla, and P. Varaiya, “Analysis of Solar Energy Aggregation under Various Billing Mechanisms,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, 2019.
- [149] C. Gallego-Castillo, M. Heleno, and M. Victoria, “Self-consumption for energy communities in Spain: A regional analysis under the new legal framework,” *Energy Policy*, vol. 150, 2021.
- [150] V. Reis, R. H. Almeida, J. A. Silva, and M. C. Brito, “Demand aggregation for photovoltaic self-consumption,” *Energy Reports*, 2019.
- [151] “Pecan Street Inc. Dataport.” [Online]. Available: <https://www.pecanstreet.org/dataport/>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [152] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, P. Liddell, R. Bean, and H. V. Poor, “Peer-to-Peer Energy Trading With Sustainable User Participation: A Game Theoretic Approach,” *IEEE Access*, 2018.
- [153] V. Venizelou, N. Philippou, M. Hadjipanayi, G. Makrides, V. Efthymiou, and G. E. Georghiou, “Development of a novel time-of-use tariff algorithm for residential prosumer price-based demand side management,” *Energy*, 2018.
- [154] Statistical Service, “Final Energy Consumption in Households,” 2009.
- [155] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,” *Appl. Energy*, no. 142, pp. 80–94, 2015.
- [156] E. McKenna, J. Pless, and S. J. Darby, “Solar photovoltaic self-consumption in the UK residential sector: New estimates from a smart grid demonstration project,” *Energy Policy*, vol. 118, pp. 482–491, 2018.
- [157] E. McKenna, E. Webborn, P. Leicester, and S. Elam, “Analysis of international residential solar PV self-consumption,” in *ECEEE 2019 Summer Study proceedings*, 2019.

