

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ СА ПРИВРЕМЕНИМ
СЕДИШТЕМ У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Милан В. Томовић

**ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНИХ
ТЕХНО-ЕКОНОМСКИХ ПАРАМЕТАРА
ХИБРИДНИХ ЕНЕРГЕТСКИХ
СИСТЕМА ЗА НАПАЈАЊЕ РИБЊАКА
УДАЉЕНИХ ОД
ЕЛЕКТРОДИСТРИБУТИВНЕ МРЕЖЕ**

Докторска дисертација

Косовска Митровица, 2026. године

UNIVERSITY OF PRIŠTINA IN KOSOVSKA MITROVICA

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

Milan V. Tomović

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL
TECHNO-ECONOMIC PARAMETERS OF
HYBRID ENERGY SYSTEMS FOR
SUPPLYING FISHPONDS LOCATED FAR
FROM THE ELECTRICITY
DISTRIBUTION NETWORK**

Doctoral Dissertation

Kosovska Mitrovica, 2026

Идентификациона страница докторске дисертације

| <i>I Аутор</i> | |
|--|---|
| Име и презиме: | Милан В. Томовић |
| Датум и место рођења: | 02.09.1985. године, Косовска Митровица |
| Садашње запослење: | Асистент на Академији струковних студија косовско метохијска, Одсек Звечан |
| <i>II Докторска дисертација</i> | |
| Наслов: | Одређивање оптималних техно-економских параметара хибридних енергетских система за напајање рибњака удаљених од електродистрибутивне мреже |
| Број страница: | 219 |
| Број табела: | 33 |
| Број слика: | 62 |
| Број библиографских података: | 168 |
| Установа и место где је рад израђен: | Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици |
| Научна област (УДК): | |
| Ментор: | др Дардан Климента, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици |
| <i>III Оцена и одбрана</i> | |
| Датум пријаве теме: | 08.02.2024. године |
| Број одлуке и датум прихватања научне заснованости теме докторске дисертације: | 24-369/3-9 15.05.2024. године |
| Комисија за оцену подобности теме и кандидата: | <ol style="list-style-type: none">др Драган Тасић, редовни професор, Електронски факултет, Универзитет у Нишу, председникдр Дардан Климента, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, члан – ментордр Бојан Перовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, члан |
| Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације: | <ol style="list-style-type: none">др Драган Тасић, редовни професор, Електронски факултет, Универзитет у Нишу, председникдр Дардан Климента, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, члан – ментордр Бојан Перовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, чландр Милош Миловановић, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, чландр Младен Бањанин, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Источном Сарајеву, Република Српска, Босна и Херцеговина, члан |
| Датум одбране дисертације: | |

Ова докторска дисертација је написана с неизмерном љубављу и поштовањем према највољенијим и никад прежаљеним оцу Витомиру, мајци Радунки и брату Милошу. Њихов допринос овој дисертацији био је подједнако важан колико и мој и због тога исту посвећујем њима с поруком да ће вечно живети у мом срцу и мојим мислима. Заувек!

Апстракт

Услед сталног пораста потрошње енергије широм света и ограничених залиха фосилних горива, кључно је развити иновативне системе обновљивих извора енергије (*ОИЕ*) који ће смањити зависност од конвенционалних извора енергије. Ванмрежни хибридни систем са *ОИЕ* може се користити за смањење зависности од традиционалних извора енергије и за побољшање поузданости система. Процес симулирања различитих конфигурација састављених од одговарајућих комбинација компоненти и њихових трошкова како би се добило приступачно, поуздано и ефикасно алтернативно снабдевање енергијом познат је као оптимизација хибридног система. Хибридна енергетска технологија може веома ефикасно и економично да задовољи енергетске потребе неке заједнице тежећи побољшању контроле, величине и врсте компоненти у том хибридном систему.

У овој докторској дисертацији представљени су резултати моделирања и пројектовања ванмрежног хибридног енергетског система за напајање пастрмског рибњака Јабланица, лоцираног на територији вароши Бољевац у источној Србији. Затим, одређено је оптимално решење с аспеката укупних нето садашњих трошкова (*NPC*–трошкови), нивелисаних трошкова производње енергије (*COE*–трошкови), емисије гасова стаклене баште (*GHG*) и укупне годишње производње електричне и топлотне енергије. За напајање дате локације разматране су конфигурације хибридног система састављене од комбинација микро хидроелектране (*μХЕ*) и фотонапонског (*PV*) генератора са: дизел генератором, претварачем и батеријом, при потрошњи електричне енергије од 24.79 kWh/day – постојећи систем (Сценарио I); когенеративним (*CHP*) дизел генератором, претварачем, батеријом, регулатором термичког оптерећења (*TLC*), бојлером, електролизером и резервоаром водоника, при потрошњи електричне и топлотне енергије од 203.78 kWh/day и 118.21 kWh/day, редом – предложени систем (Сценарио II). Код првог сценарија разматрана су следећа три случаја погона пропелерне S-турбине са фиксним лопатицама пропелера и: фиксним водећим лопатицама, за годишњи просечни проток – Случај 1; подесивим водећим лопатицама, за мање брзине протока – Случај 2; подесивим водећим лопатицама

за веће брзине протока – Случај 3. Код другог сценарија предложена је замена традиционалног дизел горива у *CHP* дизел генератору са: (а) биогасом произведеним из отпадног дрвета; (б) биогасом произведеним из комерцијалног буковог дрвета и (в) водоником. Свеобухватна техно-економска анализа разматраног хибридног система је извршена у рачунарском софтверу *HOMER Pro*, чији су резултати показали да се променом параметра пропелерне S-турбине уграђене у μXE као и заменом дизел горива у *CHP* дизел генератору са биогасом произведеним из отпадног дрвета могу значајно смањити укупни *NPC*-трошкови, нивелисани *COE*-трошкови и емисија *GHG*, а повећати укупна производња електричне и топлотне енергије у целом хибридном систему. Такође, у дисертацији је спроведена анализа осетљивости како би се квантификовале зависности улазних променљивих од излазних параметара перформанси система, као што су промене просечних електричних и топлотних оптерећења, каматне стопе, цене дизел горива, цене и количине дрвне биомасе, соларне ирадијансе и протока воде у реци, али са циљем добијања оптималног решења.

Кључне речи: ванмрежни хибридни систем, емисија *GHG*, *OIE*, оптимизација, рибњак, техно-економска анализа, укупни *NPC*-трошкови.

Abstract

Due to the constant increase in energy consumption around the world and limited quantity of fossil fuels, it is crucial to develop innovative systems based on Renewable Energy Sources (*RES*) that can reduce the reliance on conventional energy sources. A off-grid hybrid system with renewables can be utilized to reduce reliance on traditional energy sources and to enhance the system reliability. The process simulating different configurations composed of appropriate combination of components and their costs to obtain an affordable, reliable and efficient alternative energy supply is known as optimization of a hybrid system. Hybrid energy technology can meet the energy needs of a community very effectively tending to improve control, size and types of components in that hybrid system.

This doctoral dissertation presents the results of modeling and design of a off-grid hybrid energy system for power supply of trout pond Jablanica which is located in the area of municipality Boljevac, in eastern Serbia. In addition, it provides an optimal solution in terms of total Net Present Cost (*NPC*), Levelized Cost of Energy (*COE*), Greenhouse Gas (*GHG*) emissions and total annual electricity and heat productions. To power the given this dissertation considers location, the following configurations of hybrid systems combining a Micro-Hydro Power Plant (*MHPP*) and a Photovoltaic (*PV*) generator with: (Scenario I) a diesel generator, a converter and battery, for electricity consumption of 24.79 kWh/day – existing system; and (Scenario II) a Combined Heat and Power (*CHP*) diesel generator, a converter, a Thermal Load Controller (*TLC*), a boiler, a electrolyzer and a hydrogen tank, for consumptions of electricity and heat amounting to 203.78 kWh/day and 118.21 kWh/day, respectively – proposed system. The first scenario includes the following three cases of the propeller S-turbine with fixed propeller blades and: fixed guide vanes, for the annual average flow rate – Case 1; adjustable guide vanes, for smaller flow rates – Case 2; adjustable guide vanes, for higher flow rates – Case 3. The second scenario proposes to replace the conventional diesel fuel in the *CHP* diesel generator with: (a) biogas produced from waste wood; (b) biogas produced from commercial beech wood and (c) hydrogen. A comprehensive techno-economic analysis of the considered hybrid system is performed using software *HOMER Pro*. The results of this analysis shows that the change in

performance of the propeller S-turbine installed in the *MHPP*, as well as the replacement of diesel fuel in the *CHP* diesel generator with biogas produced from waste wood, can significantly reduce the total *NPC*, levelized *COE* and *GHG* emissions, and increase the total electricity and heat productions in the entire hybrid system. Also, in this dissertation, a sensitivity analysis is carried out to quantify the dependencies of the input variables on the output performance parameters of the system, such as variations in the average electrical and thermal loads, interest rate, diesel fuel price, prices and quantities of wood biomass, solar irradiance and water flow in the river, but with the aim of achieving an optimal solution.

Key words: fishpond, *GHG* emissions, off-grid hybrid system, optimization, *RES*, techno-economic analysis, total *NPC*.

САДРЖАЈ

| | |
|---|-----------|
| 1. УВОД | 12 |
| 1.1 Предмет и циљ истраживања | 18 |
| 1.2 Полазне хипотезе | 20 |
| 1.3 Методе истраживања | 21 |
| 1.4 Очекивани резултати и допринос | 22 |
| 1.5 Оквирни опис садржаја дисертације | 23 |
| 2. ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ПРЕТХОДНИХ ИСТРАЖИВАЊА | 26 |
| 2.1 Конфигурације хибридних система са μXE | 26 |
| 2.2 Конфигурације хибридних система са регулатором термичког оптерећења | 28 |
| 2.3 Конфигурације хибридних система заснованих на биомаси | 29 |
| 2.4 Конфигурације хибридних система заснованих на водонику | 34 |
| 2.5 Различите конфигурације хибридних система | 37 |
| 3. МОДЕЛИРАЊЕ МИКРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ПОМОЋУ СОФТВЕРА HOMER Pro | 40 |
| 3.1 Концептуални однос између симулације, оптимизације и анализе осетљивости | 40 |
| 3.1.1 Симулација | 42 |
| 3.1.2 Оптимизација | 45 |
| 3.1.3 Стратегија расподеле | 47 |
| 3.1.4 Анализа осетљивости | 49 |
| 3.1.5 Несигурност система | 50 |
| 3.1.6 Анализа осетљивости са часовним подацима | 54 |
| 3.2 Моделирање компонената хибридних система | 55 |
| 3.2.1 Оптерећење | 56 |
| 3.2.2 Ресурси | 58 |
| 3.2.3 Компоненте | 63 |
| 3.3 Математичко моделирање компонената хибридних система | 64 |
| 3.3.1 Хидротурбина и μXE | 64 |
| 3.3.2 PV генератор и соларна ирадијанса | 67 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.3.3 | Хибридни генератор | 78 |
| 3.3.4 | Претварач | 82 |
| 3.3.5 | Батерија | 83 |
| 3.3.6 | Регулатор термичког оптерећења (<i>TLC</i> –регулатор) | 89 |
| 3.3.7 | Бојлер | 90 |
| 3.3.8 | Електролизер | 91 |
| 3.3.9 | Резервоар водоника | 93 |
| 3.4 | Економско моделирање | 94 |
| 3.5 | Удео вишка електричне енергије | 97 |
| 3.6 | Удео обновљивих извора енергије | 98 |
| 3.7 | Остали трошкови погона и одржавања | 98 |
| 4. | ОПИС ПОСТОЈЕЋЕГ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА ПАСТРМСКОГ РИБЊАКА ЈАБЛАНИЦА СА КАРАКТЕРИСТИКАМА КОМПОНЕНТИ И РАСПОЛОЖИВИМ ОБНОВЉИВИМ РЕСУРСИМА | 101 |
| 4.1 | Дневни профил оптерећења | 103 |
| 4.2 | Потенцијал <i>ОИЕ</i> и перформансе појединих компоненти | 109 |
| 4.2.1 | Хидроенергија и μ <i>ХЕ</i> | 109 |
| 4.2.2 | Соларно зрачење и <i>PV</i> генератор | 111 |
| 4.2.3 | Биомаса и дизел генератор | 114 |
| 4.2.4 | Претварач | 118 |
| 4.2.5 | Батерија | 119 |
| 4.2.6 | Регулатор термичког оптерећења (<i>TLC</i> –регулатор) | 120 |
| 4.2.7 | Бојлер | 121 |
| 4.2.8 | Електролизер | 121 |
| 4.2.9 | Резервоар водоника | 123 |
| 4.3 | Методолошки дијаграм тока и стратегија управљања енергијом у ванмрежном хибридном енергетском систему | 125 |
| 5. | ХИБРИДНИ СИСТЕМ μ<i>ХЕ</i>-<i>PV</i> ГЕНЕРАТОР-ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР- ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА–СЦЕНАРИО I: ОПТИМИЗАЦИЈА ПЕРФОРМАНСИ ХИДРОТУРБИНЕ | 131 |
| 5.1 | Студија случаја | 131 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2 | Резултати анализе и дискусија | 134 |
| 6. | ХИБРИДНИ СИСТЕМ μХЕ-РV ГЕНЕРАТОР-СНР ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР-ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА-TLC-РЕГУЛАТОР-БОЈЛЕР- СЦЕНАРИО II: ОПТИМИЗАЦИЈА НАПАЈАЊА ЕЛЕКТРИЧНОМ И ТОПЛОТНОМ ЕНЕРГИЈОМ | 143 |
| 6.1 | Студија случаја | 143 |
| 6.2 | Резултати анализе и дискусија | 144 |
| 7. | ХИБРИДНИ СИСТЕМ μХЕ-РV ГЕНЕРАТОР-СНР ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР-ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА-TLC-РЕГУЛАТОР-БОЈЛЕР- ЕЛЕКТРОЛИЗЕР-РЕЗЕРВОАР ВОДОНИКА-СЦЕНАРИО II: ОПТИМИЗАЦИЈА НАПАЈАЊА ЕЛЕКТРИЧНОМ И ТОПЛОТНОМ ЕНЕРГИЈОМ | 153 |
| 7.1 | Студија случаја | 153 |
| 7.2 | Резултати анализе и дискусија | 155 |
| 7.3 | Резултати анализе осетљивости | 163 |
| 8. | ЗАКЉУЧАК И ПРАВЦИ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА | 170 |
| | ЛИТЕРАТУРА | 177 |
| | ПРИЛОГ А. ТАБЕЛА НОВЧАНОГ ТОКА ЗА ОПТИМАЛНУ КОНФИГУРАЦИЈУ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА – СЦЕНАРИО I | 197 |
| | ПРИЛОГ Б. ТАБЕЛА НОВЧАНОГ ТОКА ЗА ОПТИМАЛНУ КОНФИГУРАЦИЈУ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА – СЦЕНАРИО II | 199 |
| | ПРИЛОГ В. СКРАЋЕНИЦЕ И ОСНОВНЕ ОЗНАКЕ, ПРЕМА РЕДОСЛЕДУ ПОЈАВЉИВАЊА | 201 |
| | ПРИЛОГ Г. СПИСАК ТАБЕЛА | 210 |
| | ПРИЛОГ Д. СПИСАК СЛИКА | 212 |
| | ПРИЛОГ Ђ. СПИСАК ЈЕДНАЧИНА | 216 |
| | Прилог 1 | i |
| | Прилог 2 | ii |
| | Прилог 3 | iii |
| | Прилог 4 | iv |

1. УВОД

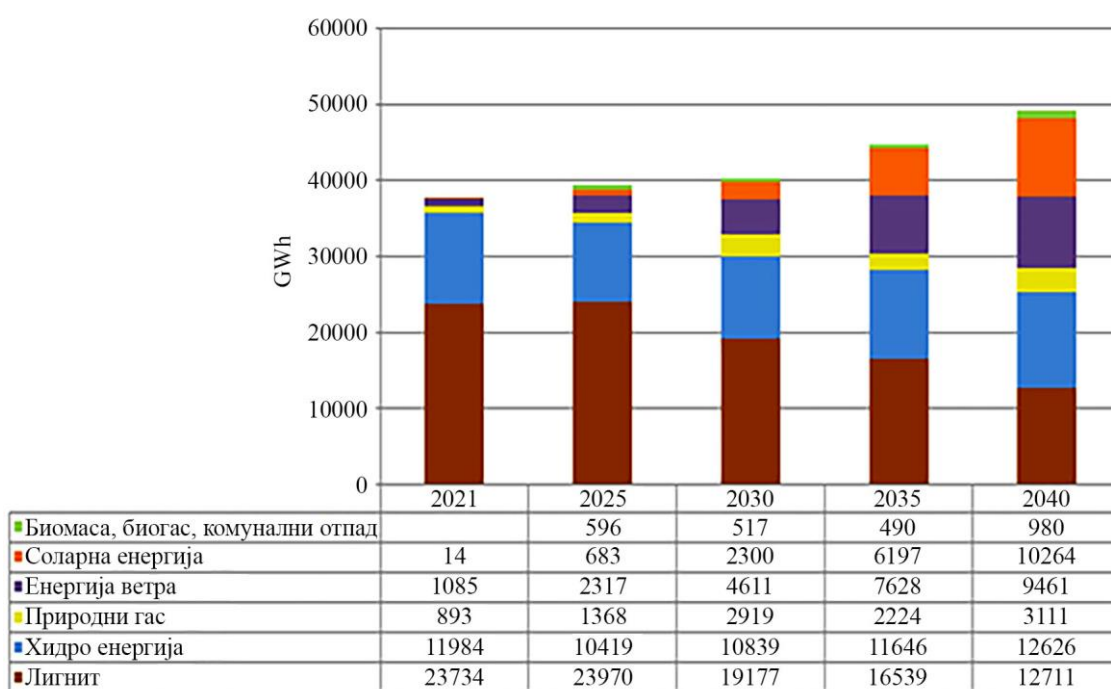
Научници већ дужи низ година опомињу да проблем глобалног загревања постоји још од почетка индустријске револуције, када су људи почели да сагоревају велике количине фосилних горива и да су данашње емисије угљендиоксида (CO_2) за око 50 процената веће од првобитних. Урбанизација, пољопривреда, индустријска производња и ефекти стаклене баште су водећи узроци климатских промена широм света [1]. Један од значајних фактора који доприносе глобалном загревању је и начин производње енергије, где се у постројењима углавном користе угаљ, гас и нафта [2]. Глобална потрошња енергије, емисија гасова стаклене баште (*GHG* од енг. *Green House Gases*) и загађење ваздуха који непрестано расту, захтевају развој и увођење нових, алтернативних енергената који ће заменити фосилна горива или утицати на њихово мање коришћење. Такође, геополитички односи мењају међународне односе у области енергетике, а нарочито на тлу Европе. Због тога се као задатак намеће обезбеђивање довољних количина енергије и енергената за функционисање привреде и друштва. Као одговор на изазове климатских промена и глобалног загревања у свету последњих деценија дешавају се крупне промене у енергетском сектору које се најчешће описују као „енергетска транзиција”. У ужем смислу, овај појам се односи на напуштање фосилних горива као основног извора енергије и прелазак на обновљиве изворе енергије (*OIE* од енг. *Renewable Energy Sources*) и обухвата промене у технологији производње електричне енергије, али и у њеној трансформацији, дистрибуцији и потрошњи. Да би енергетска транзиција била остварива, неопходно је дефинисати одговарајући инвестициони оквир у којем ће се промовисати декарбонизација сектора. Како би се додатно унапредио амбијент за инвестиције усмерене ка климатски неутралном енергетском развоју, Стратегијом [3], предлаже се постепено увођење наплате емисије *GHG*, у својству кључног економског механизма за регулацију брзине енергетске транзиције. Визија коју предлаже и промовише Стратегија [3] јесте да Република Србија до 2050. године остане енергетски безбедна и да њен енергетски сектор у највећој могућој мери буде угљенично неутралан. То је визија чистије, ефикасније, тржишно и социјално утемељене енергетике, која се

пропулзивно развија и представља окосницу технолошког, економског и укупног друштвеног развоја. Енергетска безбедност, декарбонизација и економска конкурентност енергетског сектора јесу општи приоритети енергетског развоја и принципи на којима се заснива енергетска политика Републике Србије. Интензивна примена мера енергетске ефикасности у свим областима потрошње енергије и енергетским секторима, као и истраживање и иновације у енергетици јесу приоритети за одрживост енергетске политике. Наведени приоритети садрже све дугорочне циљеве енергетске политике дефинисане Законом о енергетици, који заједнички треба да обезбеде остварење општег циља Стратегије [3], а то је сигурно и приступачно снабдевање енергијом и енергентима становништва и привреде, уз прогресивно смањење емисије *GHG* и других негативних утицаја по животну средину и здравље људи.

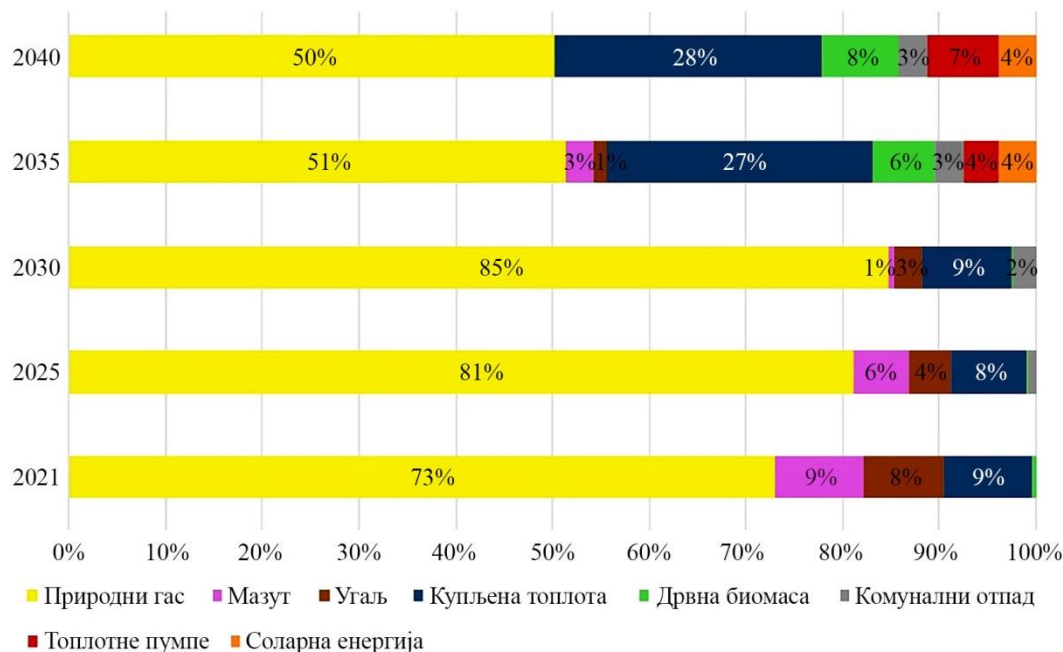
Услед смањења залиха фосилних и нуклеарних горива и све веће бриге за животну средину, пажња целог света је усмерена ка алтернативним технологијама за производњу електричне енергије [4]. Република Србија као потписница Уговора о Енергетској заједници и земља кандидат за приступање у Европској унији (*EU* од енгл. *European Union*), која је подржала Париски споразум о климатским променама и потписала Софијску декларацију о Зеленој агенди за Западни Балкан, има међународну обавезу да крене путем постепеног укидања енергије засноване на угљу, са специфичним циљевима и прекретницама. У складу са тим Република Србија се обавезала да ће до 2030. године смањити емисију *GHG* за 33.3% у односу на 1990. годину, повећати учешће из *OIE* на најмање 32%, унапредити енергетску ефикасност за најмање 32.5%, као и ограничити пораст средње глобалне температуре испод 2% [5,6]. У вези с тим, највећи проценат емисије *GHG* од 77.69% потиче из енергетског сектора због коришћења фосилних горива, затим следе сектор пољопривреде који доприноси укупним емисијама са 14.64%, сектор индустријских процеса са 5.28% и сектор комуналног и муљног отпада са 2.39% [6]. Један од начина да се смањи емисија *GHG* као и потрошња фосилних горива је да се повећа коришћење *OIE* [3]. На Слици 1.1 приказана је пројекција промене структуре енергената у производњи енергије у Републици Србији за период од 2021. до 2040. године. Кључно стратешко опредељење у производњи електричне енергије се односи на значајно

повећање инсталисаних капацитета који користе *ОИЕ*, пре свега електрана на ветар, соларних електрана и хидроелектрана, као и паралелно и постепено смањење производње електричне енергије у термоелектранама које користе лигнит (Слика 1.1а). Производња топлотне енергије доминантно се заснива на природном гасу, мазуту и угљу са тенденцијом постепеног смањења до 2040. године, и постепеног повећања производње из дрвне биомасе, комуналног отпада и енергије Сунца (Слика 1.1б). Уз то, од посебног значаја су топлотне пумпе јер у системима даљинског грејања омогућавају коришћење енергије која се ни на који други начин не би могла искористити (локално расположиву нискотемпературну отпадну топлоту из индустрије, комерцијалних делатности, постројења за пречишћавање отпадних вода, енергију површинских вода и сл.), где је од значаја и топлота купљена због сигурности снабдевања потрошача топлотном енергијом.

Што се тиче техничког потенцијала *ОИЕ* у Републици Србији он је значајан и процењен на 10.288 милиона тона еквивалентне нафте (toe) годишње, од чега се 3.196 милиона toe годишње налази у биомаси, 2.622 милиона toe годишње у енергији Сунца, 2.593 милиона toe годишње у енергији ветра, 1.547 милиона toe годишње у хидропотенцијалу и 0.33 милиона toe годишње у постојећим геотермалним изворима [3].



(a)



(б)

Слика 1.1 Пројекција промене структуре енергената у производњи: електричне енергије (а) и топлотне енергије (б) [3]

Процентуални удео појединих *ОИЕ* у укупном енергетском потенцијалу приказан је на Слици 1.2. Највише експлоатисани енергетски извори из ове групе у Републици Србији током прошле деценије били су вода и сунце, понајвише због повољних подстицајних програма, изразитог технолошког напретка и доступности *ОИЕ* [7].



Слика 1.2 Процењени технички потенцијал *ОИЕ* у Републици Србији, за 2024. годину

Могућности примене водоника и његов значај у процесу транзиције и декарбонизације енергетског сектора је велика [3]. Када и колико брзо ће водоник завладати овом транзицијом зависи од читавог низа фактора – расположивости електричне енергије из *ОИЕ* и трошкова производње „зеленог” водоника, трошкова развоја инфраструктуре за транспорт, трошкова набавке транспортних средстава која користе водоник, безбедности коришћења и др. Тзв. „зелени” водоник, који се производи електролизом воде помоћу електричне енергије добијене из *ОИЕ*, сматра се еколошки чистим горивом са становишта емисије CO_2 , степен корисности добијања водоника електролизом воде је око 70% и могуће га је користити у практично свим енергетским системима: у термоенергетским постројењима, горивним ћелијама, гасним турбинама, моторима са унутрашњим сагоревањем, гасним уређајима за домаћинства, индустрији итд. Садашњи високи трошкови производње зеленог водоника ограничавају могућност његове комерцијализације и не оправдавају увођење великих подстицаја за његову производњу, развој инфраструктуре и примену. Тако ће остати све док се подстицаји не буду могли имплементирати у домаћу привредну структуру и доприносити њеном развоју. Према Нацрту водоничне стратегије [8], Република Србија би од 2025. године требало да започне производњу водоника из *ОИЕ*, а затим да до 2035. годишње производи око 5100 тона, а до 2050. укупно 20600 тона.

Поред испуњавања евидентних глобалних циљева за смањење емисије *GHG* [9] и умањење опште зависности човечанства од фосилних горива којих има све мање, употреба *ОИЕ* показала се прикладном и за напајање изолованих или удаљених локација чије повезивање са електродистрибутивном мрежом није економски исплативо, или је практично немогуће. Због неприступачности појединих изолованих или удаљених локација, електрификација истих је увелико отежана или је прескупа. Географски и просторни размештај корисника електричне енергије утичу на могућност извођења прикључака на електроенергетску мрежу. Чак и у случају прикључка на електроенергетску мрежу, због удаљености корисника квалитет електричне енергије је често под знаком питања, а снабдевање није загарантовано. У изразито непогодној ситуацији налазе се потрошачи који спадају у категорију приоритетних

потрошача, а потребна им је висока расположивост електричне енергије. Потрошачи на таквим местима могу бити сеоска домаћинства, школе, болнице, дрumsка расвета и комунални центри [10]. Такође, метеоролошки и геолошки сензори, као и телекомуникациона опрема у удаљеним подручјима припадају групи потрошача са потребом за непрекидним напајањем [11]. Дакле, главни разлози за коришћење *ОИЕ* у удаљеним руралним подручјима су: високи трошкови производње, преноса и дистрибуције електричне енергије добијене из конвенционалних извора, слаба потражња за енергијом, веома низак ниво индустријализације, високи трошкови погона и одржавања електроенергетске мреже, падови напона услед преноса на велике даљине, као и велика емисија *GHG* (CO_2 , NO_x , SO_x) [12].

У прошлости су се проблеми снабдевања изолованих или удаљених приоритетних потрошача решавали помоћу дизел генератора, али потреба за честим одржавањем и обнављањем залиха, као и сталан пораст цене нафтних деривата, учинили су дизел генераторе неприкладним, посебно у условима када је могуће реализовати хибридни систем који се у потпуности може напајати из *ОИЕ* [13,14]. Осим тога, у нафтним дериватима се налази висок садржај сумпора и угљеника па се приликом сагоревања ослобађа и велика количина штетних гасова у атмосферу што загађује животну средину. Примена више врста *ОИЕ* омогућава непрекидно снабдевање енергијом чији се вишак складишти у батеријама. У оваквим конфигурацијама, батерије преузимају улогу дизел генератора, апсорбују сва колебања у производњи *ОИЕ* и одржавају напон код потрошача унутар дозвољених граница. Главни проблем при употреби *ОИЕ* је њихова стохастичност и непоузданост, односно немогућност гаранције за инсталисане снаге, чиме се нарушава расположивост електричне енергије према крајњем кориснику. Коришћењем само једне врсте *ОИЕ* потрошња се превише излаже стохастичности временских услова, док се интеграцијом различитих извора енергије у јединствен хибридни систем омогућава знатно већа расположивост електричне енергије, а самим тим и покривеност потрошње. Коначно, употребом система за складиштење енергије из неког управљивог извора могуће је остварити максималну расположивост електричне енергије.

Концептом хибридног система интегришу се разни извори енергије у јединствен систем са циљем повећања расположивости енергије. Хибридни систем садржи најмање два различита извора енергије као и систем/јединицу за складиштење енергије. Извори који се користе у хибридним системима могу бити *ОИЕ* и необновљиви извори енергије. *ОИЕ* који се примењују у хибридним системима су фотонапонски (*PV* од енг. *Photovoltaic*) генератори и микро хидроелектране (*μХЕ* од енг. *Micro-Hydro Power Plant*), а од традиционалних извора енергије најзаступљенији је дизел генератор. Складиштење енергије се најчешће врши помоћу електрохемијских батерија, док се користи и резервоар водоника у спрези са електролизером и горивним ћелијама. Зависно од врсте и капацитета *ОИЕ* који су доступни на некој локацији, као и од профила потрошње електричне енергије пројектује се хибридни систем. Избором извора енергије одређује се могућа покривеност потрошње. Уколико потрошњу није могуће покрити из тренутне производње користе се резервоари енергије, где се енергија складишти када је енергија из извора доступна у већој количини од оне коју тренутна потрошња захтева. Енергија из резервоара се троши у тренуцима када нема производње, када је производња недовољна или када је то нужно из техничких разлога. На крају, одређивањем оптималних техно-економских параметара пројектованог хибридног система долази се до коначне конфигурације система.

1.1 Предмет и циљ истраживања

Ово истраживање спроведено је са циљем одређивања оптималних конфигурација хибридних система за напајање пастрмског рибњака Јабланица, локације на територији вароши Бољевац у источној Србији [15]. Дата локација нема могућност прикључења на електродистрибутивну мрежу и одговарајући хибридни систем представља једино изводљиво решење за напајање исте електричном и топлотном енергијом. Разматрана је примена следећих генераторских и других компоненти хибридних система: хидроенергетски систем, *PV* систем, традиционални или когенеративни (*CHP* од енг. *Combined Heat and Power*) дизел генератор на дизел гориво, биогаз и водоник, регулатор термичког

оптерећења (*TLC* од енг. *Thermal Load Controller*), електролизер, резервоар водоника, двосмерни претварач (наизменична струја (*AC* од енг. *Alternating Current*)/једносмерна струја (*DC* од енг. *Direct Current*) и *DC/AC*) и батеријски систем.

Главни и основни циљ ове докторске дисертације је да се на конкретном примеру, у односу на примену дизела и других врста горива (као што су бензин, природни гас и лож уље за добијање електричне енергије), демонстрира значај коришћења енергије из *ОИЕ*, тзв. „зелене енергије”, чијом се применом у хибридном системима могу значајно смањити укупни нето садашњи трошкови (*NPC* од енг. *Net Present Cost*), нивелисани трошкови производње енергије (*COE* од енг. *Cost of Energy*) и емисија *GHG* [16]. Дакле, основни циљ истраживања биће одређивање оптималних техно-економских параметара хибридных система који се добијају комбинацијом *ОИЕ* (хидроенергије, соларне и биомасе) са другим компонентама система. Конкретно, биће то оптимизација параметара хидротурбине, угла нагиба и азимута *PV* панела и анализа осетљивости, којим ће се показати како различите вредности улазних параметара, као што су промене референтне каматне стопе, цене дизел горива, соларне ирадијансе и протока воде у реци, утичу на излазне параметре/перформансе хибридных система [17-22]. Спровођењем свеобухватне техно-економске анализе изабраће се најбоље конфигурације хибридных система у погледу минимизације укупних *NPC*–трошкова за цео животни век система, нивелисаних *COE*–трошкова и емисије *GHG*. Истовремено ће се извршити максимизација производње електричне и топлотне енергије, као и процентуалног удела *ОИЕ* у укупној производњи. Предложене нове конфигурације хибридных система разликују се од других типова хибридных система из литературе по томе што за напајање изолованог пастрмског рибњака користе μXE која се налази уз таложник за воду из рибњака и која ту воду користи за свој рад. Као студија случаја разматраће се постојећи пастрмски рибњак Јабланица, под претпоставком да се напаја помоћу сваког од предложених хибридных система понаособ. Дата студија случаја изабрана је због значаја пастрмских фарми у производњи здраве хране, као и растуће потражње за пастрмком, шараном и другим врстама слатководне рибе.

1.2 Полазне хипотезе

Претпоставља се да је оптимизацијом параметара перформанси цевне турбине уграђене у $\mu ХЕ$ могуће повећати снагу и енергетску ефикасност турбине, као и побољшати перформансе сваког од хибридних система који ће се разматрати [23,24]. Према литератури, постоје различите хидротурбине и њихове модификације, као што су гравитациона вртложна водена турбина [25], Францисова турбина [26,27], Савонијусова хидрокинетичка турбина [28,29], цевна турбина [23], пропелерна S-турбина [23], итд. Међутим, утицај промене параметара перформанси турбине на неки хибридни систем и конкретна имплементација једног таквог система разматрани су само у [23,24]. Да би неки *PV* систем производио максималну количину електричне енергије, онда исти мора да прима максимално могућу количину оптичког зрачења Сунца. Правилном оријентацијом *PV* модула, која се изводи користећи два параметра (нагиб и азимут), може се апсорбовати максимална количина зрачења од оне која доспева на површину *PV* модула и остварити максимална производња електричне енергије, што даље води повећању укупне ефикасности производње електричне енергије у хибридним системима који су разматрани у [30]. Поред тога, уградњом *TLC*-регулатора у неки ванмрежни систем, вишак произведене електричне енергије (*EE* од енгл. *Excess Electricity*) у неком *OIE* може се претворити у топлотну енергију, а самим тим се могу смањити укупни трошкови производње енергије у разматраном хибридном систему. Такође, електрична енергија из електрохемијских батерија се помоћу електролизе може трансформисати у енергију водоника и ускладиштити у резервоар, који се затим може користити као гориво за *CHP* дизел генератор. Даље се претпоставља да се у 5 затворених базена од укупно 15 хранилишта пастрмског рибњака Јабланица може узгајати и шаран. За његов правилан развој најзначајнија је температура воде која се може загревати помоћу *TLC*-регулатора, *CHP* дизел генератора и бојлера [31].

Коначно, претпоставља се да се заменом традиционалног дизел горива, које се користи у *CHP* дизел генератору на биогаз (добијен из биомасе), могу смањити укупни трошкови било којег од разматраних хибридних система, као и укупна емисија *GHG* [32]. Велики број истраживања бавио се анализом

хибридних система који користе биогаз из пољопривредне биомасе [33-51], али нема података о коришћењу биогаза добијеног пиролизом буковог или отпадног дрвета (грана, коре, необрађених дрвних остатака и сл.) који ће се овде разматрати.

1.3 Методе истраживања

Критеријум за избор најбољих конфигурација хибридних енергетских система за предложену студију случаја (тј. локацију) заснован је на компромису између економичности, поузданости, одрживости и техничког аспекта. Да би се остварили циљеви ове докторске дисертације истраживачки рад је обухватио следеће:

- Преглед и анализу научне литературе из области *OIE*, где је посебна пажња посвећена научним радовима објављеним у престижним међународним часописима који се баве оптимизацијом ванмрежних хибридних система.
- Примену аналитичког софтвера за хибридную оптимизацију више обновљивих извора за генерисање електричне енергије (*HOMER* од енг. *Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables*) који користи алгоритме за оптимизацију и анализу осетљивости и који је нашао своју примену у развоју микроенергетских система [52,53].
- Креирање блок дијаграма за извођење симулација и проучавање различитих конфигурација хибридних система који ће се разматрати.
- Примену математичких метода за моделирање компонената хибридних система.
- Прикупљање података од власника рибњака о потрошњи електричне и топлотне енергије за потребе пословне зграде, као и уређаја који се користе за загревање воде у базенима рибњака и сл.
- Израчунавање средњих месечних протока воде за Радованску реку на основу вишегодишњих мерења [54], као и израчунавање средње месечне количине дрвне биомасе на основу доступних података од власника рибњака.

- Учитавање података из базе *NASA Surface Meteorology and Solar Energy* [55] о температури ваздуха и интензитету соларног зрачења са просечним месечним вредностима и индексом прозачности за варош Бољевац, општину у којој се налази рибњак Јабланица.
- Претраживање каталога и других публикација [56-62] са циљем одабира компоненти са стварним тржишним ценама које укључују инвестиционе трошкове, трошкове замене, трошкове погона и одржавања (*П&О* од енг. *Operation and Maintenance*), као и њихове спецификације.
- Примену комерцијалног програма *MS Excel* за табелирање и графичко приказивање резултата.
- Практичну реализацију предложених иновативних решења.

1.4 Очекивани резултати и допринос

Имајући у виду актуелност развоја и анализе хибридних енергетских система са *ОИЕ*, научни доприноси и резултати ове дисертације су:

- Иновативно решење и предлог новог хибридног система $\mu\text{ХЕ-РV}$ генератор-дизел генератор-претварач-батерија за снабдевање конкретног удаљеног рибњака електричном енергијом.
- Иновативно решење и предлог новог хибридног система $\mu\text{ХЕ-РV}$ генератор-*СНР* дизел генератор-претварач-батерија-*ТЛС*–регулатор-бојлер за снабдевање конкретног удаљеног рибњака електричном и топлотном енергијом.
- Иновативно решење и предлог новог хибридног система $\mu\text{ХЕ-РV}$ генератор-*СНР* дизел генератор на биогаз или водоник-претварач-батерија-*ТЛС*–регулатор-бојлер-електролизер-резервоар водоника за снабдевање конкретног удаљеног рибњака електричном и топлотном енергијом.
- Унапређивање истраживања у вези са имплементацијом *ОИЕ* у ванмрежне хибридне системе за изоловане и удаљене локације.
- Оптимизација и анализа изводљивости ванмрежних хибридних енергетских система за различите сценарије и погонске услове пастрмског рибњака Јабланица.

- Утврђивање директне повезаности између појединачних перформанси хидротурбине, угла нагиба и азимута *PV* модула и перформанси целог хибридног система.
- Утврђивање зависности емисије *GHG* од врсте горива коришћеног у *CHP* дизел генератору.
- Компаративна анализа више могућих конфигурација хибридних система састављених од хидроенергетског система, фотонапонског система, *CHP* дизел генератора на дизел гориво, биогаз и водоник, регулатора термичког оптерећења, електролизера, резервоара водоника, претварача и батерија.
- Извођење закључака, предлог најбољих конфигурација хибридних система с аспекта максималне производње енергије (електричне и топлотне) и повећаног удела *OIE* (*RF* од енг. *Renewable Fraction*), уз минимизацију укупних *NPC*–трошкова, нивелисаних *COE*–трошкова и емисију *GHG*.

1.5 Оквирни опис садржаја дисертације

После наслова, апстракта и кључних речи датих на српском и енглеском језику презентован је садржај докторске дисертације. Дисертација садржи укупно осам тематских целина.

У Уводу дисертације представљени су предмет и циљеви дисертације. Поред тога, представљени су методологија, структура и организација саме дисертације, као и применљивост Стратегије и Уредби које се односе на коришћење *OIE* и емисију *GHG* у Републици Србији до 2040. године са пројекцијама до 2050. године.

У другом поглављу дисертације дат је преглед литературе која се бави досадашњом применом софтвера *HOMER Pro* за проналажење оптималних конфигурација ванмрежних хибридних система. У овом поглављу је дат преглед резултата оптималних конфигурација хибридних система са посебним нагласком на конфигурације система које у себи садрже барем једну компоненту, као што су: μXE , *TLC*–регулатор, генератор на биогаз или водоник.

У трећем поглављу представљен је концепт везе између симулације, оптимизације и анализе осетљивости у софтверу *HOMER Pro*, као и физичко и

математичко моделирање компонената хибридних система, моделирање укупних *NPC*–трошкова, трошкова производње енергије. Уз то, представљени су и модели помоћу којих се израчунавају вишак произведене енергије и удео *OIE* у укупној производњи.

У четвртом поглављу дат је опис разматраног хибридног система, као и детаљи о потенцијалу *OIE* на датој локацији. Такође, у овом поглављу су представљени технички и економски подаци појединих компонената хибридних система преузетих са интернет страница, неопходних за извршавање методолошког дијаграма тока и стратегије управљања енергијом у разматраном ванмрежном хибридном енергетском систему.

У петом поглављу извршена је анализа хибридног система μ *XE-PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија уз посебан осврт на оптимизацију хидротурбине и промену њених параметара са циљем ефикаснијег погона. Разматрана су следећа два типа пропелерних *S*-турбина (I и II) и три различита случаја погона (1, 2 и 3): (I) хидротурбина са фиксним лопатицама пропелера и фиксним водећим лопатицама за (1) погон са просечним средњим протоком воде кроз таложни базен, као и (II) хидротурбина са фиксним лопатицама пропелера и подесивим водећим лопатицама за: (2) погон са мањим протоком воде кроз таложни базен (тј. нижим степеном ефикасности хидротурбине у летњим месецима и сушним годинама), односно за брзину протока који је 20% мањи од годишњег просечног протока кроз таложни базен; (3) погон са већим протоком воде кроз таложни базен (тј. ефикаснији рад хидротурбине у зимским месецима).

Са променом функције рибака (тј. са повећањем понуде врста слатководне рибе) мења се оптерећење, а самим тим долази и до промене комбинације компоненти у систему. Даље, у шестом поглављу извршена је анализа хибридног система μ *XE-PV* генератор-*CHP* дизел генератор-претварач-батерија-*TLC*–регулатор-бојлер. Посебна пажња је посвећена искоришћењу регенерисане отпадне топлоте из *CHP* дизел генератора и вишка електричне енергије из *OIE* чија је функција покривање потреба за топлотном енергијом. Показано је да ово може додатно допринети смањењу укупних *NPC*–трошкова и емисије *GHG* у околину, чиме је указано на неопходност примене *TLC*–регулатора у ванмрежним хибридним системима.

У седмом поглављу разматрана је конфигурација која се састоји само од *ОИЕ*, дакле без *СНР* дизел генератора на дизел гориво. Анализиран је хибридни систем $\mu\text{ХЕ-РV}$ генератор-*СНР* дизел генератор на биогаз или водоник-претварач-батерија-*ТLС*-регулатор-бојлер-електролизер-резервоар водоника, где се за покретање *СНР* дизел генератора користе следеће три врсте горива: (а) биогаз произведен из отпадног дрвета; (б) биогаз произведен из комерцијалног буковог дрвета и (в) водоник. Такође, у овом делу дисертације, спроведена је и анализа осетљивости како би се квантификовао утицај улазних променљивих на излазне параметре/перформансе система, као што су промене каматне стопе, цене горива, соларне ирадијансе и протока воде у реци, а све у циљу минимизације трошкова система и емисије *GHG*.

У осмом поглављу дат је закључак где су издвојене конфигурације хибридних система које су најбоље за напајање различитих комбинација потрошача пастрмског рибњака Јабланица. Издвојене конфигурације су најбоље с аспеката укупних *NPС*-трошкова, нивелисаних *COE*-трошкова, укупне производње електричне и топлотне енергије и емисије *GHG*. Такође, предложене су методе и идеје за даље унапређивање ванмрежних хибридних енергетских система за напајање изолованих и удаљених локација.

После закључка и листе референци дати су додаци који садрже номенклатуру и листу скраћеница коришћених у дисертацији, као и пописе табела, илустрација и једначина.

2. ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ПРЕТХОДНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Прегледом литературе утврђено је да идејна решења и конфигурације хибридних система које ће се разматрати у овој докторској дисертацији не постоје у литератури. Рад [24] представља анализу нове конфигурације хибридног система и заснива се на истраживањима из претходних публикација [16-22,30,31]. Конфигурација хибридног система [24] разликује се од других хибридних система из литературе јер је пројектована за напајање изолованог рибњака за пастрмке. Она садржи μXE смештену уз таложник за воду из рибњака и користи воду из прелива таложника за погон модификоване пропелерне S-турбине. У [32] се предлаже замена дизел горива у *CHP* дизел генератору биогасом добијеним пиролизом из отпадног дрвета, биогасом добијеним пиролизом из комерцијалног буковог дрвета и водоником.

У већини публикованих радова функција циља била је минимизација укупних *NPC*–трошкова, нивелисаних *COE*–трошкова и емисије *GHG*.

2.1 Конфигурације хибридних система са μXE

У доступним истраживачким радовима анализирани су хибридни електроенергетски системи са μXE , *PV* генератором и дизел генераторима, пројектовани за напајање различитих удаљених потрошача. Симулација и димензионисање хибридног система μXE -*PV* генератор-дизел генератор за електрификацију руралних подручја у екваторијалној Африци изведени су у [63]. За разматране услове предложен је оптимални хибридни систем од 8.12 kW за напајање удаљеног села. Укупни *NPC*–трошкови и нивелисани *COE*–трошкови за овај систем износили су 70042 USD и 0.278 USD/kWh, редом. Процена потенцијала за мали хибридни електроенергетски систем μXE -*PV* генератор у удаљеној области Нигерије извршена је у [64]. У овом конкретном случају, расположива хидроенергија може да задовољи месечне потребе за електричном енергијом у износу од 59-100%, зависно од месеца у години [64]. Студија изводљивости хибридног електроенергетског система μXE -*PV* генератор који ради на постојећој брани за водоснабдевање у јужном Бразилу спроведена је у [65]. У

овој студији предложена је употреба постојећих пумпи, које су инсталиране на плутајућим конструкцијама, наиме турбина у комбинацији са *PV* генератором [65]. Хибридни електроенергетски системи *PV* генератор- μ *XE* заједно са још неким конфигурацијама, оперативним стратегијама, комплементарношћу између извора енергије у времену и прелиминарним проценама трошкова за јужни Бразил разматрани су у [66].

Техно-економска и еколошка анализа различитих хибридних електроенергетских система за снабдевање типичног руралног села у Ираку изведена је у [67]. Утврђено је да овај хибридни систем, који се састоји од 14.7 kW μ *XE*, 13 kW *PV* генератора, 5 kW дизел генератора, 8 батерија за складиштење енергије и претварача од 9 kW, има укупне *NPC*-трошкове од 113201 USD и ниску емисију *GHG* [67]. Потенцијална примена хибридних система μ *XE*-*PV* генератор-дизел генератор за електрификацију ванмрежног типичног руралног села у Нигерији испитана је у [68]. Према овој студији, постоји оптималан хибридни систем са укупним *NPC*-трошковима од 963431 USD и нивелисаним *COE*-трошковима од 0.112 USD/kWh. У [69], за хибридни електроенергетски систем μ *XE*-*PV* генератор-дизел генератор, утврђено је да повећање цене дизел горива са 0.55 USD/l на 1.2 USD/l може повећати придружене нивелисане *COE*-трошкове са 0.131 USD/kWh на 0.206 USD/kWh. Одрживост система μ *XE*-*PV* генератор-дизел генератор са циљем проналажења технички и економски најбоље конфигурације за снабдевање електричном енергијом села у западној Етиопији анализирана је у [70]. Ова анализа је показала да се укупна потрошња електричне енергије може покрити са 79% електричне енергије добијене из μ *XE*, 20% из *PV* генератора, а само 1% из дизел генератора. Хибридни електроенергетски систем предложен у [70] је такође био конкурентан са ценом од 0.133 USD/kWh. Техно-економска анализа хибридног система за напајање електричном енергијом удаљеног села Ал-Хавија у Ираку је спроведена у [71]. Показано је да се оптимални хибридни систем састоји од комбинације 3 kW *PV* генератора, 8.83 kW μ *XE*, 10 kW дизел генератора, 3 kW претварача и 12 батерија, са укупним *NPC*-трошковима и нивелисаним *COE*-трошковима од 316827 USD и 0.566 USD/kWh, редом. У [72] је истражена могућност коришћења *OIE* за смањење зависности од фосилних горива при производњи електричне енергије како би се задовољиле енергетске

потребе мобилне базне станице која се налази у Икверу (држава Риверс) – Нигерија. Резултати симулација показују да коришћење *OIE* као хибридни (*PV* генератор и/или μXE и/или дизел генератор) систем могу смањити погонске трошкове и емисију *GHG* (CO_2 и NO_x). Планирање микромреже за напајање 100 кућа у Нигерији је разматрано у [73], где је показано да само 50 kW μXE систем представља оптимално решење јер има најниже укупне *NPC*–трошкове у износу од 34594 USD и нивелисане *COE*–трошкове у износу од 0.01 USD/kWh.

2.2 Конфигурације хибридних система са регулатором термичког оптерећења

Неколико студија разматра снабдевање потрошача електричном и топлотном енергијом са потрошњом вишка електричне енергије (*EE*) у *TLC*–регулатору. Хибридни систем, који се састоји од *PV* генератора, система за складиштење енергије, горивних ћелија, бојлера на природни гас, *TLC*–регулатора и претварача, за снабдевање стамбеног домаћинства електричном и топлотном енергијом и *PV* станице за пуњење електричних возила у Техерану, оптимизиран је у [74]. Показано је да је тај хибридни систем економски и технички изводљив са укупним *NPC*–трошковима и нивелисаним *COE*–трошковима од 230223 USD и 0.0409 USD/kWh, редом, а да *TLC*–регулатор игра кључну улогу за погон *PV* система и смањење емисије *GHG*. У [62] је креиран хибридни систем који се састоји од *PV* генератора, ветрогенератора, батерија за складиштење енергије, претварача, електролизера и резервоара водоника за напајање енергијом руралних заједница у селу Додипали, Андра Прадеш у Индији. Дати систем има најмање укупне *NPC*–трошкове и нивелисане *COE*–трошкове уз висок удео *OIE* од 84.1%. Техно-економска анализа хибридног система за напајање потрошача електричном, топлотном и водоничном енергијом у пет већих градова (Бандар Абас, Шираз, Табриз, Техеран и Јазд) у Индији је спроведена у [75]. Наглашена је неопходност примене *TLC*–регулатора у системима ван мреже јер се тако могу смањити нивелисани *COE*–трошкови за 7.1%, а повећати удео производње електричне енергије из *OIE* до 35%. У [76] је истраживана способност покривања истовремених потреба за електричном и топлотном енергијом у заједницама ван мреже са различитим конфигурацијама хибридних система. Проучаване

конфигурације састоје се од *PV* генератора, ветрогенератора, микро гасне турбине и литијум–јонске батерије, уз примену две стратегије отпреме (*DS* од енг. *Dispatch Strategy*) електричне енергије за димензионисање хардверских компоненти хибридног система: циклично пуњење (*CC* од енг. *Cycle Charging*) и праћење оптерећења (*LF* од енг. *Load Following*). Анализа изводљивости когенерационог система за десалинизацију реверзибилне осмозе како би се обезбедиле енергија и вода за међународни аеродром Нови Капитал у Египту изведена је у [77]. Показано је да се оптимална конфигурација система састоји од 66.33 kW *PV* генератора, 14×10 kW ветрогенератора, 50 kW дизел генератора, 150 kW комбинованог микротурбинског генератора топлоте и електричне енергије, 50 батерија, 150 kW *TLC*–регулатора, 64 kW двосмерног претварача и бојлера, са укупним *NPC*–трошковима и нивелисаним *COE*–трошковима од 1542643 USD и 0.089 USD/kWh, редом. Укључивање *TLC*–регулатора у хибридни систем може смањити укупне *NPC*–трошкове и нивелисане *COE*–трошкове, емисију *GHG* и број батерија за 52%, 56.4%, 36.5%, и 90%, редом, а повећати удео *OIE* за 11.2%. Техно-економско пројектовање микромреже за напајање удаљене заједнице Њуфаунленд у Канади спроведено је у [78]. Комбинација измењивача топлоте земља-ваздух са електричним бојлером, резервоаром водоника, ветрогенератором и *PV* генератором анализиран је у [79]. Показано је да укључивање геотермалне енергије у хибридни систем може довести до побољшања удела *OIE* за око 5.5%, као и смањење емисије *GHG* и потрошње дизел горива за скоро 48%.

2.3 Конфигурације хибридних система заснованих на биомаси

Техно-економска процена изводљивости хибридних система са процесом гасификације и претварања отпада (папира, дрвета, пластике, зелених остатака, органског отпада, итд.) из кампуса Универзитета Викторије у чисту електричну и топлотну енергију анализирана је у [80]. Показано је да ванмрежни хибридни систем са процесом гасификације може да обезбеди 400 kW електричне енергије и 500 kW топлотне енергије дневно са уштедом CO₂ емисије од 1130 t/yr у поређењу са случајем где се отпад одлаже на депонију. Коначна верзија хибридног система који је дизајниран за модел зграде садржи *PV* генератор од 245 kW,

ветрогенератор од 175 kW, гасификатор на биомасу од 250 kW и 46 батерија, са укупним *NPC*-трошковима и оперативним трошковима од 2.3 милиона CAD и 44731 CAD/yr, редом. У [81] је анализирана техно економска изводљивост аутономног хибридног система на основу *OIE* за академски град у источном округу Сиким у Индији. Од укупно 31 могуће комбинације које су анализирани, утврђено је да хибридни систем *PV* генератор-ветрогенератор-биогаз-синтетички гас-хидрокинетичка турбина-батерија представља најбољу комбинацију са нивелисаним *COE*-трошковима од 0.095 USD/kWh. У [82] је дизајниран ванмрежни хибридни систем *PV* генератор-ветрогенератор-биомаса за напајање стамбених подручја у Зумијевом кругу, са потрошњом енергије од 15545.13 kWh/day. Оптимална конфигурација хибридног система која укључује соларну енергију, ветроенергију, енергију биомасе, батерије и претварач, показала се најисплативијом са нивелисаним *COE*-трошковима од 0.125 USD/kWh и укупним *NPC*-трошковима од 8.29 милиона USD. Дати систем производи 11.14 GWh/yr енергије са уделом *OIE* од 100% и смањује емисију CO₂ за око 5900 t/yr у поређењу са дизел генераторима. Техно-економска анализа изводљивости и студија осетљивости за снабдевање енергијом удаљене заједнице Тиба у граду Луксору у Египту, спроведена је у [83]. Пројектовани хибридни систем са *OIE* састављен од ветрогенератора, *PV* генератора и постројења за анаеробну дигестију, показао се технички изводљивим и економски одрживим са нивелисаним *COE*-трошковима од 0.1158 USD/kWh и укупним *NPC*-трошковима од 6894772 USD. *PV* генератор, ветрогенератор и постројење за анаеробну дигестију доприносе у укупној производњи енергије са 48.4%, 45.6% и 6%, редом. У [84] је извршена техно-економска анализа хибридног система у којем се електрична и топлотна енергија добијају из агроотпада (синтетичког гаса) и који се истовремено хлади. Овај хибридни систем примењен је у школама у руралним деловима Гане. Предложени систем може да производи 221621 kWh/yr електричне енергије по јединичној цени од 0.295 EUR/kWh и 110896 kWh/yr топлотне енергије. Систем је еколошки прихватљив и има емисију CO₂ од 0.526 kg/yr. У [85] су развијена два хибридна система заснована на *OIE*, тј. на биомаси (анаеробној дигестији и гасификацији), и то за потребе снабдевања електричном енергијом удаљене заједнице Бабадема у северном Камеруну. Резултати анализе

су показали да се оптимална архитектура таквог хибридног система са гасификатором састоји од *PV* генератора од 81.8 kW, генератора синтетичког гаса од 15 kW и 200 батерија, и да има нивелисане *COE*-трошкове од 0.319 USD/kWh. У [86] је пројектован ванмрежни хибридни систем *PV* генератор-ветрогенератор-биогаз генератор-горивне ћелије-батерија-претварач-електролизер-резервоар водоника за снабдевање електричном енергијом малог града Пимпри, локације у округу Махараштре у Индији. Извор биомасе чини животињски отпад од оваца, коза и говеда. Укупни *NPC*-трошкови и удео *OIE* износе 1.58 милиона USD и 94.5%, редом. Техничка и економска процена хибридног система *PV* генератор-биогаз генератор-дизел генератор-батерија за производњу електричне енергије у селу Сјудоу, у источној Кини, извршена је у [87]. У датом случају, најекономичнија конфигурација састоји се од 400 kW *PV* генератора, 100 kW генератора на биогаз, 400 батерија и 200 kW претварача. Овај систем има најниже укупне *NPC*-трошкове и нивелисане *COE*-трошкове од 1808992 USD и 0.24 USD/kWh, редом, и обезбеђује смањење емисије CO₂ за око 1297174 kg/yr у односу на самостални систем са дизел генератором. У [88] је извршена техно-економска анализа хибридног система *PV* генератор-ветрогенератор-биогаз генератор-биомаса-горивне ћелије-батерија за електрификацију удаљеног села у Индији. Овај систем се показао као најјефтинији и најпоузданији са нивелисаним *COE*-трошковима од 0.214 USD/kWh. Шест различитих конфигурација хибридних енергетских система за напајање енергијом острва Кукри Мукри у Бангладешу, анализирано је и упоређено у [89]. Предложена је оптимална конфигурација која садржи *PV* генератор капацитета 400 W, батерију од 1300 kW, ветротрогенератор од 10 kW, гасификатор биомасе од 5 kW, двосмерни претварач од 1 kW и дизел генератор капацитета од 45 kW. У овом случају, биомаса је органског типа и састоји се од дрвета, отпада из домаћинства, животињског отпада, хране за животиње, итд. Предложени хибридни систем има најниже укупне *NPC*-трошкове и нивелисане *COE*-трошкове од 239494.50 USD и 0.142 USD/kWh, редом. Анализа студије случаја за напајање енергетски сиромашних удаљених руралних заједница у источној Индији спроведена је у [90]. Ова анализа је показала да би оптимална конфигурација хибридног система требало да се састоји од 600 kW *PV* генератора, 10 kW генератора на биомасу (биомасу чини

пољопривредни и сточарски отпад), дизел генератора снаге 50 kW, батерије капацитета 1000 kWh, двосмерног претварача снаге 200 kW, са укупним *NPC*-трошковима и нивелисаним *COE*-трошковима од 0.922 милиона USD и 0.222 USD/kWh, редом. У [91] су спроведене техно-економске и еколошке анализе изводљивости седам различитих ванмрежних хибридних конфигурација са и без јединице за складиштење енергије за удаљено подручје на западној Хималајској територији Индије. Утврђено је да хибридни систем *PV* генератор-биомаса (борове иглице)-батерија-претварач представља оптималну конфигурацију са најнижим нивелисаним *COE*-трошковима од 0.185 USD/kWh и укупним *NPC*-трошковима од 76080 USD. Ова оптимална конфигурација може смањити емисију CO₂ за 27.8 милиона t/yr у поређењу са системом који има само дизел генератор. Техно-економска изводљивост хибридног електроенергетског система за снабдевање једне удаљене заједнице у Бангладешу спроведена је у [92]. Утврђено је да овај хибридни систем, који се састоји од 9 kW генератора на биогас, 10 kW *PV* генератора, два 10 kW дизел генератора, 72 батерије и 15 kW инвертора, има укупне *NPC*-трошкове од 612280 USD и нивелисане *COE*-трошкове од 0.28 USD/kWh са уделом *OIE* од 60% [92]. Ванмрежни хибридни енергетски систем са *OIE* који користи *PV* генератор и анаеробну дигестију предложен је за електрификацију руралних области у Индији [93]. Хибридни енергетски систем *PV* генератор-ветрогенератор за снабдевање једне фарме у полусушном подручју Алжира оптимизиран је у [94]. Ванмрежни хибридни електроенергетски систем са ветрогенератором, *PV* генератором и генератором на гас за напајање стамбеног комплекса у Ирану је моделиран и анализиран у [95]. Концепт алтернативног хибридног електроенергетског система који комбинује *PV* генераторе и дигесторе за третирање козјег ђубрива за потребе одрживог развоја руралних подручја у Бразилу предложен је у [12]. Истраживање спроведено у [96] бави се могућом применом интегрисаног система заснованог на комбинацији соларна енергија-хидроенергија-енергија биомасе-батерије за снабдевање електричном енергијом удаљеног града Јупиа у индијској држави Аруначал Прадеш. У [96] су разматране четири различите комбинације састављене од *OIE* и показано је да предложени систем има најмање укупне *NPC*-трошкове и нивелисане *COE*-трошкове од 644183.7 USD и 0.1282 USD/kWh, редом.

У наставку ове тачке дате су оптималне конфигурације ванмрежних хибридних система са генератором на биогаз добијен из одређених врста биомасе, који се састоје од:

1. 104 kW PV генератора, 3 ветрогенератора од 10 kW, 50 kW генератора на биогаз (добијен из кукурузне биомасе), батерија капацитета од 331 kWh и 99 kW претварача [97];
2. 297 kW PV генератора, 150 kW генератора на биогаз (добијен из животињског отпада), батерија капацитета од 354.6 kWh и 114 kW претварача [98];
3. 10 kW PV генератора, 8 kW генератора на биогаз (добијен из животињског стајњака биволица и крава), 32 батерије и 12 kW претварача [36];
4. 909 kW PV генератора, 133 kW CHP генератора на биогаз (добијен из пољопривредних остатака памука, пшенице, кукуруза и животињског стајњака крава, свиња и оваца), 705 kW дизел генератора, 706 kW бојлера на гас, 430 kW батерије и 1649 kW складишта топлотне енергије [99];
5. 150 kW генератора на биогаз (добијен из пољопривредног отпада пшенице, јечма, грубог пиринча и кукуруза), 80.7 kW PV генератора, 27 батерија и 75.9 kW претварача [100];
6. 22 kW PV генератора, 1.5 kW генератора на биогаз (добијен из пољопривредног отпада), 12 kW дизел генератора, 58 батеријских јединица укупног капацитета од 111 Ah [101];
7. 6 kW PV генератора и 6 kW система са гасификацијом биомасе од животињског отпада [102];
8. 91.4 kW PV генератора, 19.6 kW μ ХЕ, 50 kW генератора на биогаз (добијен из животињског отпада крава и биволица), 36 батерија и 60.6 kW претварача [103];
9. PV генератора од 76 kW, 1 ветротурбине од 73 kW, дизел генератора од 10 kW, 110 kW генератора на биодизел (добијен из љуске пиринча), 155 оловно киселинских батерија од 1 kWh, μ ХЕ од 11 kW и 57.2 kW претварача [104];

10. 50 kW PV генератора, 20 kW генератора на биогаз (добијен из сточног стајњака говеда, коза, оваца, свиња и пилића), 237 батерије и 42.1 kW претварача [105];
11. 9.11 kW PV генератора, 1 kW ветрогенератора, 3 kW генератора на биогаз (добијен из сточног стајњака 27 крава), 53 батерије и 4.7 kW претварача [106];
12. 3 kW генератора на биогаз (добијен из сточног стајњака 36 крава), 4.74 kW PV генератора, батерије капацитета од 10 kWh и 2.07 kW претварача [107];
13. PV генератора номиналне снаге од 83.3 kW, два гасификатора од 50 kW (биомасе од пољопривредног отпада љуске пиринча), батерије капацитета од 470 kWh и 32.10 kW претварача [108].

2.4 Конфигурације хибридних система заснованих на водонику

Хибридни електроенергетски систем који се састоји од PV генератора, ветрогенератора, дизел генератора, акумулаторске батерије, претварача, електролизера и резервоара водоника разматран је у [62]. Овај систем је креиран да обезбеди непрекидно напајање и задовољи различите захтеве оптерећења неких сеоских заједница у Индији [62]. У [79] је осмишљена микромрежа PV генератор-ветрогенератор- μ XE-горивне ћелије-водоник која је смањила потрошњу дизел горива за 71% и емисију CO₂ за 9000 тона са нивелисаним COE-трошковима од -0.0245 USD/kWh. OIE покривају 100% електричног оптерећења и 63.5% топлотног оптерећења, при чему је PV-T термални систем смањивао топлотно оптерећење за 36.5%. Аутори студије [109] демонстрирали су техно-економску изводљивост ванмрежног хибридног система за електрификацију на случају удаљеног села Додипали, Читур и Андра Прадеш, у Индији. Резултати су показали да се оптимална конфигурација система састоји од 1476 kW PV генератора, 417 батерија, 200 kW електролизера, резервоара водоника од 20 kg и 59.6 kW претварача. Когенерацијски систем заснован на ефикасном коришћењу OIE и отпада како би се задовољиле потребе за електричном и топлотном енергијом села Лигит Харман, које се налази у провинцији Бингол, разматран је у [110]. Предложени модел микромреже садржи 90.2 kW PV генератор, 10 kW

ветрогенератор, 30 kW генератор на биогаз, 5 kW горивну ћелију, 249 батерија, 10 kW електролизер, резервоар водоника од 30 kg, 51.4 kW претварач и 1 бојлер, јер има најниже укупне *NPC*-трошкове, нивелисане *COE*-трошкове и емисију CO_2 који износе 739772 USD, 0.271 USD/kWh и 37958 kg/yr, редом. У [111] је разматрано девет различитих система *OIE*, и то: са *PV* генераторима, ветрогенераторима и њиховим комбинацијама, укључујући батерије за складиштење електричне енергије и технологије засноване на водонику, за пет различитих локација – Сквамиш у Канади; Лос Анђелес и Голден у Сједињеним Америчким Државама; Бризбејн и Аделаида у Аустралији. Резултати су показали да се најнижи нивелисани *COE*-трошкови од 0.5 USD/kWh имају за локацију Голден за случај интеграције *PV* генератора снаге 422 kW, ветрогенератора снаге 1500 kW, 771 батеријске јединице, електролизера снаге 350 kW и резервоара водоника капацитета 400 kg. Систем микромреже за напајање стамбеног објекта у Кајсерију, у Турској, проучаван је у [112]. Резултати су показали да је хибридни систем који садржи *PV* генератор, ветрогенератор, дизел генератор, батерију и резервоар водоника најекономичнији и да су тада нивелисани *COE*-трошкови од 0.376 USD/kWh. Техно-економска изводљивост хибридних система за производњу енергије и водоника за град Маруа на далеком северу Камеруна, истраживана је у [113]. Овде су разматране две конфигурације хибридних система, конкретно: *PV* генератор-горивна ћелија-електролизер-генератор на биогаз (конфигурација I) и *PV* генератор-батерија-горивна ћелија-електролизер-генератор на биогаз (конфигурација II) и три врсте заједнице домаћинства са потрошњом електричне енергије: малом, средњом и великом. За сваку врсту потрошње изабрана је оптимална конфигурација хибридног система према нивелисаним *COE*-трошковима. Микромрежа са 100% *OIE* и складиштем енергије са водоником за напајање удаљеног насеља на северозападу Аустралије, које се састоји од 100 стамбених објеката и неколико мањих комерцијалних зграда и фабрика, истраживана је у [114]. На основу три разматране конфигурације утврђено је да оптимална конфигурација система садржи *PV* генератор снаге 953 kW, литијум-јонску батерију капацитета 300 kWh, горивну ћелију снаге 100 kW, електролизер снаге 250 kW, резервоар водоника капацитета 200 kg и претварач снаге 200 kW. Дати хибридни систем има најмање укупне *NPC*-трошкове од 3.23

милиона USD и нивелисане *COE*–трошкове од 0.342 USD/kWh за животни век пројекта од 25 година. Аутори студије [115] представили су иновативни хибридни систем за напајање села Доганевлер, које се налази у руралном подручју Генч у провинцији Бингол. Оптимално решење за тај хибридни систем састоји се од Архимедове турбине, *PV* генератора, генератора на биогаз, горивних ћелија, батерије, ветрогенератора, резервоара водоника, електролизера и бојлера, чији укупни *NPC*–трошкови, капитални трошкови, трошкови погона и одржавања, нивелисани *COE*–трошкови и емисија CO₂ износе 160753 USD, 99026 USD, 7433 USD/yr, 0.2 USD/kWh и 23549 kg/yr, редом. Истраживање спроведено за потребе рада [116] показало је да конфигурација састављена од *PV* генератора од 20 kW, електролизера од 150 kW, горивних ћелија од 20 kW, резервоара водоника од 200 kg, претварача од 18.6 kW и 159 батерија представља најбољу комбинацију за напајање стамбеног објекта у Торонту, у Канади. Осим тога, показано је да се додавањем батерија систему могу смањити укупни *NPC*–трошкови и понудити краткорочно и дугорочно складиштење електричне енергије. Различите конфигурације хибридних система за напајање енергијом удаљеног острва Палм у Аустралији, анализирани су у [117]. У вези с тим, хибридни систем који садржи 2266 kW *PV* генератор, 600 kW горивне ћелије, 500 kW генератор на биодизел, 4 ветрогенератора (сваки по 330 kW) и 4 батерије (свака по 100 kW) представља оптимално решење. Ово решење има најмање укупне *NPC*–трошкове од 9.46 милиона USD и нивелисане *COE*–трошкове од 0.183 AUD/kWh, и нулту емисију гасова CO₂ и SO₂.

Осим претходно наведених, постоје хибридни енергетски системи који се састоје само од *OИЕ* и укључују технологије за праћење перформанси *PV* генератора. С тим у вези, хибридни енергетски систем који се састоји од *PV* генератора, јединице за напајање водоником, складишта водоника и горивне ћелије предложен је у [118]. Овај систем би требало да покрије оптерећење једне стамбене зграде. У овој студији су процењени параметри перформанси ћелија за алкалну електролизу у зависности од укључивања двопрекидачког претварача [118]. Уз то, један техно-економски приступ за удаљену и изоловану индустријску микромрежу са *PV* генератором и батеријском јединицом за симулацију његове

ефикасности предложен је у [119]. Приступ из [119] узима у обзир поремећаје у мрежи и могуће сценарије опоравка.

2.5 Различите конфигурације хибридних система

Оптимални дизајн хибридног електроенергетског система састављеног од *PV* генератора, ветрогенератора и дизел генератора за потребе одрживог развоја приобалних подручја у Бангладешу, који уважава укупне *NPC*–трошкове, нивелисане *COE*–трошкове и емисије *GHG*, представљен је у [120]. Параметри перформанси хибридног електроенергетског система *PV* генератор-ветрогенератор-дизел генератор за напајање једне мале заједнице у Индонезији симулирани су и оптимизирани у [121]. Оптимални дизајн хибридног система, који се састоји од 1 kW *PV* генератора са 8 батерија од 200 Ah и инвертера од 0.2 kW, пројектован је за аерацију рибњака Слеман у Џакарти [122]. Процена перформанси хибридног система *PV* генератор-ветрогенератор-дизел генератор са батеријом за једно велико одмаралиште у Јужном Кинеском мору у Малезији испитана је у [123]. Према овој студији, укупни *NPC*–трошкови, нивелисани *COE*–трошкови и удео *OIE* оптимизираних система су износили 17.15 милиона USD, 0.279 USD/kWh и 41.6%, редом. У [124] је спроведено истраживање снабдевања електричном енергијом телекомуникационих инсталација у више градова у Пенџабу, у Индији. У зависности од конфигурације система добијено је да се нивелисани *COE*–трошкови крећу од 0.162 USD/kWh до 0.210 USD/kWh. У [125] је дизајниран и симулиран хибридни систем са 100% *OIE* за потребе електрификације једне руралне заједнице у Руанди. Техно-економска анализа хибридног система за напајање електричном енергијом острва Пратас на Тајвану извршена је у [126]. Ова анализа је спроведена на четири студије случаја и показано је да конфигурација шеме хибридног система *PV* генератор-дизел генератор са укупним капацитетом *PV* генератора од 20 kWp има најниже нивелисане *COE*–трошкове од 0.3569 USD/kWh, удео *OIE* од 15.3% и удео вишка електричне енергије од 2.6%. Оптимални дизајн једне хибридне микромреже састављене од ветрогенератора, дизел генератора, *PV* генератора и батерија, који је предвиђен за напајање две локације у Бангладешу, представљен је у [127]. На

основу пет симулација стратегија отпреме, утврђено је да је *LF*-стратегија најбоља за разматрану микромрежу јер има најниже нивелисане *COE*-трошкове, укупне *NPC*-трошкове и емисију CO_2 у износу од 0.219 USD/kWh, 160360 USD и 3297 kg/yr, редом. Ванмрежни хибридни електроенергетски систем са 2 ветрогенератора, 80 kW *PV* генератором и 72 батерије за покривање потреба једне петоспратне стамбене зграде у Техерану анализиран је и пројектован у [128]. У [129] је предложено и анализирано осам изводљивих комбинација хибридног система за покривање потреба за електричном енергијом у једној радионици средње величине у индустријској зони Арбадил у Ирану. У [129] је показано да један индустријски град има довољно потенцијала за производњу електричне енергије из ветра и сунца, и да ветрогенератори производе више енергије од *PV* генератора због климатских услова у тој области. У [130] је извршена оптимизација хибридног система састављеног од *PV* генератора, ветрогенератора, батерије и претварача применом алгоритма диференцијалне еволуције, а добијени резултати су упоређени са оним добијеним применом софтвера *HOMER Pro*. Поменути алгоритам био је много бржи од софтвера *HOMER Pro* при чему су добијени исти резултати. Студија изводљивости хибридног електроенергетског система *PV* генератор-батерија-горивна ћелија за напајање удаљене заједнице Саравак у источној Малезији спроведена је у [131]. Резултати ове оптимизације су показали да хибридни систем *PV* генератор-батерија јесте оптимално решење јер су укупни *NPC*-трошкови и нивелисани *COE*-трошкови најнижи и износе 335297 USD и 0.323 USD/kWh, редом; док је њима одговарајући удео вишка електричне енергије 37.5%. Техно-економска анализа хибридног система за електрификацију болнице Шиншичо у зони Кембата Тембаро у Етиопији спроведена је у [132]. Овом анализом је показано да конфигурација хибридног система *PV* генератор-дизел генератор-батерија са укупним капацитетом *PV* генератора од 100 kW има најниже укупне *NPC*-трошкове и нивелисане *COE*-трошкове у износу од 216155 USD и 0.187 USD/kWh, редом. У [133] детаљно је проучавано 10 најсавременијих модела за хибридне енергетске системе заснованих на *OIE* предвиђених за интеграцију у рурална подручја земаља у развоју. Софтвер *HOMER Pro* је идентификован као један од најпогоднијих алата за анализу таквих хибридних система са аспеката доступности алата и података, флексибилности, анализе

потражње и предикције оптерећења, као и са аспекта моделирања ресурса. Техничка процена хибридног система *PV* генератор-дизел генератор-батерија инсталираног у резервату Тапажос-Арапијунс у бразилском региону Амазон проучаван је у [134].

У литератури се могу наћи резултати оптимизације и техно-економске анализе још неких хибридних система, и то: *PV* генератор-батерија-горивна ћелија-бојлер-*TLC*-регулатор-претварач [135]; *PV* генератор-ветрогенератор-батерија-електролизер-резервоар водоника-*TLC*-регулатор-претварач [136], *PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија [137], ветрогенератор-*PV* генератор-горивна ћелија-мала хидроелектрана-генератор на биогаз-претварач-батерија-конвенционални генератор [138], *PV* генератор-ветрогенератор-биогенератор-батерија-претварач [139,140], дизел генератор-генератор на биогаз [141], *PV* генератор-ветрогенератор-дизел генератор-батерија-претварач [142-145], *PV* генератор-ветрогенератор-генератор на биогаз-батерија-претварач [146], *PV* генератор-ветрогенератор-*XE* са хидрокинетичком турбином-биогенератор-батерија-претварач [147], *PV* генератор-ветрогенератор-генератор на биогаз-дизел генератор-водоник-батерија-претварач [148], *PV* генератор-пумпна *XE*-дизел генератор-батерија-претварач [149].

3. МОДЕЛИРАЊЕ МИКРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ПОМОЋУ СОФТВЕРА *HOMER Pro*

Софтвер *HOMER Pro* је рачунарски алат за вишеструку хибридно оптимизацију обновљивих извора енергије који је развила америчка национална лабораторија за обновљиву енергију (*NREL* од енг. *National Renewable Energy Laboratory*), за потребе пројектовања микроенергетских система за производњу енергије [25]. Овај софтвер је поједноставио задатак процене исплативости самосталних хибридних система са и без *ОИЕ*.

Анализа и пројектовање микроенергетских система представља врло захтеван процес због великог броја пројектантских решења и несигурности у вези са кључним параметрима, као што су величина оптерећења, доступност извора енергије и будуће цене горива. *ОИЕ* још више доприносе сложености проблема јер производња енергије у њима може бити с времена на време у прекиду или чак потпуно обустављена, у зависности од доба дана, атмосферских прилика, годишњег доба и сл. Овај софтвер успешно савладава све те изазове, моделира понашање енергетског система и трошкове који одговарају његовом животном веку, који су заправо, збир трошкова инсталације и одржавања енергетског система кроз цео његов животни век. *HOMER Pro* омогућује пројектанту упоређивање великог броја различитих пројектантских решења по основу њихових техничких и економских карактеристика. Такође, помаже у разумевању и квантитативном одређивању резултата који су последица несигурности и промена у улазним подацима, заправо помаже да се једноставно одговори на питање да ли је систем (са и без *ОИЕ*) исплатив и да ли може да покрије одређено оптерећење, без обзира да ли је повезан са електроенергетском мрежом или не.

3.1 Концептуални однос између симулације, оптимизације и анализе осетљивости

У основи моделирање микроенергетских система састоји се од следећа три процеса: симулације, оптимизације и анализе осетљивости система. У симулационом делу се моделирају перформансе (изводљивост) одређеног система

за сваки (поједини) час у години да би се одредила техничка изводљивост система, његова оправданост и укупни трошак система за читав животни век. У оптимизационом делу симулирају се многе конфигурације микроенергетског система да би се пронашла она која задовољава техничка ограничења при најнижем трошку комплетног века циклуса. Оптимизацијом се добијају оптималне вредности променљивих над којима оператор система има контролу и уз комбинацију улазних променљивих – нпр. различитих цена горива за дизел генератор у комбинацији са *PV* генератором који је изложен различитој соларној ирадијанси. У анализи осетљивости система се спроводи итеративни поступак оптимизације система где се задају различити опсези улазних параметара, мере њихови ефекти и траже најбоље излазне цене у односу на век експлоатације. Сама анализа осетљивости помаже у разумевању ефеката несигурности промена параметара над којим пројектант нема контролу, као што су соларна ирадијанса или будућа цена горива. Веза између симулације, оптимизације и анализе осетљивости дата је на Слици 3.1.



Слика 3.1 Веза између процеса симулације, оптимизације и анализе осетљивости

Са Слике 3.1 може се видети да елипса оптимизације обухвата елипсу симулације, што представља чињеницу да се једна оптимизација састоји од вишеструких симулација. Слично, елипса анализе осетљивости обухвата елипсу оптимизације јер се једна анализа осетљивости састоји од вишеструких оптимизација.

3.1.1 Симулација

Симулације омогућавају репродукцију дуготрајног погона неког микроенергетског система, дефинишу перформансе тог система, визуелизују његове компоненте са тачно одређеним техничким параметрима и дају стратегију која дефинише како ће те компоненте функционисати у оквиру система и како ће се понашати у њему током читавог века експлоатације. За једноставно креирање шематских блок дијаграма хибридних система са *ОИЕ* постоје посебно припремљени алати. Конкретно, системи који садрже сет батерија морају имати и стратегију отпреме (*DS*) енергије, а то подразумева сет правила по коме се батерије празне и пуне. Постоје две врсте оваквих стратегија: једна је стратегија праћења оптерећења (*LF*-стратегија) а друга је стратегија цикличног пуњења (*CC*-стратегија). Код *LF* стратегије *ОИЕ* увек пуне батерију, а генератори то не чине. Код *CC* стратегије, кад год су генератори у погону они раде са максималном снагом и производе више енергије него што је потребно самом оптерећењу, па се вишак енергије користи за пуњење батерије.

Задаци самог симулационог процеса су следећи: први задатак је одређивање изводљивости система, тј. утврђивање да ли систем може адекватно да снабдева електрична и топлотна оптерећења и да задовољи сва друга ограничења која пројектант дефинише; док је други задатак процена укупних трошкова инсталације, замене делова и погона за цео животни век система. У овој докторској дисертацији посебна пажња ће се посветити економској оправданости разматраног пројекта – система са *ОИЕ*.

Моделирање конфигурације неког система изводи се тако што се симулације врше за сваки час у току једногодишњег погона истог. Корак се подешава из часа у час погона, израчунавајући расположивост *ОИЕ*, упоређујући је са оптерећењем и на основу тога се одлучује шта да се ради с вишком енергије из *ОИЕ* ако се појави или како да се произведе или купи додатна количина енергија ако се добија мање енергије из *ОИЕ*. Када се начини оваква процена за једну годину, онда се утврђује да ли систем задовољава ограничења која је корисник задао по основу капацитета *ОИЕ*, количина енергије које различити *ОИЕ* дају, или емисија одређених загађивача. Такође, врши се прорачун

параметара који су потребни за израчунавање укупних трошкова система током животног века, укључујући нпр. годишњу потрошњу горива, часове погона дизел генератора и очекивани животни век батерије.

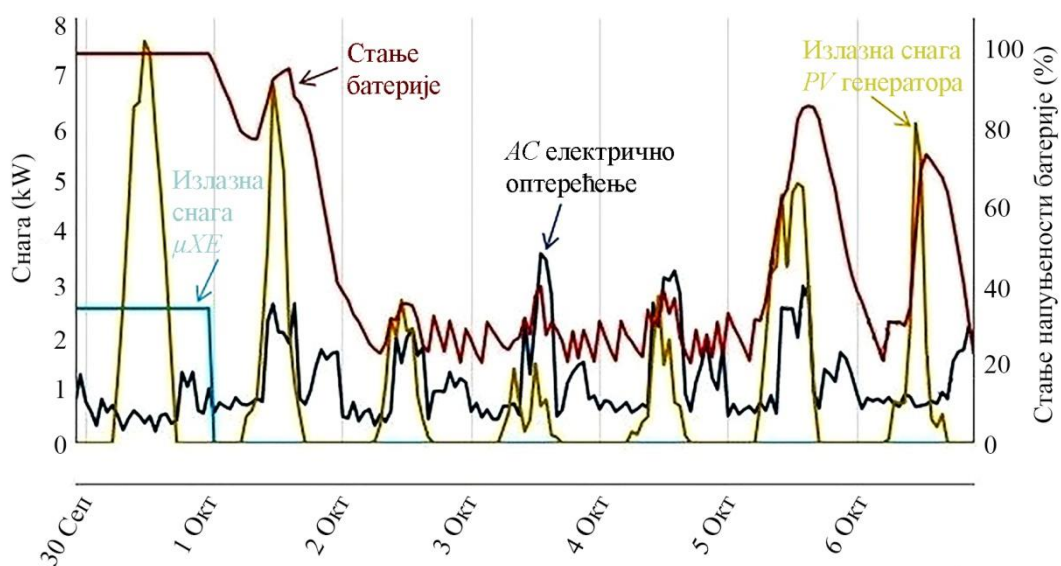
Укупни нето садашњи трошак јесте величина којом се представљају укупни трошкови система током његовог животног века. Ова величина обухвата све трошкове и приходе који се појављују током животног века пројекта, са будућим новчаним токовима дисконтованим на садашњост. Укупни *NPV*– трошкови укључују инвестиционе трошкове, трошкове замене делова компоненти који се појављују у току животног века пројекта, трошкове *P&O* и трошкове горива.

За различите типове микроенергетских система, посебно оне који укључују више врста *OIE*, за моделирање понашања система са прихватљивом тачношћу неопходан је једночасовни временски корак. Нпр. за студију случаја разматрану у овој докторској дисертацији (Конфигурација I), тј. за систем μXE -*PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија није довољно само знати просечну месечну (или пак дневну) производњу μXE и *PV* генератора, јер су време и променљивост те производње подједнако важни као и њена просечна количина. Да би се прецизно предвидела потрошња дизел горива, часови погона дизел генератора, проток енергије кроз батерију и вишак произведене електричне енергије, неопходно је знати излазне снаге μXE и *PV* генератора у корелацији са електричним оптерећењем и да ли проток воде или соларна ирадијанса имају тенденцију опадања или раста. Овакав једночасовни временски корак је довољно мали да обухвати најважније статистичке аспекте оптерећења и повремених *OIE*, али не толико мали да успори рачунање до те мере да оптимизација и анализа осетљивости постану непримењиве. Овде треба напоменути да се не могу моделирати транзијентне електричне појаве и неки још динамички ефекти који захтевају значајно мање временске кораке од једног часа.

После креирања блок шеме и дефиниције компонената система и потенцијала извора (*PV* ефекта за одређену позицију или хидропотенцијал за проточну турбину), могуће је променити низ параметара сваког извора понаособ или њихове комбинације са или без батерије. На Слици 3.2 приказан је део резултата часовне симулације изведене са моделом хибридног система који

одговара Конфигурацији I. У таквом систему, батерија апсорбује енергију када енергија μXE или PV генератора премаши енергију потребну за покривање оптерећења, а ослобађа када енергија потребна за покривање оптерећења постане већа од енергије μXE или PV генератора. Дијаграм са Сlike 3.2 приказује како количина енергије која се ускладишти у батерији опада током три узастопна дана када је дневна светлост слаба или када је проток воде мањи, и то од 30. септембра до 3. октобра. Када је батерија празна то значи да систем није могао да напаја оптерећење 4. и 5. октобра. Током симулације овакви падови енергије се региструју и на крају се утврђује да ли је систем могао да обезбеди довољно енергије како би био изводљив у складу са ограничењима које је поставио корисник. Такође, могуће је користити резултате симулација за израчунавање пропусности батерије (тј. количине енергије која је циркулисала кроз батерију током године), која се даље користи за прорачун животног века батерије и утиче на укупне NPC –трошкове системе.

Погон система током једне године симулира се под претпоставком да су кључни резултати добијени за ту годину (као што су нпр. потрошња горива, проток енергије кроз батерију и вишак произведене енергије) исти и за сваку следећу годину током животног века пројекта. Међутим, ова симулација не генерише промене параметара у току времена, као што су могући раст оптерећења и погоршање перформанси батерије услед старења.



Слика 3.2 Пример резултата часовне симулације

У свакој од ових симулација посебна пажња се посвећује инжењерској економији, тако да многе од претходних ефеката пројектант може анализирати применом анализе осетљивости.

3.1.2 Оптимизација

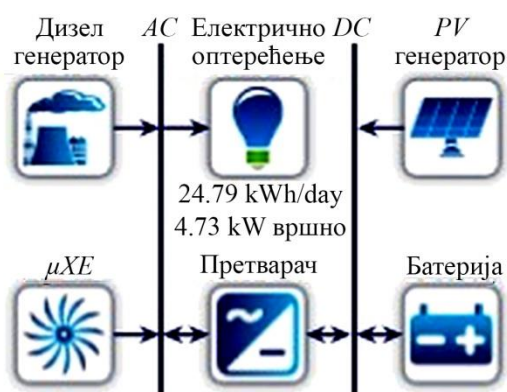
У некој симулацији се саставља одређена конфигурација система, а у процесу оптимизације се одређује најбоља могућа варијанта те конфигурације. Најбоља могућа, односно оптимална, конфигурација система је увек она која задовољава задата ограничења уз најниже укупне *NPC*-трошкове. Налажење оптималног решења може укључивати и одлуку о комбинацији компонената које систем треба да садржи, њихове бројеве и капацитете, као и стратегију отпреме енергије који систем треба да користи. У оптимизационом процесу симулирају се различите конфигурације, одбацују неизводљиве (тј. оне које не задовољавају ограничења које је корисник задао), рангирају се оне које су изводљиве према укупним *NPC*-трошковима и представљају оне које су најекономичније, тј. са најнижим укупним *NPC*-трошковима.

Циљ оптимизације је одређивање оптималне вредности сваке променљиве одлучивања (*DV* од енг. *Decision Variable*) која је интересантна пројектанту. Променљива одлучивања је она променљива коју пројектант система може контролисати и за коју може разматрати више могућих вредности током оптимизације. Могуће променљиве одлучивања укључују:

- Величину *PV* модула.
- Присуство хидросистема (разматра се само једна величина хидросистема; сходно томе потребно је одлучити да ли микроенергетски систем треба да садржи хидросистем или не).
- Величину сваког генератора.
- Величину *AC-DC* претварача (*AC*-наизменична струја и *DC*-једносмерна струја).
- Број батерија.
- Величину електролизера.
- Запремину резервоара за складиштење водоника.

- *DS* (скуп правила која одређују како систем функционише када садржи батерије).

Оптимизација помаже инжењеру пројектанту да пронађе оптималну верзију конфигурације хибридног система. У вези са тим, разматраће се задатак надоградње система састављеног од дизел генератора и μXE са *PV* генератором и батеријама. Разматрањем могућих опција за редизајн основног система, пројектант би могао, на пример да се одлучи за конфигурацију са Слике 3.3, али унапред не може да зна број *PV* модула, број батерија и капацитет претварача који ће минимизирати трошкове животног века система. Сходно томе, ове три променљиве могу бити променљиве одлучивања.



Слика 3.3 Хибридни систем са μXE , *PV* генератором и дизел генератором

Овде још једном треба истаћи да је визуализација блок шема као што је она са Слике 3.3, врло једноставна. Затим, унос свих параметара и променљивих одлучивања изводи се кликом на икону сваке од компоненти система (μXE , дизел генератора, батерије итд.). Ово поглавље се неће бавити уносом улазних променљивих. Након уноса параметара користе се опције *optimisation* (оптимизација) и *simulation* (симулација) које дају најповољнија решења за разматрани систем – обично је то табела са могућим бројем компоненти у систему као што се може видети у Табели 3.1, а постоје и друге могућности за визуализацију резултата. Коначно, посебну пажњу треба посветити уносу трошкова за сваку компоненту и одређивању инвестиционих трошкова, укупних *NPC*–трошкова за сваки систем посебно и нивелисаних *COE*–трошкова.

3.1.3 Стратегија расподеле

Ова опција омогућава задавање вишеструких променљивих за сваку променљиву одлучивања као што је то приказано у Табели 3.1. Саме вредности ових променљивих не морају расти или опадати линеарно.






На конкретном примеру пастрмског рибњака Јабланица била је намера да се у симулацијама искомбинују постојеће снаге μXE и дизел генератора са снагом PV генератора из опсега од 0 до 15 kW, бројем батерија из опсега од 0 до 40, и шест различитих претвараача снаге из опсега од 0 до 6 kW. У Табели 3.1 приказан је простор претраге који обухвата све могуће конфигурације преко којих се ишло ка најбољем решењу. Овако дефинисан простор претраге обухватио је 17507 различитих конфигурација система, као што је презентовано у Табели 3.1.

Табела 3.1 Простор претраге која обухвата 17507 конфигурација система ($1 \times 61 \times 1 \times 7 \times 41 = 17507$)


| | μXE (kW) | PV генератор (kW) | Дизел генератор (kW) | Претвараач (kW) | Батерија (количина) |
|----|------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| 1. | 8.5 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| 2. | / | 0.25 | / | 1 | 1 |
| 3. | / | 0.5 | / | 2 | 2 |
| 4. | / | 0.75 | / | 3 | 3 |
| 5. | / | 1 | / | 4 | 4 |
| 6. | / | 1.25 | / | 5 | 5 |
| 7. | / | ⋮ | / | 6 | ⋮ |
| 8. | / | 15 | / | / | 40 |

У оптимизационом процесу симулиране су све конфигурације система у простору претраге и приказане су конфигурације које су изводљиве према укупним NPC –трошковима.

Као резултат добија се Табела 3.2, која садржи резултате симулација за све изводљиве комбинације.

Први ред у Табели 3.2 односи се на оптималну конфигурацију јер има најниже укупне *NPC*–трошкове. У том случају оптимална конфигурација садржи 8.5 kW μ XE , 8.25 kW *PV* генератор , 12 kW дизел генератор , 4 kW претварач  и 18 батерија . Друго рангирана конфигурација је готово иста, садржи 9 батерија мање и снага *PV* генератора у њој је мања за 0.75 kW. Трећа конфигурација је логично слична првој само што садржи 2 батерије мање, 1 претварач мање и снага *PV* генератора је мања за 4.5 kW. Свака од ових конфигурација је састављена од истих компоненти и представља одређени тип система. Такође, за сваки од ових типова може се одредити по једно оптимално решење.































Табела 3.2 Резултати оптимизације са укупним *NPC*–трошковима за сваку конфигурацију понаособ

|  |  |  |  |  | μ XE (kW) | <i>PV</i> генератор (kW) | Дизел генератор (kW) | Претварач (kW) | Батерија | Инвестициони трошкови (USD) | Укупни <i>NPC</i> –трошкови (USD) | Нивелисани <i>COE</i> –трошкови (USD/kWh) | Дизел (l) | Генератор (часови) |
|---|---|---|---|---|---------------|--------------------------|----------------------|----------------|----------|-----------------------------|-----------------------------------|---|-----------|--------------------|
|  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 21018 | 33683 | 0.288 | 282 | 226 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 7.5 | 12 | 4 | 9 | 18495 | 33684 | 0.288 | 392 | 315 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 3.75 | 12 | 3 | 16 | 17865 | 33684 | 0.288 | 476 | 382 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 6.5 | 12 | 3 | 16 | 19361 | 33686 | 0.288 | 376 | 302 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 6 | 12 | 3 | 19 | 19794 | 33686 | 0.288 | 371 | 298 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 8 | 12 | 4 | 11 | 19237 | 33687 | 0.288 | 354 | 284 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 5.25 | 12 | 5 | 14 | 18681 | 33688 | 0.288 | 405 | 325 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 5.5 | 12 | 3 | 18 | 19287 | 33688 | 0.288 | 396 | 318 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 5.25 | 12 | 6 | 10 | 17976 | 33689 | 0.288 | 426 | 342 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 4.25 | 12 | 4 | 15 | 18137 | 33689 | 0.288 | 449 | 360 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 4.5 | 12 | 5 | 8 | 16863 | 33690 | 0.288 | 488 | 392 |
|  |  |  |  |  | 8.5 | 6 | 12 | 3 | 18 | 19559 | 33692 | 0.288 | 379 | 304 |

У *HOMER*–у постоји опција *Categorised optimisation* (категоризована оптимизација) као у Табели 3.3, која се користи за издвајање најјефтиније оптималне конфигурације система без потребе за претрагом велике табеле (од нпр. 17507 редова, као у претходном случају). Овај резултат нам показује да се

додавањем *PV* генератора заиста смањују укупни *NPC*-трошкови (упоређивање прво и друго рангираних конфигурација). У односу на хибридни систем са дизел генератором из осмог реда Табеле 3.3, инвестициони трошкови од 21018 USD за оптималну конфигурацију система омогућавају дугорочну уштеду у *NPC*-трошковима од 224295 USD. Оптимизациони поступак увек има тенденцију да прикаже све резултате који су по укупним трошковима блиски оптималним. Сам дизајнер може одабрати и неку од ових конфигурација иако је она мало скупља од оптималне. Нпр. нека друга конфигурација може бити скупља, али ће имати значајно краће периоде пражњења батерије што продужава животни век батерије. Препознавање техничких проблема ове врсте јесте посао инжењера који доноси коначну одлуку о одабиру конфигурације.

Табела 3.3 Резултати категоризоване оптимизације

| |  |  |  |  |  | μXE (kW) | <i>PV</i> генератор (kW) | Дизел генератор (kW) | Претварач (kW) | Батерија | Инвестициони трошкови (USD) | Укупни <i>NPC</i> - трошкови (USD) | Нивелисани <i>COE</i> -трошкови (USD/kWh) | Дизел (l) | Генератор (часови) |
|----|---|---|---|---|---|------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------|----------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--------------|-----------------------|
| 1. |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 21018 | 33683 | 0.288 | 282 | 226 |
| 2. |  | |  |  |  | 8.5 | | 12 | 3 | 10 | 14415 | 35033 | 0.299 | 705 | 566 |
| 3. | |  |  |  |  | | 12 | 12 | 5 | 33 | 19168 | 38141 | 0.326 | 240 | 193 |
| 4. |  | |  | | | 8.5 | | 12 | | | 11360 | 62527 | 0.535 | 2121 | 1701 |
| 5. |  |  |  |  | | 8.5 | 0.25 | 12 | 1 | | 11731 | 63044 | 0.539 | 2118 | 1699 |
| 6. | | |  |  |  | | | 12 | 3 | 11 | 7000 | 101882 | 0.871 | 3538 | 2875 |
| 7. | |  |  |  | | | 15 | 12 | 3 | | 12575 | 229318 | 1.96 | 9129 | 7327 |
| 8. | | |  | | | | | 12 | | | 3710 | 257978 | 2.21 | 10920 | 8759 |

3.1.4 Анализа осетљивости

Ова анализа је основа вишеструких оптимизација где се користе различите вредности улазних параметара за компоненте система. Анализа осетљивости се тако назива јер показује колико су осетљиви резултати система у односу на промене улазних вредности. Овде дизајнер уноси различите опсеге вредности за сваку од улазних променљивих које се називају променљиве осетљивости (*SV* од

енг. *Sensitivity Variable*). Скоро сви нумерички улази који нису променљиве одлучивања могу бити променљиве осетљивости, нпр. цена горива, каматна стопа, век трајања *PV* генератора. Такође, једна од најважнијих променљивих која може бити променљива осетљивости јесте податак о оптерећењу или *OIE*.

Корисник може извршити анализу осетљивости са било којим бројем променљивих осетљивости и свака комбинација њихових вредности дефинише различит случај осетљивости. Ако дизајнер нпр. зада 6 вредности цене горива и 4 вредности за каматну стопу, то дефинише 24 различита случаја осетљивости. За сваки случај осетљивости спроводи се засебан поступак, а резултати се представљају у различитим табеларним или графичким форматима.

Једна од примарних користи анализе осетљивости јесте њена примена за процену несигурности. Дизајнер може користити анализу осетљивости да процени поврат инвестиције и одговори на питање као што је: „Колико је потребно додатног капиталног улагања да би се достигло 50% или 100% производње електричне енергије из обновљивих извора?“. Дизајнер може одредити које технологије или комбинације истих су оптималне под различитим условима.

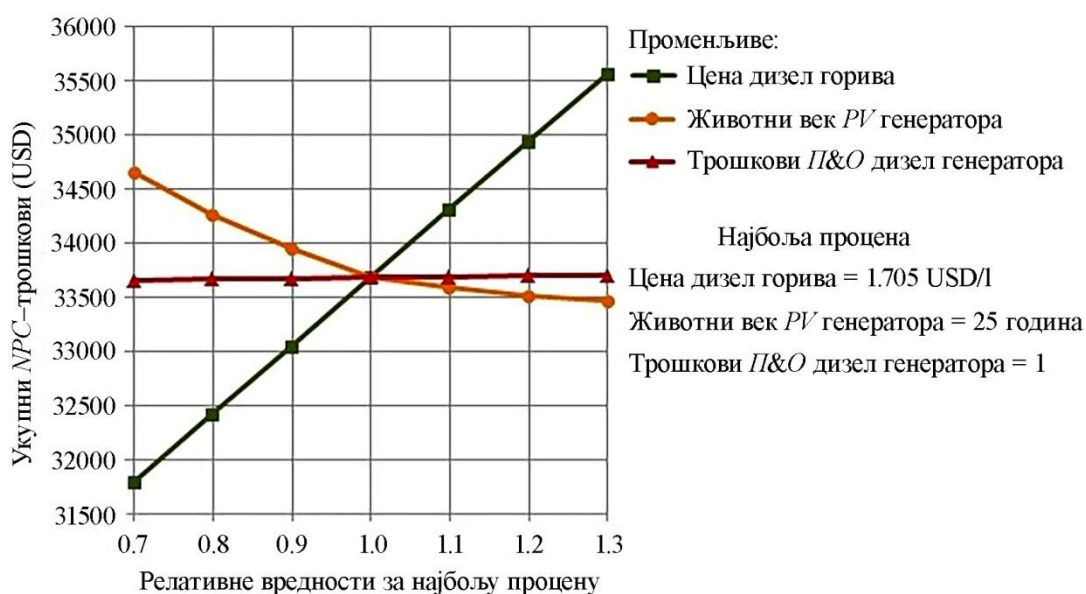
3.1.5 Несигурност система

Изазов за сваког дизајнера микроенергетских система је процена несигурности кључних променљивих. Анализа осетљивости помаже дизајнеру да разуме ефекте несигурности и да донесе добре дизајнерске одлуке. За систем који се састоји од комбинације μ ХЕ, *PV* генератора и дизел генератора, претпоставља се да је цена дизел горива 1.705 USD/l у току животног века пројекта од 25 година. Овде је очигледна непредвидљивост цене дизел горива, али и многи други улазни подаци могу да буду неизвесни, као што су век трајања *PV* генератора, трошкови *P&O* дизел генератора, дугорочна просечна соларна ирадијанса на локацији или чак просечно електрично оптерећење. Анализа осетљивости може помоћи да се квантификују утицаји варијација улазних података на понашање, изводљивост и економичност одређене конфигурације, тј. да се утврди ли је

систем близу оптимума за све сценарије или да ли је систем далеко од оптимума за одређене сценарије.

Графикон са Сlike 3.4 приказује резултате анализе осетљивости за три променљиве. Овде је анализирана конфигурација система из првог реда Табеле 3.2, и то за различите вредности следеће три улазне променљиве: цена дизел горива, животни век *PV* генератора и трошкови *P&O* дизел генератора. За сваку променљиву, унете су вредности из опсега од 30% испод до 30% изнад најбоље процене. Са Сlike 3.4 може се видети како су укупни *NPC*-трошкови осетљиви на сваку од ових променљивих. Релативни нагиби ове три криве показују да су укупни *NPC*-трошкови више осетљиви на цену дизел горива него на друге две променљиве.

Ове информације дизајнери користе за одређивање граница до којих се поменута несигурност може смањити.



Слика 3.4 Резултати анализе осетљивости за три променљиве

У оквиру анализе осетљивости може се спроводити и оптимизација. Табела 3.4 приказује резултате анализе осетљивости за исту конфигурацију са циљем да се провери да ли цена дизел горива, која је на Сlici 3.4 приказана као најважнија променљива осетљивости, утиче на разматрану оптималну конфигурацију система.

Табела 3.4 Резултати анализе осетљивости за оптималну конфигурацију система при промени цене дизел горива

| Дизел (USD/l) |  |  |  |  |  | μXE (kW) | PV генератор (kW) | Дизел генератор (kW) | Претварач (kW) | Батерија | Укупни NPC -трошкови (USD) |
|---------------|--|--|--|--|--|---------------|---------------------|----------------------|----------------|----------|------------------------------|
| 1.19 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 31821 |
| 1.28 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 32131 |
| 1.36 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 32441 |
| 1.45 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 32752 |
| 1.53 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 33062 |
| 1.62 |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 33372 |
| ⇒ 1.705 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 33683 |
| 1.79 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 33993 |
| 1.88 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 34303 |
| 1.96 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 34614 |
| 2.05 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 34924 |
| 2.13 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 35234 |
| 2.22 |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 35545 |








































У овом случају коришћен је простор претраге из Табеле 3.1 и задате вредности цене дизел горива изнад и испод најбоље процене. Према Табели 3.4, како цена дизел горива расте повећавају се снага PV генератора и број батерија, а када цена дизел горива опада смањују се снага PV генератора (за 1.25 kW) и број батерија (за 4).

Даље, стрелица у Табели 3.4 издваја сценарио најбоље процене са ценом дизел горива од 1.705 USD/l. Конфигурација система за овај сценарио (једна μXE снаге 8.5 kW, тридесет три PV модула снаге 0.25 kW, један 12 kW дизел генератор, 18 батерија и 4 kW претварач) јесте оптимална за седам од тринаест случајева осетљивости. Ако се погледају свеукупни резултати оптимизације за друге случајеве осетљивости може се запазити да је ова конфигурација блиска оптималном решењу и за те случајеве осетљивости. У Табели 3.5 су приказани резултати оптимизације за сценарио најниже цене дизел горива од 1.19 USD/l. Конфигурација која је била оптимална за цену дизела од 1.705 USD/l је четврта за случај сценарија са укупним NPC -трошковима од 32497 USD, што је само 2.1% више од укупних NPC -трошкова који одговарају оптималној конфигурацији. За

случај највише цене дизел горива ова конфигурација заузима пето место са укупним *NPC*–трошковима који су за 3.2% виши од оних који одговарају оптималној конфигурацији.

Стога је ово решење робусно јер има добре перформансе у датом опсегу цена дизел горива. Насупрот томе, систем *PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија, који је оптималан за случај сценарија са најнижом ценом дизел горива (седми ред Табеле 3.5) заузима 32 место у случају сценарија са највишом ценом дизел горива, са укупним *NPC*–трошковима који су за 12.5% виши од оних који одговарају оптималној конфигурацији. Анализа осетљивости јасно показује да би само систем *PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија био много ризичнији у односу на систем *μХЕ-PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија, јер у неким сценаријима цене дизел горива није близу оптималних решења.

Табела 3.5 Резултати анализе осетљивости оптималне конфигурације за систем *PV* генератор-дизел генератор-претварач-батерија у случају када је цена дизел горива 1.19 USD/l

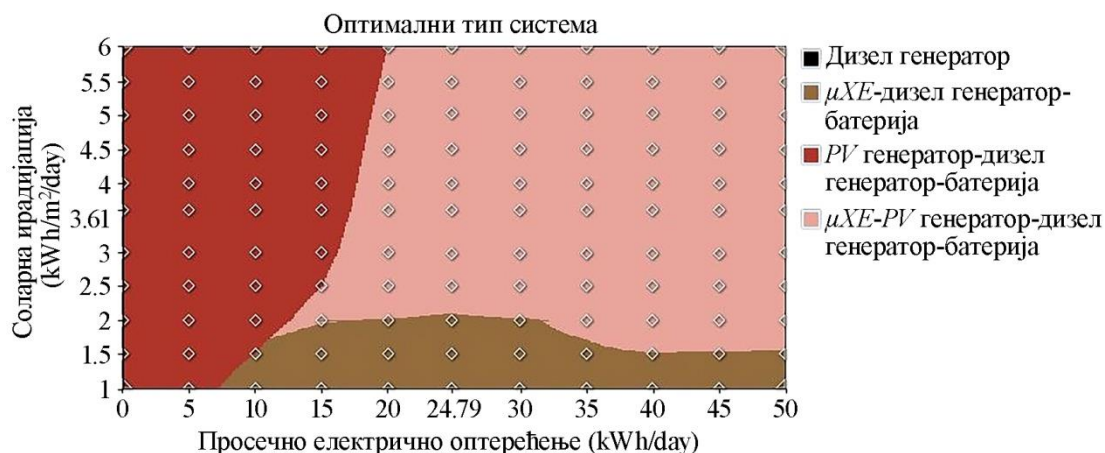
| |  |  |  |  |  | <i>μХЕ</i> (kW) | <i>PV</i> генератор (kW) | Дизел генератор (kW) | Претварач (kW) | Батерија | Укупни <i>NPC</i> – трошкови (USD) |
|----|---|---|---|---|---|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|----------|--|
| 1. |  |  |  |  |  | 8.5 | 7 | 12 | 4 | 14 | 31821 |
| 2. |  |  |  |  |  | 8.5 | 7.25 | 12 | 4 | 14 | 31950 |
| 3. |  |  |  |  |  | 8.5 | 7.25 | 12 | 4 | 16 | 32370 |
| 4. |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.25 | 12 | 4 | 18 | 32497 |
| 5. |  |  |  |  |  | 8.5 | 8.5 | 12 | 4 | 18 | 32589 |
| 6. |  |  |  |  |  | 8.5 | 9.5 | 12 | 5 | 19 | 32746 |
| 7. | |  |  |  |  | | 11 | 12 | 5 | 31 | 36286 |

Са оваквом врстом информација дизајнер може доносити одлуке упркос постојању несигурности у вези са неким важним променљивима. Дакле, анализа осетљивости може показати како различите конфигурације система функционишу у широком дијапазону могућих сценарија и тако помоћи дизајнеру да процени ризике повезане са сваким од тих сценарија.

3.1.6 Анализа осетљивости са часовним подацима

Једна од најмоћнијих функција софтвера *HOMER Pro* је могућност спровођења анализе осетљивости са часовним подацима као што су примарно електрично оптерећење или ресурси сунца, воде и биомасе. Употреба променљивих скалирања омогућава такву анализу осетљивости где сваки скуп података по часу садржи 8760 вредности које имају тачно одређену просечну вредност. Тако се нпр., могу одредити часовни подаци за примарно оптерећење са годишњим просеком од 24.79 kWh/day, а затим 10, 20 и 40 kWh/day као примарна променљива оптерећења. Током анализе осетљивости, врши се скалирање података о оптерећењу тако да први просек буде 10 kWh/day, затим 20 kWh/day и коначно 40 kWh/day. Овај процес скалирања мења магнитуду података оптерећења, али не утиче на облик дневног дијаграма оптерећења, сезонски устаљене шаблоне или друге статистичке податке. Скалирање податка о *OIE* врши се на исти начин. На Слици 3.5 су приказани резултати анализе осетљивости која је извршена за једанаест вредности просечног електричног оптерећења и једанаест вредности средње годишње соларне ирадијације.

За сваки од 121 случаја анализе осетљивости, урађена је оптимизација простора претраге која садржи 2118347 могућих конфигурација. *Diamond*-и (енг. *Diamond* – дијамант) на Слици 3.5 приказују случајеве осетљивости, а боја сваког од *diamond*-а имплицира оптимални тип система за дати случај осетљивости. Са Слике 3.5 може се још видети да при просечном електричном оптерећењу од 24.79 kWh/day и средњој годишњој соларној ирадијацији од 3.61 kWh/m²/day, оптимална конфигурација је систем *μXE-PV* генератор-дизел генератор-батерија. За просечно електрично оптерећење од 15 kWh/day и за исту соларну ирадијацију оптимални систем се састоји само од *PV* генератора-дизел генератора-батерија. Овде софтвер користи дводимензионалну линеарну интерполацију да би одредио оптимални тип система у свим тачкама између *diamond*-а.



Слика 3.5 Соларна ирадијација у функцији од просечног електричног оптерећења за случај оптималне конфигурације система

Слика 3.5 даље показује да је конфигурација састављена само од дизел генератора оптимална за врло мале системе без обзира на интензитет соларне ирадијације. При ниским вредностима соларне ирадијације, како оптерећење расте, оптимална конфигурација иде ка систему μXE -дизел генератор-батерија, док са порастом соларне ирадијације оптимална конфигурација иде ка систему PV генератор-дизел генератор-батерија и коначно ка систему μXE - PV генератор-дизел генератор-батерија који је оптималан за просечно електрично оптерећење из опсега од 20 kWh/day до 50 kWh/day и соларне ирадијације из опсега од 2.5 kWh/m²/day до 6 kWh/m²/day. За дизајнера који планира да обезбеди електричну енергију за неелектрификована подручја у оквиру одређеног пројекта, оваква анализа може помоћи око избора микроенергетског система који ће се користити на некој локацији у зависности од оптерећења и соларне ирадијације.

3.2 Моделирање компонената хибридних система

У овој тачки је описано како се врши моделирање погона система и како поједине компоненте система функционишу заједно да би се снабдевало оптерећење. Микроенергетски систем мора садржати бар један извор електричне или топлотне енергије (као што је μXE , PV генератор, дизел генератор или бојлер) и најмање једно одредиште ка којем се та енергија шаље (електрично и/или

топлотно оптерећење). Такође, ту могу постојати уређаји за конверзију енергије као што су *AC-DC* претварач или електролизер, као и уређаји за складиштење енергије као што су батерија или резервоар за водоник.

3.2.1 Оптерећење

Термин оптерећење се односи на потражњу за електричном или топлотном енергијом и свако моделирање микроенергетских система подразумева дефиницију једног или више оптерећења које систем мора напајати. Оптерећења могу бити: примарно – оптерећење које се мора напајати према одређеном распореду; одгодиво – оптерећење које се може напајати у било ком тренутку током одређеног временског периода; и топлотно – оптерећење које подразумева потражњу за топлотном енергијом.

Примарно оптерећење представља потражњу за електричном енергијом коју микроенергетски систем мора да покрије у тачно одређеном тренутку. Потражња за електричном енергијом која потиче од уређаја као што су сијалице, радио, ТВ, кућни апарати, рачунари и индустријски процеси су типични примери примарног оптерећења. Када корисник укључи сијалицу, микроенергетски систем мора истог тренутка да обезбеди електричну енергију и такво оптерећење се не може одложити за касније. Ако се деси да потражња за електричном енергијом премаша понуду, онда се појављује мањак који се региструје као непокривено оптерећење.

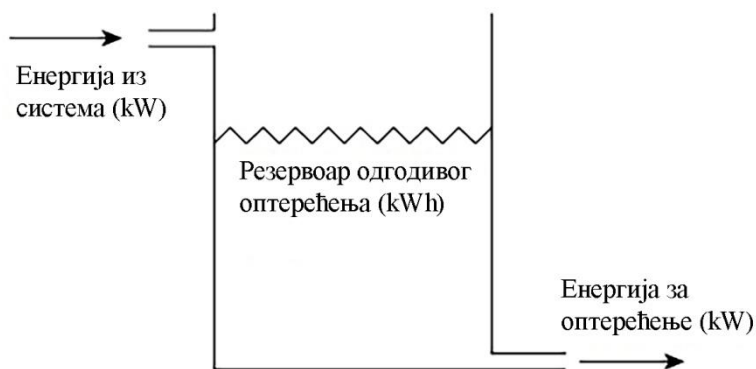
Примарно оптерећење се изражава у киловатима за сваки час у току године, било увозом датотеке која садржи часовне податке или синтетисањем тих података из просечних дневних дијаграма оптерећења. Када се синтетишу подаци о оптерећењу, онда се креирају часовне вредности оптерећења засноване на дневним дијаграмима оптерећења које задаје сам корисник. Исто тако дизајнер може да одреди 24-часовни профил који се примењује у току целе године или неколико профила за различите месеце и различите профиле за радне дане и викенд. Синтетизованим подацима о оптерећењу које задаје корисник додаје се одређени ниво случајности, тако да је свакодневни шаблон оптерећења сваког

дана јединствен. Такође, могу да се дефинишу два одвојена примарна оптерећења, од којих свако може бити *AC* или *DC*.

Од могућа три типа оптерећења, примарно оптерећење је од посебног значаја јер захтева оперативну резерву која представља вишак електричних производних капацитета који могу одмах одговорити на нагли пораст електричног оптерећења или на нагли пад излазне снаге из *OIE*. Иако има исто значење као ротирајућа резерва, ова резерва се назива оперативном јер се може обезбедити помоћу батерије и горивне ћелије које се не могу ротирати. Приликом симулације погона система, тежи се томе да оперативни капацитет система буде увек довољан за напајање примарног оптерећења и потребне оперативне резерве.

Одгодиво оптерећење је потражња за електричном енергијом која се може покрити у сваком тренутку током одређеног временског интервала. Водене пумпе, апарати за прављење леда и станице за пуњење батерија су примери одгодивог оптерећења јер складиштење које захтева свако од ових оптерећења дозвољава одређену флексибилност у вези с тим када их систем може опслужити. Могућност одлагања снабдевања неког оптерећења је корисно за системе који садрже периодичне *OIE*, јер се тако смањује потреба за прецизном контролом времена при производњи енергије. Ако напајање из *OIE* премаши примарно оптерећење, вишак енергије се може искористити за покривање одгодивог оптерећења уместо да се изгуби.

На Слици 3.6 илустрован је концепт резервоара одгодивог оптерећења. Микроенергетски систем смешта енергију у „резервоар” ограниченог капацитета, а онда се та енергија одводи из резервоара да би се напајало одгодиво оптерећење. За сваки месец корисник дефинише просечно одгодиво оптерећење, што представља брзину којом се енергија одводи из резервоара. Такође, корисник дефинише капацитет складиштења у киловатчасовима (величину резервоара), као и минималну и максималну брзину којом енергетски систем може складиштити енергију у резервоар. Овде треба напоменути да модел резервоара представља само аналогију, јер стварно одгодиво оптерећење може, а и не мора, да користи резервоар за складиштење.



Слика 3.6 Концепт резервоара одгодивог оптерећења

Приликом симулације микроенергетског система који напаја одгодиво оптерећење, потребно је пратити ниво у резервоару одгодивог оптерећења. Систем ће сваки вишак енергије произведене из *ОИЕ* ускладиштити у резервоару, али све док је ниво у резервоару изнад нуле, систем неће користити расположиви извор напајања (дизел генератор или батеријски склоп) за инјектирање енергије у резервоар. Ако ниво у резервоару падне на нулу, систем привремено третира одгодиво оптерећење као примарно, што значи да ће одмах користити било који расположиви извор напајања за инјектирање енергије у резервоар како би се избегло да одгодиво оптерећење остане непокривено. Топотно оптерећење се моделира на исти начин као и примарно електрично оптерећење, само што се не примењује концепт оперативне резерве. Величина топлотног оптерећења се одређује за сваки час у години, било увозом датотеке која садржи часовне податке или синтезом часовних података из 24-часовног профила оптерећења. Систем може снабдевати топлотно оптерећење или бојлером, отпадном топлотом (рекуперованом) из дизел генератора, или резистивним грејањем користећи вишак произведене електричне енергије.

3.2.2 Ресурси

Термин ресурс се односи на све што долази изван система, а што систем користи за производњу електричне или топлотне енергије. То укључује обновљиве ресурсе (хидроенергију, соларну енергију и биомасу), као и било које гориво које користе компоненте система. Сваки од ових ресурса има специфичан

математички модел у односу на трошкове енергије и потрошњу/оптерећење. Главна својства обновљивих ресурса су непредвидљивост и зависност од сезоне, позиције, климатских услова и слично, и стога је пажљиво моделирање обновљивих ресурса важан сегмент у моделирању комплетног система.

Хидро ресурс

Да би се моделирао систем са проточном хидротурбином (Слика 3.7) морају се обезбедити подаци о протоку, тј. количини воде која је расположива турбини у току године. Могу да се користе измерени часовни протоци или средње месечни протоци под претпоставком да брзина протока остаје константна током сваког месеца. Корисник такође одређује и резидуални проток, што представља минимални проток у кориту мимо турбине, који је условљен еколошким потребама. Овај резидуални проток се одузима од укупног протока да би се одредила она количина воде која је расположива.



Слика 3.7 Проточна μ ХЕ и њени основни делови

Данашњи комерцијални микро-хидро системи користе мале турбине које су повезане са електричним генератором или алтернатором. Вода се скупља у сабирној цеви узводно и путује кроз цевовод до турбине где се под утицајем

Земљине теже провлачи кроз једну или више млазница. Овде нема потребе за браном и такви системи се зову *run-of-river* системи. Сви данашњи произвођачи оваквих турбина траже одговарајуће податке о позицији, вертикалном паду, протоку у литрима у секунди и дужину цеви да би се одредила одговарајућа висина вертикалног пада.

Генерално гледано за водену проточну турбину најмањи потребни пад и најмањи потребни проток износе 3 m и 20 l/s, редом, док је за веће висине потребна мања количина воде. Затим, цев мора да буде довољно великог пречника како би се минимизирали губици услед трења. Сваки произвођач турбине даје посебне информације у вези са овим карактеристикама. Величина млазнице и тип турбине су повезани са висином и протоком, тако да се често могу мењати величине млазнице како се мења проток воде. Две основне врсте турбина су: импулсне и реакционе. Код импулсних турбина у млазници се ствара млаз воде која се убризгава у коло турбине. Основне импулсне турбине су Пелтонова, Турго и турбина са попречним протоком. Пелтонова турбина се користи код малих протока и великих падова, док се турбина са попречним протоком користи за велике протоке и мале падове. Према карактеристикама протока и пада, Турго турбина се налази негде између претходне две. Реакционе турбине се постављају директно у водени ток и сличне су пропелеру који се окреће унутар цеви, омогућавајући води да тече преко лопатица уместо да удара у сваку појединачно. Францисова, Пропелерна, Капланова и цевна турбина су најчешћи типови реакционих турбина и врло су сличне центрифугалним пумпама. Постоје реакционе турбине које су у потпуности исте као и центрифугалне пумпе само што раде у супротном смеру.

Соларни ресурс

Пре инсталације неког *PV* генератора (Слика 3.8), дизајнер мора имати податке о соларном зрачењу на локацији где ће *PV* модули бити постављени. Подаци о изворима соларног зрачења показују количину глобалног соларног зрачења (зраци који долазе директно од Сунца и дифузионо од стране различитих делова неба) које пада на површину Земље у току године. Нагнута плоча *PV* модула осим директног и дифузног зрачења прихвата и одбијено (рефлектовано)

зрачење од околних површина. Подаци о соларном зрачењу дају се у једној од следеће три форме: часовно глобално соларно зрачење на хоризонталну површину Земље (kW/m^2), месечно соларно зрачење (kWh/m^2), или месечни индекс прозрачности који представља однос између соларног зрачења које пада на површину Земље и оног које погађа Карманову линију (креће се од 0 до 1).



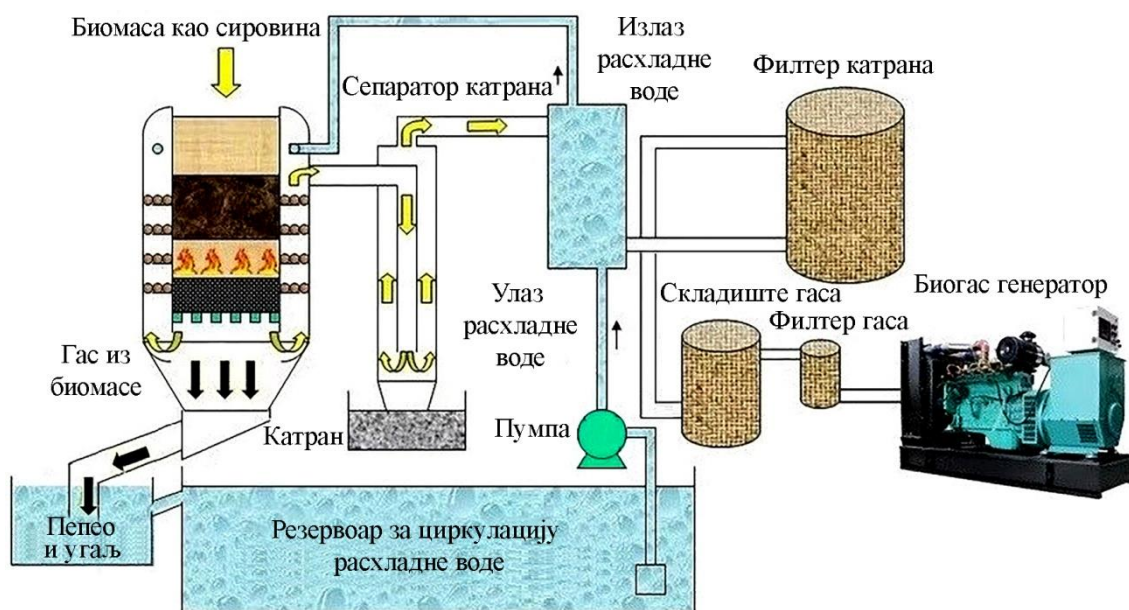
Слика 3.8 Генератор састављен од више PV модула (а) и основни делови (б)

Ако ће се користити месечни подаци о соларном зрачењу, онда се подаци о глобалном соларном зрачењу генеришу применом посебног алгоритама који су развили Грејем и Холанд. Улазни подаци за овај алгоритам јесу просечне месечне вредности соларног зрачења и географска ширина. Алгоритам на излазу даје скуп података за 8760 часова са статистичким карактеристикама које су најсличније стварно измереним подацима. Једна од статистичких карактеристика оваквог излаза јесте аутокорељација, која представља тенденцију да сваки дан буде сличан претходном дану, као и да сваки час буде сличан претходном часу.

Ресурс биомасе

Овај ресурс обновљиве енергије представља различите облике шумске биомасе (нпр. комерцијално дрво или отпадно буково дрво) који се могу искористити за производњу електричне и топлотне енергије. Моделирање микроенергетских система који користе биомасу врши се конверзијом енергетске моћи исте те биомасе у електричну енергију. У односу на остале ресурсе, биомасу јединственом чине следећа два аспекта: прво, расположивост биомасе делом

зависи од људских могућности за прикупљањем, транспортом и складиштењем (зато овај извор и није периодичан, али може бити сезонски или повремено нерасположив); друго, биомаса као сировина може да се претвори у гасно или течно гориво и као таква може да се трансформише у конвенционалном генератору (Слика 3.9). Стога је моделирање биомасе у много чему слично моделирању било ког другог конвенционалног горива.



Слика 3.9 Биогасно постројење са основним деловима

Моделирање ресурса биомасе врши се на један од следећа два начина: најједноставнији начин је преко дефиниције горива избором својстава која одговарају биомаси, а затим одређивање потрошње горива генератора на основу зависности произведене електричне енергије од утрошене биомасе (овај приступ имплицитно моделира процес претварања сировине у гориво конвертујући ускладиштену биомасу); друга алтернатива је коришћење софтверског улаза за извор биомасе, који опет дозвољава задавање расположивости складишта биомасе одређених својстава током године и моделирање процеса конверзије ускладиштене биомасе у енергију процесом гасификације.

Као и код осталих *ОИЕ*, расположивост биомасе може да се дефинише увозом датотеке са часовним подацима или месечним просецима. Ако се користе месечни просеци, онда се претпоставља да је расположивост биомасе константна

током сваког месеца. Да би се дефинисао ресурс биомасе, корисник мора навести следећа четири параметра: цену, садржај угљеника, коефицијент гасификације и енергетску моћ горива добијеног из биомасе. За анализу емисије *GHG*, вредност садржаја угљеника треба да одражава нето количину ослобођеног угљеника у атмосферу прикупљањем, прерадом и потрошњом биомасе, узимајући у обзир чињеницу да је угљеник садржан у сировини првобитно био у атмосфери. Коефицијент гасификације, који се подједнако користи за течна и гасовита горива, представља однос између масе горива припремљеног за генератор на крају процеса конверзије и масе биомасе на почетку процеса конверзије. Енергетска моћ биомасе користи се за израчунавање термодинамичке ефикасности генератора у којем се троши гориво.

Гориво

Софтвер *HOMER Pro* садржи библиотеку са неколико већ дефинисаних горива, а корисник може додати још неко гориво у ту библиотеку ако се јави потреба. Физичка својства горива укључују његову густину, доњу топлотну моћ (*LHV*), садржај угљеника и садржај сумпора. Такође, корисник може одабрати одговарајуће мерне јединице, као што су: литар или килограм. Преостала два својства горива су његова цена и ограничење годишње потрошње ако постоји.

3.2.3 Компоненте

Компонента неког микроенергетског система је сваки његов део који производи, дистрибуира, претвара или складишти енергију. У овој докторској дисертацији појављује се 8 типова компоненти. Две основне компоненте које генеришу енергију из *ОИЕ* су: μXE и *PV* генератор. *PV* генератор претвара сунчеву светлост у *DC*, док μXE претвара енергију воде у *AC* с тим да се може моделирати само проточна μXE , тј. она која нема акумулацију.

Друга два типа компоненти, дизел генератор и бојлер, представљају преносиве изворе енергије, што значи да их микроенергетски систем по потреби може укључивати или не. Дизел генератор производи *AC* или *DC* електричну енергију потрошњом горива, а исто тако може додатно производити топлоту из

вишка ослобођене топлоте. У бојлеру се за производњу топлотне енергије такође троши гориво.

Даље, претварач и електролизер претварају електричну енергију у неки други облик енергије. Претварач претвара електричну енергију из *AC* у *DC* и/или обрнуто. Електролизери претварају вишак *AC* или *DC* електричне енергије у водоник електролизом воде. Коначно, компоненте у којима се складишти енергија су: батерија и резервоар за водоник. Батерија складишти *DC*–електричну енергију, док се у резервоару за водоник складишти водоник из електролизера који се може опет користити као гориво за генератор.

3.3 Математичко моделирање компонента хибридних система

Да би се правилно одабрале компоненте и подсистеми за потребе оптимизације целог система, први корак је математичко моделирање појединачних компоненти. Процес моделирања омогућава идентификацију и доприноси познавању карактеристика компоненти и потпомаже доношење одлука. Детаљи моделирања се огледају у његовом тачном представљању перформанси. Међутим, прецизност захтева сложеност и значајно дуге временске периоде за креирање савршеног модела. Одговарајући модел треба да буде компромис између сложености и тачности. Перформансе појединачних компоненти моделирају се или детерминистички или пробабилистички. Општа методологија моделирања микроенергетског система описана је у наставку.

3.3.1 Хидротурбина и $\mu ХЕ$

Хидротурбина се моделира као уређај који претвара енергију падајуће воде у *AC* електричну енергију при константном степену искоришћења без могућности акумулирања воде (проточна $\mu ХЕ$). Енергија падајуће воде је пропорционална вертикалној висини и протоку, док номинална снага $\mu ХЕ$ представља снагу хидротурбине која се добија на основу укупног пада и протока воде кроз хидротурбину. Израчунавање номиналне снаге $\mu ХЕ$ укључује ефикасност

хидротурбине, али не и губитке у цевоводу. Номинална снага μXE се израчунава према следећој формули [52,53,64,67,68]:

$$P_{\mu XE, nom} = \frac{\eta_{hyd} \cdot \rho_{water} \cdot g \cdot h \cdot \dot{Q}_{design}}{1000} \quad (3.1)$$

где су:

$P_{\mu XE, nom}$ – номинална снага μXE [kW],

η_{hyd} – ефикасност хидротурбине [%],

ρ_{water} – густина воде [1000 kg/m³],

g – убрзање земљине теже [9.81 m/s²],

h – укупан пад [m] и

\dot{Q}_{design} – пројектовани проток воде кроз хидротурбину [m³/s].

Нето пад се добија када се од укупног пада одузму губици услед трења при протицању воде кроз цевовод [52,53,67,68]:

$$h_{net} = h \cdot (1 - f_h) \quad (3.2)$$

где су:

h_{net} – нето пад [m] и

f_h – губици услед трења [%].

Губитак у цевоводу услед трења изражава се као проценат укупног пада па вода (као свака вискозна течност) која протиче кроз цев има мањи притисак на излазу из цевовода због трења. Хидросистеми са великим падом и малим протоком обично имају губитак притиска између 10% и 20%, док код хидросистема са малим падом тај губитак износи свега неколико процената. Процент губитка притиска у цевоводу дефинисан је као однос апсолутног губитка пада и укупног расположивог пада [52]:

$$f_h = 100 \cdot \frac{h_l}{h} \quad (3.3)$$

где је:

h_l – апсолутни губитак пада услед трења [m].

За одређивање губитака услед трења у цеви кружног попречног пресека може се користити Дарси-Ваисбахова једначина [52,53,67,68]:

$$h_l = f_D \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right) \quad (3.4)$$

при чему су:

f_D – Дарсијев фактор трења,

L – дужина цеви [m],

D – пречник цеви [m],

V – брзина протока воде [m³/s (или m/s)] ($V = \frac{Q}{A}$, $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$),

Q – запремински проток [m³/s].

Дарсијев фактор трења (f_D) може се одредити на неколико начина, укључујући и онај помоћу Мудијевог дијаграма (Слика 3.10), или преко Рејнолдсовог броја за ламинарно струјање, тј. [52]:

$$f_D = 64 / R_e \quad (3.5)$$

где је:

R_e – Рејнолдсов број који се одређује помоћу израза $\rho_{water} \cdot V \cdot L / \mu$, и мањи је од 2300 (μ – динамичка вискозност [kg/(m·s)])

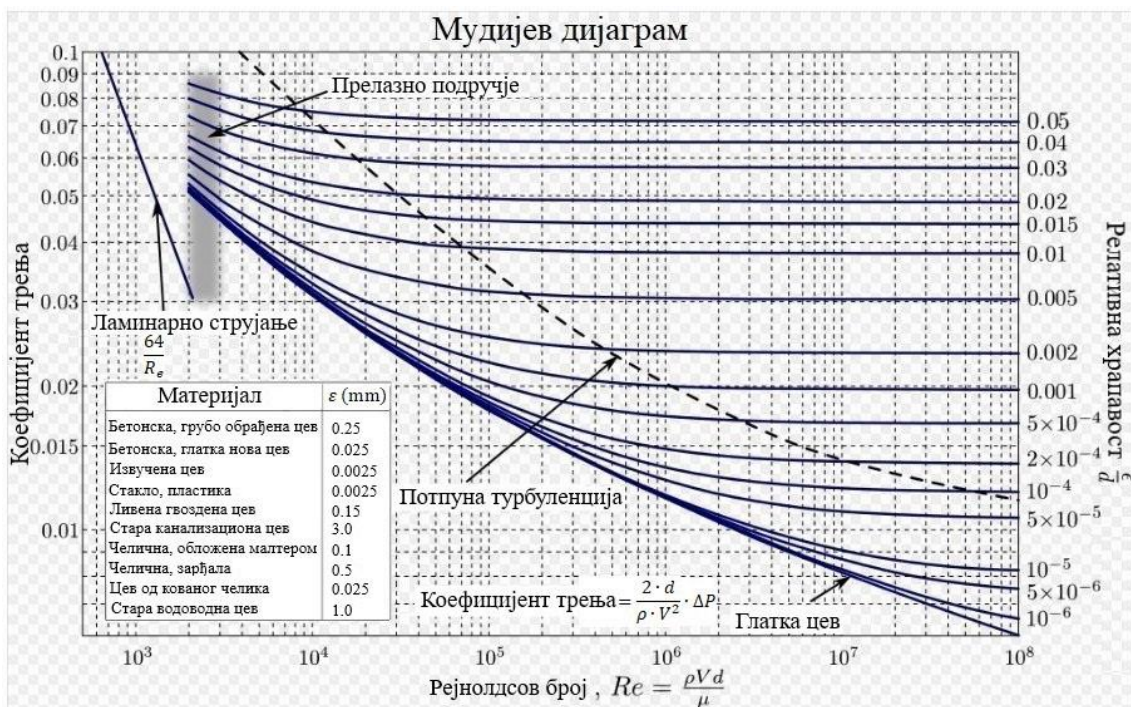
Помоћу Мудијевог дијаграма може се добро проценити фактор трења за случај прелазних протока ($2300 < R_e < 4000$), док се за турбулентне протоке користи Колбрук-Вајтова формула [52]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D_h} + \frac{2.51}{R_e \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (3.6)$$

где су:

ε – коефицијент хрпавости зида цеви и

D_h – хидраулични пречник (унутрашњи пречник кружне цеви) [mm].



Слика 3.10 Дијаграм губитака услед трења у цеви кружног попречног пресека [52,67,68]

У сваком временском кораку, излазна снага μXE се израчунава према следећој формули [52,53,64,67,68]:

$$P_{\mu XE} = \frac{\eta_{hyd} \cdot \rho_{water} \cdot g \cdot h_{net} \cdot \dot{Q}_{turbine}}{1000} \quad (3.7)$$

где су:

$P_{\mu XE}$ – излазна снага μXE [kW] и

$\dot{Q}_{turbine}$ – проток воде кроз хидротурбину [m^3/s].

Проток воде кроз хидротурбину представља количину воде која протиче кроз хидротурбину. У сваком временском кораку, овај проток се може израчунати користећи следећу једначину [52,53,67,68]:

$$\dot{Q}_{turbine} = \begin{cases} 0 & \text{ако је } \dot{Q}_{available} < \dot{Q}_{min} \\ \dot{Q}_{available} & \text{ако је } \dot{Q}_{min} \leq \dot{Q}_{available} \leq \dot{Q}_{max} \\ \dot{Q}_{max} & \text{ако је } \dot{Q}_{available} > \dot{Q}_{max} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{turbine} = \begin{cases} 0 & \text{ако је } \dot{Q}_{stream} - \dot{Q}_{residual} < w_{min} \cdot \dot{Q}_{design} \\ \dot{Q}_{available} & \text{ако је } w_{min} \cdot \dot{Q}_{design} \leq \dot{Q}_{stream} - \dot{Q}_{residual} \leq w_{max} \cdot \dot{Q}_{design} \\ \dot{Q}_{max} & \text{ако је } \dot{Q}_{stream} - \dot{Q}_{residual} > w_{max} \cdot \dot{Q}_{design} \end{cases}$$

где су:

$\dot{Q}_{available}$ – расположиви проток воде [m^3/s],

\dot{Q}_{min} – минимални проток воде кроз хидротурбину [m^3/s],

\dot{Q}_{max} – максимални проток воде кроз хидротурбину [m^3/s],

\dot{Q}_{stream} – укупни проток воде [m^3/s],

$\dot{Q}_{residual}$ – резидуални проток воде [m^3/s],

w_{min} – минимални однос протока воде кроз хидротурбину [%] и

w_{max} – максимални однос протока воде кроз хидротурбину [%].

3.3.2 PV генератор и соларна ирадијанса

PV генератор се моделира као уређај који производи DC–електричну енергију у зависности од глобалне соларне ирадијације и температуре, независно од напона којем је изложен. Излазна снага PV генератора за сваки временски интервал може се израчунати помоћу следећег израза [52,53,67,68]:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{c,STC})] \quad (3.9)$$

где је:

P_{PV} – излазна снага PV генератора [kW],

Y_{PV} – номинални капацитет PV модула добијен при стандардним условима тестирања (STC од енг. *Standard Test Conditions*) [kW],

f_{PV} – коефицијент опадања називне снаге PV модула [%],

\overline{G}_T – соларна ирадијанса у посматраном временском интервалу [kW/m^2],

$\overline{G}_{T,STC}$ – соларна ирадијанса при STC [$1 \text{ kW}/\text{m}^2$],

α_p – температурни коефицијент снаге [%/ $^{\circ}\text{C}$],

T_c – температура PV ћелије у посматраном временском интервалу [$^{\circ}\text{C}$],

$T_{c,STC}$ – температура PV ћелије при STC [25°C].

Под STC –условима подразумева се испитивање PV модула које се врши при соларној ирадијанси од $1 \text{ kW}/\text{m}^2$, температури ћелије од 25°C и без утицаја ветра. Ако се моделирање PV модула врши без уважавања температуре, претпоставља се да је температурни коефицијент једнак нули, па се претходна једначина (3.9) своди на следећи израз [52,53,64,67,68]:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) \quad (3.10)$$

Глобална соларна ирадијација (GHI од енг. *Global Horizontal Irradiance*) одређује укупну количину соларног зрачења које долази до хоризонталне површине на Земљи, при чему излазна снага PV модула зависи од количине зрачења која пада на површину PV модула који може бити различито оријентисан. Оријентација PV модула се одређује користећи два параметра: нагиб и азимут. Нагиб представља угао између површине PV модула и хоризонтале, тако да угао од 0° одговара хоризонталној оријентацији, док угао од 90° одговара вертикалној оријентацији PV модула. Азимут представља правац према којем је површина PV модула оријентисана. Вредност азимута од 0° одговара јужној оријентацији, док се позитивне вредности односе на оријентацију према западу. Дакле, азимут од -45° одговара оријентацији према југоисточној страни, а азимут од 90° одговара оријентацији према западној страни.

Остали утицајни параметри су географска ширина, доба године и доба дана. Деклинација Сунца зависи од доба године, а заједно са географском ширином одређује колико високо ће се Сунце попети у подне. Следећа једначина се користи за прорачун деклинације Сунца [52]:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360^\circ \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.11)$$

где је:

n – број дана у години [од 1 до 365] почев од 1. јануара.

Доба дана утиче на тренутну висину Сунца изнад хоризонта, који се може описати часовним углом. Под претпоставком да се Сунце креће брзином од $15^\circ/\text{h}$, часовни угао ω може бити функција Сунчевог времена τ_s и може се израчунати помоћу следећег израза [52]:

$$\omega = (\tau_s - 12) \cdot 15^\circ \quad (3.12)$$

Подаци о соларном зрачењу, као и подаци о електричном и топлотном оптерећењу, зависе од локалне временске зоне. Соларно време из локалног времена може се добити помоћу следеће једначине [52]:

$$\tau_s = \tau_c + \frac{\lambda}{15^\circ} - Z_c + E \quad (3.13)$$

где је:

τ_c – локално стандардно време које одговара средњој вредности временског корака [h],

λ – географска ширина [$^\circ$],

Z_c – временска зона источно од средњег времена по Гриничу (*GMT* од енг. *Greenwich Mean Time*) [h] и

E – параметар времена [h]:

$$E = 3.82 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B) \quad (3.14)$$

где се B може добити из израза:

$$B = 360^\circ \cdot \left(\frac{n-1}{365}\right) \quad (3.15)$$

За површину оријентисану у било ком смеру може се дефинисати упадни угао, тј. угао између соларног зрачења и нормале на површину, помоћу следеће једначине [52]:

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta \sin\lambda \cos\beta - \sin\delta \cos\lambda \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\lambda \cos\beta \cos\omega + \\ + \cos\delta \sin\lambda \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (3.16)$$

где је:

θ – упадни угао [°],

β – угао нагиба површине PV модула [°] и

γ – азимут [°].

Угао између Сунчевих зрака и вертикале на Земљину површину представља зенитни угао Сунца θ_Z (зенитни угао је нула када је Сунце тачно изнад главе, а 90° када је Сунце на хоризонту). С обзиром да је нагиб хоризонталне површине нула, једначина за зенитни угао се добија из горње једначине постављањем $\beta = 0^\circ$, тј. [52]:

$$\cos\theta_Z = \cos\lambda \cos\delta \cos\omega + \sin\lambda \sin\delta \quad (3.17)$$

Уз претпоставку да је соларно зрачење константно у времену, количина соларног зрачења која доспева на површину Земље варира током године јер удаљеност између Сунца и Земље није иста из дана у дан због ексцентричности Земљине орбите. За израчунавање космичке ирадијације на хоризонталну површину, која се дефинише као количина соларног зрачења приспела на нормалну површину према количини зрачења приспелој на Карманову линију (представља границу разграничења између Земљине атмосфере и космоса), користи се следећа једначина [52]:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos\theta_Z \quad (3.18)$$

при чему је:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\frac{360}{365} \right) \quad (3.19)$$

где је:

G_o – космичко хоризонтално зрачење [kW/m^2],

G_{on} – космичко нормално зрачење [kW/m^2] и

G_{sc} – константа соларног зрачења [$1.367 \text{ kW}/\text{m}^2$].

С обзиром да се симулација врши на основу временског интервала „корак по корак“, потребно је горе наведене једначине прилагодити једном временском кораку како би се пронашло просечно космичко хоризонтално зрачење током временског корака [52]:

$$\bar{G}_o = \frac{12}{\pi} \cdot G_{on} \left[\cos \lambda \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180^\circ} \cdot \sin \lambda \sin \delta \right] \quad (3.20)$$

где је:

ω_1 – часовни угао на почетку временског корака [$^\circ$] и

ω_2 – часовни угао на крају временског корака [$^\circ$].

Горња једначина даје просечну количину соларног зрачења која пада на хоризонталну површину на врху Карманове линије у било ком временском кораку. Међутим, подаци о соларном ресурсу дају просечну количину соларног зрачења која пада на хоризонталну површину Земље у сваком временском кораку. Однос хоризонталног зрачења на површини Земље и космичког хоризонталног зрачења назива се индекс прозрачности, који се израчунава помоћу следећег израза [52]:

$$k_T = \frac{\bar{G}}{G_o} \quad (3.21)$$

где су:

k_T – индекс прозрачности,

\bar{G} – глобално хоризонтално зрачење на површини Земље у току временског корака [kW/m^2] и

G_o – космичко хоризонтално зрачење у току временског корака [kW/m^2].

Од укупног соларног зрачења које доспева на хоризонталну површину, један део чини директно зрачење које путује од Сунца до површине Земље без икаквог расејавања кроз атмосферу и које баца сенку. Остатак чини дифузно зрачење чији је правац промењен Земљином атмосфером, долази са свих страна неба и не баца сенку. Збир директног и дифузног зрачења назива се глобално соларно зрачење које је дефинисано следећом једначином [52]:

$$\bar{G} = \bar{G}_b + \bar{G}_d \quad (3.22)$$

где су:

\bar{G}_b – директно зрачење [kW/m^2] и

\bar{G}_d – дифузно зрачење [kW/m^2].

При израчунавању количине соларног зрачења која пада на нагнуту површину важно је знати разлику између директног и дифузног зрачења. Оријентација површине има јачи утицај на директно зрачење које долази само са једне стране неба, него на дифузно зрачење које долази са свих страна неба.

У сваком временском кораку, укупно глобално хоризонтално зрачење које пада на *PV* модул може се разложити на директно и дифузно зрачење увођењем дифузног удела у функцији индекса прозрачности, преко корелацијског коефицијента k_T као што следи [52]:

$$\frac{\bar{G}_d}{\bar{G}} = \begin{cases} 1 - 0.09 \cdot k_T & \text{за } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 \cdot k_T + 4.388 \cdot k_T^2 - 16.638 \cdot k_T^3 + 12.366 \cdot k_T^4 & \text{за } 0.22 < k_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{за } k_T > 0.8 \end{cases} \quad (3.23)$$

За израчунавање глобалног зрачења које пада на нагнуту површину *PV* модула, користи се Хеј-Дејвис-Клака-Рејдл (ХДКР) модел, који претпоставља да постоје три компоненте дифузног соларног зрачења: компонента која обухвата зрачење са свих страна неба, компонента која се односи на зрачење из смера Сунца и компонента утицаја осветљаја са хоризонта. Према ХДКР моделу глобално соларно зрачење које пада на површину *PV* модула израчунава се према следећој једначини [52]:

$$\begin{aligned} \bar{G}_T = & (\bar{G}_b + \bar{G}_d \cdot A_i) \cdot R_b + \bar{G}_d \cdot (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \\ & + \bar{G} \cdot \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

где је:

ρ_g – рефлексија земљине површине [%].

Величине R_b , A_i , f представљају однос угла директног зрачења на нагнуту површину и угла директног зрачења на хоризонталну површину, индекс анизотропије, коефицијент осветљаја хоризонта и израчунавају се према изразима (3.25), (3.26) и (3.27), редом [52]:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.25)$$

$$A_i = \frac{\bar{G}_b}{\bar{G}_o} \quad (3.26)$$

$$f = \sqrt{\frac{\bar{G}_b}{\bar{G}}} \quad (3.27)$$

Одређивање температуре PV ћелије полази од дефиниције енергетског баланса PV модула, тј. равнотеже између апсорбоване соларне енергије у PV модулу с једне стране и излазне електричне енергије и размене топлоте са околином с друге стране [52]:

$$\tau \cdot \alpha \cdot G_T = \eta_c \cdot G_T + U_L \cdot (T_c - T_a) \quad (3.28)$$

где је:

τ – соларна пропусност PV поклопца [%],

α – соларна апсорпција PV модула [%],

η_c – електрична ефикасност PV модула [%],

G_T – количина соларног зрачења која доспева на површину PV модула [kW/m^2],

U_L – коефицијент размене топлоте са околином [$\text{kW/m}^2\text{°C}$] и

T_a – температура околине [$^{\circ}\text{C}$].

Решавањем једначине (3.28) по T_c , добија се :

$$T_c = T_a + G_T \cdot \left(\frac{\tau \cdot \alpha}{U_L} \right) \cdot \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau \cdot \alpha} \right) \quad (3.29)$$

С обзиром на то да је тешко директно измерити вредност $(\tau \cdot \alpha / U_L)$, произвођачи наводе номиналну погонску температуру ћелије (*NOCT* од енг. *Nominal Operating Cell Temperature*), која се дефинише као температура *PV* ћелије при количини соларног зрачења од 0.8 kW/m^2 , температуре околине од 20°C и без оптерећења ($\eta_c = 0$). Заменом ових вредности у горњој једначини и решавањем по $\tau \cdot \alpha / U_L$, добија се [52]:

$$\frac{\tau \cdot \alpha}{U_L} = \frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \quad (3.30)$$

где је:

$T_{c,NOCT}$ – номинална погонска температура *PV* ћелије [$^{\circ}\text{C}$],

$T_{a,NOCT}$ – температура околине за коју је дефинисана *NOCT* [20°C] и

$G_{T,NOCT}$ – количина соларног зрачења при којој је дефинисана *NOCT* [0.8 kW/m^2].

Пошто је члан $(\eta_c / \tau \cdot \alpha)$ занемарљиво мали у поређењу са целим изразом $(1 - \eta_c / \tau \cdot \alpha)$, препоручује се да вредност за $\tau \cdot \alpha$ износи 0.9. Уз претпоставку да се радна тачка *PV* модула увек мери при максималној снази, произилази да је ефикасност *PV* ћелије једнака ефикасности која одговара максималној снази, као што следи [52]:

$$\eta_c = \eta_{mp} \quad (3.31)$$

где је:

η_{mp} – ефикасност *PV* модула при максималној снази [%].

Ако се узме да је $\tau \cdot \alpha / U_L$ константно и ако се η_c замени са η_{mp} у једначину (3.29), температура *PV* ћелије постаје [52.58]:

$$T_c = T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\eta_{mp}}{\tau \cdot \alpha} \right) \quad (3.32)$$

Како η_{mp} зависи од T_c , узима се да је зависност ефикасности од температуре *PV* модула линеарна [52,58]:

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,STC} \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{c,STC})] \quad (3.33)$$

где је:

$\eta_{mp,STC}$ – ефикасност у тачки максималне снаге при *STC*–условима [%],

α_p – температурни коефицијент снаге [%/°C] и

$T_{c,STC}$ – температура *PV* ћелије при *STC*–условима [25°C].

Температурни коефицијент снаге (α_p) је негативан број који показује како ефикасност *PV* модула опада са порастом температуре *PV* ћелије. Заменом израза за ефикасност *PV* модула у претходну једначину за температуру *PV* ћелије, добија се коначна једначина за температуру *PV* ћелије у неком временском интервалу [52,57.58]:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \cdot \left[1 - \frac{\eta_{mp,STC} \cdot (1 - \alpha_p \cdot T_{c,STC})}{\tau \cdot \alpha} \right]}{1 + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \cdot \frac{(\alpha_p \cdot \eta_{mp,STC})}{\tau \cdot \alpha}} \quad (3.34)$$

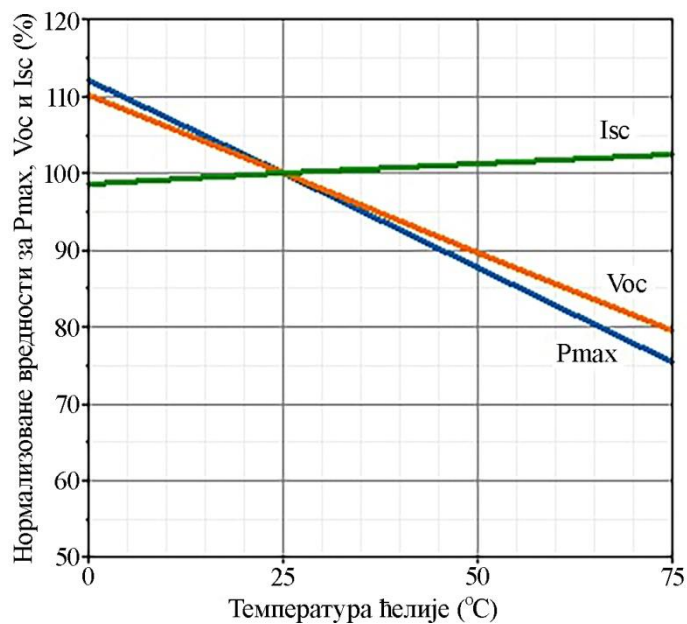
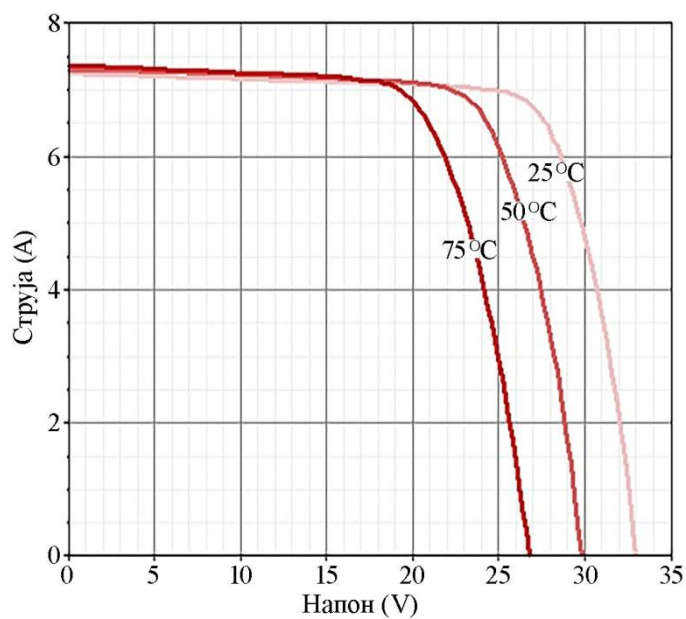
У Табели 3.6 приказане су просечне вредности температурног коефицијента снаге за различите типове *PV* модула, док Табела 3.7 приказује просечне вредности ефикасности различитих типова *PV* модула при *STC*. На Сликама 3.11 и 3.12 приказане су зависности температуре *PV* ћелије од снаге, напона и струје.

Табела 3.6 Просечне вредности температурног коефицијента снаге за различите типове *PV* модула [52]

| Тип <i>PV</i> модула | Број <i>PV</i> модула у истраживању | Извештај о <i>PV</i> модулима | Просечна вредност α_p [%/°C] |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Поликристални силицијум | 10 | 7 | -0.48 |
| Монокристални силицијум | 8 | 4 | -0.46 |
| Монокристални/аморфни силицијум | 1 | 1 | -0.30 |
| Аморфни силицијум са танким филмом | 4 | 4 | -0.20 |
| Танки филм CIS | 1 | 1 | -0.60 |

Табела 3.7 Просечне вредности ефикасности различитих типова *PV* модула при *STC* [52]

| Тип <i>PV</i> модула | Број <i>PV</i> модула у истраживању | Ефикасност при <i>STC</i> -условима [%] |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Поликристални силицијум | 10 | 13 |
| Монокристални силицијум | 8 | 13.5 |
| Монокристални/аморфни силицијум | 1 | 16.4 |
| Аморфни силицијум са танким филмом | 4 | 5.5 |
| Танки филм CIS | 1 | 8.2 |

Слика 3.11 Зависност температуре *PV* ћелије од снаге, напона и струје [52]Слика 3.12 Зависности напона и струје за различите вредности температуре *PV* ћелије [52]

3.3.3 Хибридни генератор

У хибридном генератору се хемијска енергија горива директно претвара у електричну енергију, при чему се врши рекулерација топлоте која се путем

когенерације користи за грејање. Погонско гориво хибридног генератора је мешавина дизел горива, биогаса добијеног гасификацијом дрвне биомасе и водоника добијеног електролизом воде. Сваки хибридни генератор има своју криву ефикасности потрошње горива у односу на произведену електричну енергију, у зависности од два коефицијената F_0 и F_1 . Потрошња горива у функцији од снаге хибридног генератора представљена је линеарном зависношћу и у одређеном часу се може одредити помоћу следећег израза [52,53,93]:

$$F = F_0 \cdot Y_{gen} + F_1 \cdot P_{gen} \quad (3.35)$$

где је:

F – часовна потрошња горива у хибридном генератору [l/h или kg/h],

F_0 – коефицијент потрошње горива при максималној снази [(l/h)/kW или (kg/h)/kW],

F_1 – коефицијент нагиба криве потрошње горива при стварној снази [(l/h)/kW или (kg/h)/kW],

Y_{gen} – максимална (називна) снага хибридног генератора [kW] и

P_{gen} – електрична снага хибридног генератора [kW].

Ефикасност хибридног генератора је променљива и у сваком часу се израчунава као однос излазне електричне енергије генератора и улазне хемијске енергије горива генератора према следећем изразу [52]:

$$\eta_{gen} = \frac{3.6 \cdot P_{gen}}{m_{fuel} \cdot LHV_{fuel}} \quad (3.36)$$

где је:

m_{fuel} – количина горива у хибридном генератору [l или kg],

LHV_{fuel} – доња топлотна моћ горива [MJ/kg],

фактор 3.6 потиче из чињенице да је 1 kWh = 3.6 MJ.

Количина горива је повезана са потрошњом горива у хибридном генератору, али тачан однос зависи од јединица за гориво. Ако је јединица за гориво kg, онда су m_{fuel} и F једнаки, па је једначина за количину горива следећа [52]:

$$m_{fuel} = F = F_0 \cdot Y_{gen} + F_1 \cdot P_{gen} \quad (3.37)$$

Ако је јединица за гориво литар, однос између m_{fuel} и F уводи у једначину за количину горива густину горива, па она постаје [52]:

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} \cdot \left(\frac{F}{1000} \right) = \frac{\rho_{fuel} \cdot (F_0 \cdot Y_{gen} + F_1 \cdot P_{gen})}{1000} \quad (3.38)$$

где је:

ρ_{fuel} – густина горива [kg/m³].

За ефикасност хибридног генератора се даље добија [52]:

$$\eta_{gen} = \frac{3600 \cdot P_{gen}}{\rho_{fuel} \cdot (F_0 \cdot Y_{gen} + F_1 \cdot P_{gen}) \cdot LHV_{fuel}} \quad (3.39)$$

Ако се бројилац и именилац из претходне једначине поделе са називном снагом хибридног генератора и ако се дефинише нови симбол за релативни однос $p_{gen} = P_{gen} / Y_{gen}$, онда израз за ефикасност постаје [52]:

$$\eta_{gen} = \frac{3600 \cdot p_{gen}}{\rho_{fuel} \cdot (F_0 + F_1 \cdot p_{gen}) \cdot LHV_{fuel}} \quad (3.40)$$

Ако је јединица за гориво kg, израз за ефикасност хибридног генератора је [52]:

$$\eta_{gen} = \frac{3.6 \cdot p_{gen}}{(F_0 + F_1 \cdot p_{gen}) \cdot LHV_{fuel}} \quad (3.41)$$

За прорачун трошкова хибридног генератора користи се следећа формула [52,53]:

$$c_{gen, fixed} = c_{om, gen} + \frac{c_{rep, gen}}{R_{gen}} + F_0 \cdot Y_{gen} \cdot c_{fuel, eff} \quad (3.42)$$

где су:

$c_{om, gen}$ – трошкови *П&О* хибридног генератора [USD/h],

$c_{rep, gen}$ – трошкови замене [USD],

R_{gen} – животни век хибридног генератора [h] и

$c_{fuel, eff}$ – цена горива са трошковима загађујућих честица [USD/l или USD/kg].

Важна карактеристика хибридних генератора је њихов животни век који представља број радних сати током којих генератор може поуздано да производи струју уз правилно одржавање. Животни век хибридног генератора се процењује помоћу следеће једначине [52]:

$$R_{gen} = \frac{R_{gen, h}}{N_{gen}} \quad (3.43)$$

где су:

$R_{gen, h}$ – животни век хибридног генератора [h] и

N_{gen} – време погона хибридног генератора у току године [h/yr].

За разлику од животног века за већину компонената, животни век хибридног генератора се не изражава у годинама погона већ у часовима. Није увек лако добити податке о животном веку неког хибридног генератора, јер он зависи од услова погона, фреквенције, одржавања, квалитета горива и других фактора. Међутим, могуће је проценити животни век на основу типа хибридног генератора. Табела 3.8 може послужити за процену животног века неких типова хибридних генератора.

Табела 3.8 Животни век различитих типова хибридних генератора

| Тип хибридног генератора | Опсег снаге [kW] | Предвиђени животни век [h] |
|---|---------------------|-------------------------------|
| Генератор на бензин, природни гас или пропан, са ваздушним хлађењем, брзине 3600 об/мин | 1-10 | 250-1000 |
| Дизел генератор са ваздушним хлађењем, брзине 3600 об/мин | 4-20 | 6000-10000 |
| Генератор на природни гас или пропан, са течним хлађењем, брзине 1800 об/мин | 15-50 | 6000-10000 |
| Дизел генератор са течним хлађењем | 7-10000 | 20000-80000 |
| Генератор са микротурбином на природни гас | 25-500 | 50000-80000 |

3.3.4 Претварач

Да би неки хибридни енергетски систем трансформисао и преносио електричну енергију између AC и DC стране, користи се претварач састављен од инвертора и исправљача. Излазна снага претварача може се израчунати помоћу следећег израза [81]:

$$P_{inv,out} = \eta_{inv} \cdot P_{DC} \quad (3.44)$$

$$P_{rec,out} = \eta_{rec} \cdot P_{AC} \quad (3.45)$$

где је:

$P_{inv,out}$ – излазна снага инвертора [kW],

$P_{rec,out}$ – излазна снага исправљача [kW],

η_{inv} – ефикасност инвертора [%],

η_{rec} – ефикасност исправљача [%],

P_{DC} – наизменична улазна снага [kW] и

P_{AC} – једносмерна улазна снага [kW].

3.3.5 Батерија

Основне карактеристике неке батерије су: номинални напон, крива капацитета која показује капацитет пражњења батерије у Ah у зависности од излазне струје у A, крива животног века изражена бројем циклуса пуњења и пражњења које батерија може да издржи са повећањем дубине пражњења, минимални ниво енергије испод којег не сме ићи пражњење батерије да се она не би трајно оштетила и повратна ефикасност (ефикасност пуњења) батерије која представља однос енергије коју батерија складишти (излазна енергија) према укупној енергији која се инјектира у батерију (улазна енергија).

Животни век батерије може се проценити помоћу следећег израза [52,53]:

$$R_{batt} = \begin{cases} \frac{N_{batt} \cdot Q_{lifetime}}{Q_{thrpt}} & \text{ако је ограничен пропусношћу} \\ R_{batt,f} & \text{ако је ограничен временом} \\ \text{MIN} \left(\frac{N_{batt} \cdot Q_{lifetime}}{Q_{thrpt}}, R_{batt,f} \right) & \text{ако је ограничен пропусношћу и временом} \end{cases} \quad (3.46)$$

где је:

R_{batt} – животни век батерије [yr],

N_{batt} – број батерија у систему (или јединици),

$Q_{lifetime}$ – пропусна моћ једне батерије у току животног века [kWh],

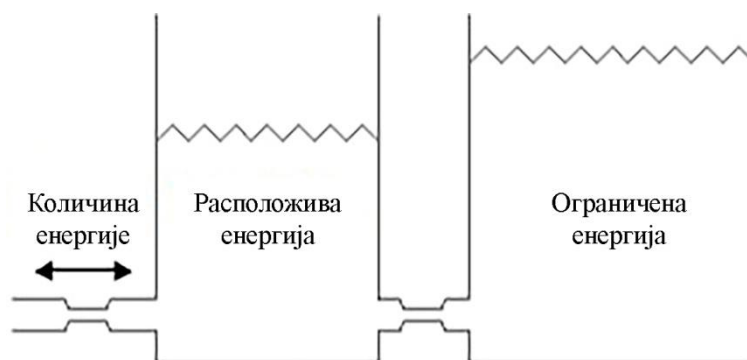
Q_{thrpt} – годишњи проток енергије батерије (укупна количина електричне енергије коју батеријски систем испоручи у току једне године) [kWh/ yr] и

$R_{batt,f}$ – максимални животни век батерије без обзира на њену пропусност [yr].

Да би се одредила количина електричне енергије која се може ускладиштити у батерији или преузети из батерије у било ком временском интервалу, користи се кинетички електрохемијски модел батерије заснован на фундаменталним законима електрохемијске термодинамике и преноса масе. Према овом моделу, батерија се третира као систем састављен од два резервоара као што је приказано на Слици 3.13. Први резервоар садржи „расположиву

енергију” или *DC* електричну енергију која је лако доступна. Други резервоар садржи „ограничену енергију”, или енергију која је хемијски везана и није моментално доступна.

Погон оваквог батеријског система са два резервоара описује се са следећа три параметра: максимални (или теоријски) капацитет складиштења (Q_{max}) – укупна количина енергије коју два резервоара могу да садрже и представља комбинацију доступне и ограничене енергије; коефицијент капацитета (c) – однос величине расположивог резервоара енергије и укупне величине оба резервоара; константа складиштења (k) – која се односи на енергетски проток између два резервоара и представља мерило брзине којом батерија може претворити ограничену енергију у расположиву или обрнуто.



Слика 3.13 Кинетички електрохемијски модел батерије за складиштење електричне енергије [53]

Укупна количина електричне енергије у батерији у било којем тренутку једнака је збиру расположиве и ограничене енергије [52]:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3.47)$$

где су:

Q_1 – расположива енергија и

Q_2 – ограничена енергија.

Користећи диференцијалне једначине, може се показати да је максимална снага пражњења која се може добити пражњењем кинетичког модела батерије у одређеном временском периоду Δt дата следећом једначином [52]:

$$P_{batt,dmaxkbn} = \frac{-k \cdot c \cdot Q_{max} + k \cdot Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (3.48)$$

Слично томе, максимална снага пуњења којом се кинетички модел батерија може напунити у одређеном временском периоду Δt дата је следећом једначином [52]:

$$P_{batt,cmaxkbn} = \frac{k \cdot Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (3.49)$$

Када се одреде максималне снаге пражњења и пуњења, могу се израчунати резултантне количине расположиве и ограничене енергије на крају временског корака помоћу [52]:

$$Q_{1,end} = Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(Q \cdot k \cdot c - P) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} + \frac{P \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (3.50)$$

$$Q_{2,end} = Q_2 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot (1 - c) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) + \frac{P \cdot (1 - c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (3.51)$$

где је:

Q_1 – расположива енергија у батерији на почетку временског корака [kWh],

Q_2 – ограничена енергија у батерији на почетку временског корака [kWh],

$Q_{1,end}$ – расположива енергија у батерији на крају временског корака [kWh],

$Q_{2,end}$ – ограничена енергија у батерији на крају временског корака [kWh],

P – снага пуњења/пражњења резервоара батерије [kW],

c – коефицијент односа капацитета,

k – константа складиштења [h^{-1}] и

Δt – временски корак [h].

Максимална снага пуњења $P_{batt,cmaxkbn}$ користи се при доношењу одлуке о томе да ли батерија може да прихвати сав вишак електричне енергије из *ОИЕ* или о томе колико више електричне енергије хибридни генератор треба да произведе. Максимална снага пуњења варира од једног временског корака до другог у складу са нивоом напуњености и новијом историјом пуњења и пражњења, према једначини [52]:

$$P_{batt,cmax} = \frac{MIN(P_{batt,cmaxkbn}, P_{batt,cmaxmcr}, P_{batt,cmaxmcc})}{\eta_{batt,c}} \quad (3.52)$$

при чему су:

$$P_{batt,cmaxkbn} = \frac{k \cdot Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (3.53)$$

$$P_{batt,cmaxmcr} = \frac{(1 - e^{-\alpha_c \cdot \Delta t}) \cdot (Q_{max} - Q)}{\Delta t} \quad (3.54)$$

$$P_{batt,cmaxmcc} = \frac{N_{batt} \cdot I_{max} \cdot V_{nom}}{1000} \quad (3.55)$$

где су:

Q – укупна количина ускладиштене енергије на почетку временског корака [kWh],

α_c – коефицијент максималне брзине пуњења батерије [A/Ah],

Q_{max} – максимална количина ускладиштене енергије [kWh],

N_{batt} – број батерија у систему,

I_{max} – максимална јачина струје пуњења батерије [A],

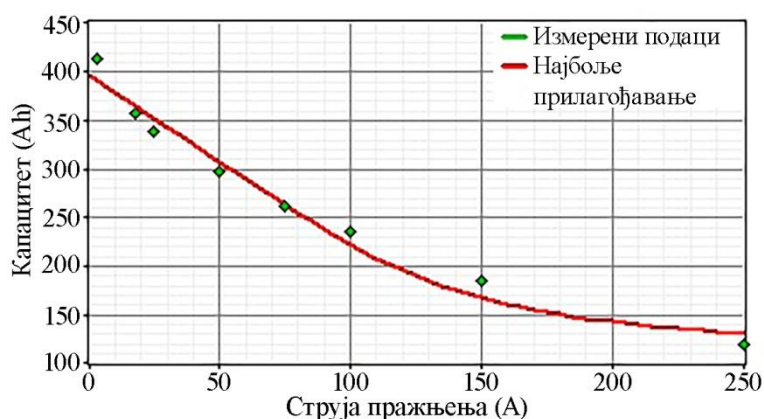
V_{nom} – номинални напон батерије [V].

Ефикасност батерије се дефинише као удео ускладиштене енергије који се може из ње извући и претпоставља се да су ефикасности пуњења и пражњења батерије једнаке, што је једнако квадратном корену из ефикасности пуњења и пражњења, тј. [52]:

$$\eta_{batt,c} = \eta_{batt,d} = \sqrt{\eta_{batt,rt}} \quad (3.56)$$

За $\eta_{batt,rt}$ узима се да износи око 80%.

Кинетичком електрохемијском моделу батерије са дубоким пражњењем својствена је зависност капацитета од струје пражњења као што је приказано на Слици 3.14. При великим брзинама пражњења, која представља брзину којом се батерија празни у односу на свој максимални капацитет, расположива енергија се веома брзо празни а мала количина ограничене енергије се претвара у расположиву пре него што се батерија потпуно не испразни. У том случају батерија тешко подноси високу брзину пражњења и бива потпуно испражњена. Крива са Сlike 3.14 представља криву пражњења батерије и користи се за процену три параметра кинетичког модела батерије.



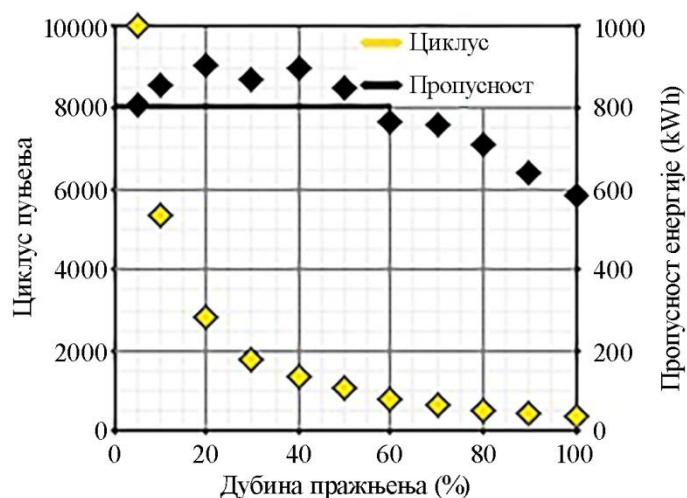
Слика 3.14 Зависност капацитета од струје пражњења за батерију са дубоким пражњењем [52,53]

Моделирање батерије као система са два резервоара има два ефекта. Прво, то значи да се батерија тренутно и потпуно не може напунити или испразнити; потпуно пуњење захтева бесконачно време при струји пуњења која асимптотски тежи нули. Друго, то значи да пражњење или пуњење батерије не зависи само од тренутног нивоа напуњености, већ и од претходне историје пуњења и пражњења. Батерија која се брзо пуни до 80% нивоа напуњености је способна за већу брзину

пражњења него батерија сличних перформанси која се брзо празни до 80%, јер у том случају има више енергије на располагању.

Ако животни век батерије зависи од њене пропусне моћи, претпоставља се да се батерија мора заменити после одређеног броја циклуса пуњење-пражњење, без обзира на дубину пражњења у појединачним циклусима. Ово се користи код процене животног века и трошкова батерије. На Слици 3.15 приказана је зависност животног века од дубине пражњења за оловно-киселинску батерију дубоког циклуса.

Број циклуса, приказан жутим *diamond*-има на Слици 3.15, опада са повећањем дубине пражњења. За сваку тачку ове криве може се израчунати пропусност батерије (укупна количина енергије која се може напунити и испразнити током целог животног века батерије) као производ броја циклуса, дубине пражњења, номиналног напона батерије и максималног капацитета батерије. Крива која на Слици 3.15 повезује црне *diamond*-е, приказује доста слабију зависност броја циклуса од дубине пражњења.



Слика 3.15 Крива животног века трајања батерије [52,53]

Ако се претпостави да пропусност батерије (током животног века) не зависи од дубине пражњења, онда се једноставно може проценити животни век батерије. То се постиже праћењем количине енергије која циркулише кроз њу, без потребе да се разматра дубина пуњења и пражњења кроз циклусе. Пропусна моћ батерије у току животног века може се проценити помоћу [52,53]:

$$Q_{lifetime,i} = f_i \cdot d_i \cdot \left(\frac{Q_{max} \cdot V_{nom}}{1000} \right) \quad (3.57)$$

где су:

f_i – број циклуса и

d_i – дубина пражњења (%).

На крају, трошкови коришћења батерије у зависности од енергије која циркулише кроз њу су [52,53]:

$$c_{bv} = \frac{C_{rep,batt}}{N_{batt} \cdot Q_{lifetime} \cdot \sqrt{\eta_{rt}}} \quad (3.58)$$

где су:

$C_{rep,batt}$ – трошкови замене батерије [USD].

3.3.6 Регулатор термичког оптерећења (*TLC*–регулатор)

TLC–регулатор омогућава да се вишак произведене електричне енергије искористи за снабдевање оптерећења на топоводној магистрали. *TLC*–регулатор се не користи за системе са термичким оптерећењем, али без њега се не може утрошити вишак произведене електричне енергије. То је примарни генератор топлотне енергије, док се преостали део топлотне енергије добија из бојлера на дизел гориво и рекулацијом из хибридног *CHP* дизел генератора. Уважавајући ефикасност конверзије вишка електричне енергије, стварни излаз из *TLC*–регулатора је [76]:

$$TLC_t = \eta_{excess} \cdot EE_{excess} \quad (3.59)$$

где је:

EE_{excess} – вишак електричне енергије произведене из *OIE* или хибридног генератора [kWh].

3.3.7 Бојлер

Бојлер се моделира као компонента која може да обезбеди неограничено велику количину топлоте за било коју потребу. Бојлер се може укључити у било који хибридни систем са топлотним оптерећењем. Претпоставља се да се потрошња горива у бојлеру не може ограничити и да не може трошити биогаз из биомасе и ускладиштени водоник. Модел бојлера захтева задавање следећих података: врста горива са степеном искоришћења конверзије горива у топлоту и коефицијент емисије загађујућих честица у грамама по количини потрошеног горива у литрима. С обзиром да се у овом случају фиксни трошкови занемарују, маргинални трошкови бојлера се могу одредити помоћу [52,53]:

$$c_{boiler,mar} = \frac{3.6 \cdot (c_{fuel} + c_{boiler,emissions})}{\eta_{boiler} \cdot LHV_{fuel}} \quad (3.60)$$

где је:

c_{fuel} – цена горива [USD/l или USD/kg],

$c_{boiler,emissions}$ – трошкови загађујућих честица из бојлера [USD/l или USD/kg] и

η_{boiler} – ефикасност бојлера (%).

Трошкови емисије загађујућих честица из бојлера израчунавају се помоћу следећег израза [52]:

$$c_{boiler,emissions} = \frac{c_{CO_2} \cdot \gamma_{CO_2} + c_{CO} \cdot \gamma_{CO} + c_{UHC} \cdot \gamma_{UHC} + c_{PM} \cdot \gamma_{PM} + c_{SO_2} \cdot \gamma_{SO_2} + c_{NO_x} \cdot \gamma_{NO_x}}{1000} \quad (3.61)$$

где су:

c_{CO_2} , c_{CO} , c_{UHC} , c_{PM} , c_{SO_2} и c_{NO_x} финансијски пенали за емисије CO_2 , CO , несагореле угљоводонике (UHC), атмосферске микрочестице (PM честице), SO_2 и NO_x у [USD/t], редом,

γ_{CO_2} , γ_{CO} , $\gamma_{\text{УНС}}$, γ_{PM} , γ_{SO_2} и γ_{NO_x} количине емисије CO_2 , CO , УНС , PM -честица, SO_2 и NO_x у $[\text{kg}/\text{yr}]$, редом.

У вези с тим, количине емисије CO_2 и SO_2 добијају се помоћу следећих математичких релација [52]:

$$\gamma_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \left[f_{c, \text{fuel}} (1 - \gamma_{\text{УНС}}) - \left(\frac{12}{28} \right) \cdot \gamma_{\text{CO}} \right] \quad (3.62)$$

$$\gamma_{\text{SO}_2} = 2 \cdot f_{s, \text{fuel}} (1 - \gamma_{\text{УНС}} - x_{\text{PM}}) \quad (3.63)$$

где су:

$f_{c, \text{fuel}}$ и $f_{s, \text{fuel}}$ садржаји угљеника и сумпора у гориву, редом, и

x_{PM} удео сумпора у гориву претвореном у честице.

У једначини (3.62), бројиоци и имениоци из разломака $44/12$ и $12/28$ представљају молекулске тежине C , CO и CO_2 које редом износе 12, 28 и 44. По истом принципу, број 2 који се појављује у једначини (3.63) долази од разломка $64/32$ где је бројилац 64 молекулска тежина SO_2 , а именилац 32 молекулска тежина чистог S .

3.3.8 Електролизер

Електролизер је компонента која троши електричну енергију за производњу водоника из воде путем електролизе. Електролиза воде је електрохемијски процес разлагања воде (H_2O) на водоник (H_2 на катоди) и кисеоник (O_2 на аноди) који се може представити следећом хемијском једначином [110]:



Процес електролизе се одвија у електролитичкој ћелији која има две полућелије или електроде (позитивну аноду и негативну катоду) уроњене у водени раствор који садржи електролит (нпр. натријум-хлорид или сумпорну киселину). Реакције у полућелијама зависе од pH вредности електролита. У киселој средини ($pH = 0$) долази до реакције разлагања воде [110]:



У том случају, реакција ослобађања кисеоника се одвија на аноди – једначина (3.65), а реакција ослобађања водоника се одвија на катоди – једначина (3.66). У алкалној средини ($pH = 14$), реакција разлагања воде одвија се на следећи начин [110]:



Да би се спречила рекомбинација гасова који се ослобађају на електродама, у ћелију се уграђује сепаратор у облику мембране направљене од чврстог полимерног електролита, који обезбеђује јонску проводљивост и истовремено одваја гасове. Ефикасност електролизера се дефинише као однос енергије садржане у произведеном водонику, тј. његове доње топлотне моћи (LHV_{H_2}) и електричне енергије утрошене за електролизу. Производња водоника у електролизеру m_{ELYZ} (у kg) заснива се на LHV од 120 MJ/kg, тј. [110]:

$$m_{\text{ELYZ}} = P_{\text{ELYZ}} \cdot \frac{3.6}{120} \cdot \eta_{\text{ELYZ}} \quad (3.69)$$

где је:

P_{ELYZ} – електрична снага електролизера [kW] и

η_{ELYZ} – електрична ефикасност електролизера [%].

Коначно, за сваки електролизер се дефинише минимални однос оптерећења који представља најнижи ниво снаге на којем електролизер може безбедно и ефикасно да функционише у односу на његову називну (максималну) снагу.

3.3.9 Резервоар водоника

У резервоару водоника се складишти водоник добијен у електролизеру и одатле се затим одводи до хибридног генератора где се користи као гориво. Због временске разлике између производње водоника и потражње за водоником, складиштење водоника је неизбежно. Почетна количина водоника у неком резервоару може се дефинисати као процентуални део запремине резервоара или апсолутна количина у килограмима. Такође, може се захтевати да ниво водоника у резервоару на крају године буде једнак или већи од почетног, што омогућава систему да буде самоефикасан (аутономан) по питању количине водоника. За разматрани хибридни систем, претпостављено је складиштење водоника у резервоару где неће бити вишка на крају године. То се математички може исказати на следећи начин [52,53]:

$$\sum_0^{8760} m_{ELYZ} - \sum_0^{8760} m_{fuel} = 0 \quad (3.70)$$

У вези с тим, аутономија резервоара водоника представља однос енергетског капацитета тог резервоара и електричног оптерећења, а може се израчунати помоћу [52,53]:

$$A_{htank} = \frac{Y_{htank} \cdot LHV_{H_2} \cdot 24}{L_{prim.ave} \cdot 3.6} \quad (3.71)$$

где је:

A_{htank} – аутономија резервоара водоника [h],

Y_{htank} – капацитет резервоара водоника [kg] и

$L_{prim.ave}$ – просечно примарно оптерећење [kWh/day].

3.4 Економско моделирање

Економичност игра значајну улогу у симулацијама процеса управљања системом где се обично тежи укупним *NPC*–трошковима, као и оптимизацији система где се тражи конфигурација система са најнижим укупним *NPC*–трошковима.

Конвенционални извори енергије и *ОИЕ* обично имају различите карактеристичне трошкове. *ОИЕ* обично имају високе почетне капиталне трошкове и ниске погонске трошкове, док конвенционални необновљиви извори енергије имају ниске капиталне и високе погонске трошкове. Укупни *NPC*–трошкови се користе за представљање трошкова током животног века система. Они укључују све трошкове и приходе који се јављају током животног века система у један износ, заједно са будућим новчаним токовима уз одређену обрачунску каматну стопу. Конкретно, укупни *NPC*–трошкови укључују трошкове почетне изградње, замене компонената, одржавање, гориво, трошкове куповине електричне енергије из мреже и разне трошкове као што су финансијски пенали за емисије *GHG*. На другој страни, приходи обухватају приходе од продаје електричне енергије локалном електропривредном предузећу, као и сваку додатну вредност на крају животног века система. Код *NPC*–трошкова, трошкови су позитивни, а приходи негативни. Претпоставља се да све цене расту истом брзином током животног века система. Уз ту претпоставку, инфлација се може уклонити из анализе будућих новчаних токова применом каматне стопе (прилагођене инфлацији) уместо номиналне каматне стопе. Иначе, реална каматна стопа је приближно једнака номиналној каматној стопи умањеној за стопу инфлације. Укупни *NPC*–трошкови се израчунавају помоћу следеће формуле [52,53,76,81,91,104]:

$$C_{NPC,tot} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF \cdot (i, R_{proj})} \quad (3.72)$$

где су:

$$CRF \cdot (i, N) = \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.73)$$

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3.74)$$

$C_{ann,tot}$ – укупни годишњи трошкови система [USD/yr],

i – реална дисконтна стопа [%],

R_{proj} – животни век система [yr],

$CRF()$ – функција која дефинише фактор поврата капитала,

i' – номинална дисконтна стопа [%],

f – очекивана стопа инфлације [%] и

N – број година.

Нивелисани COE –трошкови се дефинишу као просечна цена по kWh енергије коју производи систем и одређују се као количник разлике између укупних годишњих трошкова система и трошкова снабдевања топлотног оптерећења са укупно покривеним електричним оптерећењем, као што је дато у следећој једначини [52,53,76,81,91]:

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - c_{boiler} \cdot H_{served}}{E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{def}} \quad (3.75)$$

где су:

c_{boiler} – маргинални трошкови бојлера [USD/kWh],

H_{served} – укупно топлотно оптерећење [kWh/yr],

$E_{prim,AC}$ – укупна количина AC електричне енергије утрошена за покривање примарног оптерећења [kWh/yr],

$E_{prim,DC}$ – укупна количина DC електричне енергије утрошена за покривање примарног оптерећења [kWh/yr] и

E_{def} – укупна количина електричне енергије утрошена за покривање одложеног оптерећења [kWh/yr].

За сваку компоненту система, одређују се почетни инвестициони трошкови који се јављају у нултој години, трошкови замене који се јављају сваки пут када је неопходно заменити компоненту на крају њеног животног века и трошкови *П&О* који се јављају сваке године у току животног века система. Корисник одређује животни век већине компонената, али софтвер *HOMER Pro* израчунава животни век батерије и генератора како је то већ раније описано. Трошкови замене неке компоненте могу се разликовати од њених почетних инвестиционих трошкова, као нпр., донаторске агенције или програми откупа могу покрити неке или све почетне инвестиционе трошкове *PV* модула, али не и трошкове замене. У том случају, трошкови замене могу бити већи од почетних инвестиционих трошкова. Приликом анализе реконструкције постојећег система са дизел генератором, почетни инвестициони трошкови дизел генератора били би нула јер је већ плаћен и инсталиран и представља неповратни трошак, али трошкови замене били би значајно већи јер ће на крају његовог животног века бити потребан велики ремонт.

Сачувана вредност сваке компоненте на крају животног века система се одређује помоћу следећег израза [52,53]:

$$S = C_{rep} \cdot \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (3.76)$$

Преостало време погона неке компоненте на крају животног века система (R_{rem}) је [52,53]:

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad (3.77)$$

Трајање трошкова замене (R_{rep}) представља време у току којег се замењује компонента у току животног века система и израчунава се помоћу следећег израза [52,53]:

$$R_{rep} = R_{comp} \cdot INT \left(\frac{R_{proj}}{R_{comp}} \right) \quad (3.78)$$

при чему су значења преосталих параметара:

C_{rep} – трошкови замене компоненте [USD],

R_{comp} – животни век компоненте [уг] и

$INT(\)$ – функција која издваја целобројни део неког реалног броја. На пример

$INT(6.843)=6$.

Тако на пример, ако је животни век система 20 година, а век трајања PV генератора исто 20 година, сачувана вредност PV генератора на крају животног века система биће нула јер нема преосталог животног века. С друге стране, ако је век трајања PV генератора 30 година, на крају 20-огодишњег животног века система његова сачувана вредност износиће трећину трошкова замене.

3.5 Удео вишка електричне енергије

Удео вишка електричне енергије (EE) представља ону количину енергије која се мора одложити (или ограничити) јер се не може користити за покривање оптерећења или пуњење батерије. Удео вишка електричне енергије је вишак који се појављује на излазу из OIE или хибридног генератора када минимална излазна снага тог извора премаши оптерећење, а батерије нису у стању да ускладиште сву произведену електричну енергију. Један од начина за смањење вишка електричне енергије је коришћење TLC -регулатора, који може вишак електричне енергије да претвори у топлотну енергију неопходну за термичко оптерећење. Ако се вишак електричне енергије не може искористити, онда се вишак електричне енергије мора потрошити на одложено оптерећење, које се обично састоји од једног отпорног грејача или групе сијалица. У неким случајевима, вишак електричне енергије представља количину електричне енергије која се може редуковати уместо да се потроши на одложено оптерећење.

Удео вишка електричне енергије представља однос укупног вишка електричне енергије и укупно произведене електричне енергије чија се вредност на крају сваке симулације израчунава помоћу следеће једначине [52,53,76,91]:

$$f_{excess} = \frac{E_{excess}}{E_{prod}} \quad (3.79)$$

где је:

E_{excess} – укупан вишак електричне енергије [kWh] и

E_{prod} – укупно произведена електрична енергија [kWh].

3.6 Удео обновљивих извора енергије

Удео обновљивих извора енергије (RF) је део енергије која се користи за снабдевање оптерећења, а која потиче из OIE . Удео OIE се израчунава на следећи начин [52,76,91]:

$$f_{ren} = 1 - \frac{(E_{prod} - E_{ren}) + (H_{prod} - H_{ren})}{E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{def} + H_{served}} \quad (3.80)$$

где је:

E_{ren} – производња електричне енергије из OIE [kWh],

H_{prod} – укупна производња топлотне енергије [kWh] и

H_{ren} – производња топлотне енергије из OIE (укупна количина топлотне енергије коју производи хибридни генератор коришћењем горива из OIE) [kWh].

3.7 Остали трошкови погона и одржавања

Остали трошкови погона и одржавања укључују фиксне трошкове $P\&O$ система, финансијски пенал за недостатак капацитета и финансијски пенал за емисију GHG . Остали трошкови $P\&O$ се израчунавају као [24,52]:

$$C_{om,other} = C_{om,fixed} + c_{cs} \cdot E_{cs} + C_{emissions} \quad (3.81)$$

где су:

$C_{om,fixed}$ – фиксни трошкови $P\&O$ система (USD/yr),

c_{cs} – финансијски пенал за недостатак капацитета примењује се према власнику система за сваки недостатак капацитета који се догоди током године (USD/yr),

E_{cs} – укупни недостатак капацитета (kWh/yr),

$C_{emissions}$ – финансијски пенал за емисију *GHG* на годишњем нивоу (USD/yr).

Удео недостатка капацитета једнак је односу укупног недостатка капацитета и укупне потражње за електричном енергијом. Систем се сматра изводљивим (или прихватљивим) само ако је удео недостатка капацитета мањи или једнак максималном годишњем недостатку капацитета. За израчунавање удела недостатка капацитета користи се следећа једначина [52]:

$$f_{cs} = \frac{E_{cs}}{E_{demand}} \quad (3.82)$$

где је:

E_{demand} – укупна потражња за електричном енергијом неопходном за покривање примарног и одложеног оптерећења [kWh/yr].

У било ком временском кораку, трошкови складиштења електричне енергије се израчунавају као просечна цена електричне енергије коју је систем инјектирао у батерију до тог временског корака. Сходно томе, трошкови складиштења електричне енергије $c_{be,n}$ у временском кораку n су [24,52]:

$$c_{be,n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} C_{cc,i}}{\sum_{i=1}^{n-1} E_{cc,i}} \quad (3.83)$$

где су:

$c_{be,n}$ – трошкови складиштења електричне енергије у временском кораку n [USD/kWh],

$C_{cc,i}$ – трошкови циклочног пуњења батерије у временском кораку i [USD] и

$E_{cc,i}$ – количина електричне енергије ускладиштене у батерији у временском кораку i [kWh].

Трошкови складиштења електричне енергије представљају просечан трошак који је систем направио са циљем да напуни батерију. Трошак за један циклус пуњења, који се појављује у бројиоцу једначине (3.83), јесте додатни трошак који је систем засебно направио пуњећи елементе батерије за складиштење. Вишак електричне енергије који пуни батерију у неком временском кораку не представља велики трошак [27]. Међутим, ако хибридни генератор даје више електричне енергије него што је потребно за напајање оптерећења, а то се чини са циљем пуњења батерије, онда сама операција пуњења батерије узрокује додатне трошкове система. Такве ситуације се дешавају рутински када се извршава *CC*-стратегија. У сваком временском кораку у којем хибридни генератор пуни батерију, трошкови цикличног пуњења се израчунавају као разлика између стварних трошкова погона система у датом временском кораку и трошкова који би се имали у том временском кораку да систем није напунио батерију. Трошкови складиштења електричне енергије биће увек једнаки нули ако се извршава *LF*-стратегија, јер тада власник система не плаћа пуњење батерије већ за то користи вишак електричне енергије који се појавио.

Финансијски пенал за емисију *GHG C_{emissions}* израчунава се помоћу израза (3.61), где поред пенала за загађујуће честице из бојлера треба укључити и пенал за загађујуће честице из хибридног генератора (због сагоревања горива).

4. ОПИС ПОСТОЈЕЋЕГ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА ПАСТРМСКОГ РИБЊАКА ЈАБЛАНИЦА СА КАРАКТЕРИСТИКАМА КОМПОНЕНТИ И РАСПОЛОЖИВИМ ОБНОВЉИВИМ РЕСУРСИМА

Одабрана локација је пастрмски рибњак Јабланица који се налази у источној Србији, на удаљености 13 km од села Јабланица у општини Бољевац. Географске координате локације су 43°53'47.47" северне географске ширине и 21°47'11.55" источне географске дужине са надморском висином од 820 m. На Слици 4.1 је приказана локација фирме у Републици Србији.



(a)



(б)

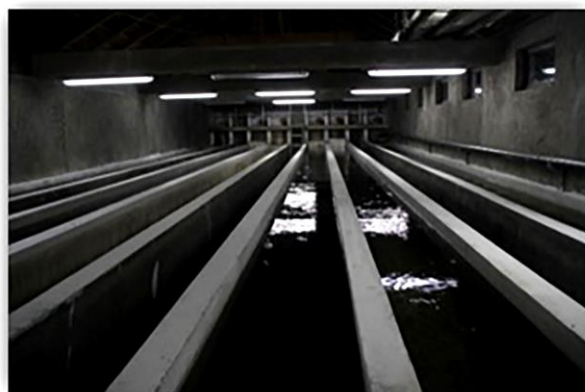
Слика 4.1 Локација пастрмског рибњака Јабланица:
преко Google Maps (a) и из птичје перспективе (б)

Рибњак добија воду из Радованске реке и има све неопходне уређаје и базене за узгој и правилан раст пастрмке: температура воде у рибњаку креће се од 10°C до 17°C и зими не мрзне због локалне микроклиме у којој нема јаких ветрова и мразева, вода је 100% засићена кисеоником чија оптимална количина износи 11 mg по литру док се њен pH фактор креће од 6.5 до 8.5. Захваћена вода се преко водозахвата, који је тиролског типа капацитета 600 l/s, доводи до поља за узгој рибе. Тиролски водозахват је изграђен директно у дну корита реке и састоји се од

ниске преграде преко које прелази вода, а испред ње се у дну налази решетка. Пошто та вода носи вучени и суспендовани нанос иза улазног канала су постављена два базена за таложење наноса, а за њима још 15 базена где се риба храни и тови. Димензије ових базена су $29.5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ са укупном запремином приближно 4500 m^3 . После каскадно постављених базена за узгој рибе, који иду у пет нивоа, вода се сакупља у један већи сабирни базен, одакле се помоћу металне цеви доводи до турбине μXE и испушта преко мерног профила у реку. Такође, ту се налази и 6 мрестилишта у којима се производи млађ рибе из икре домаћих матица или икре увезене из Енглеске и Америке (из Калифорније). У мрестилиштима се млађ гаји до величине од 5 g, после чега се избацује у спољне базене. Ови базени су приказани на Слици 4.2.



(а)



(б)

Слика 4.2 Базени за узгој и тов рибе (а) и мрестилишта (б)

Поред пастрмке, планира се да се у 5 затворених базена узгаја и шаран. Шаран је једна од најтраженијих риба на свету. Узгаја се у топоводним

рибњацима, веома је прилагодљив и отпоран на промене амбијентних услова у којима се налази. Дубина воде у шаранским рибњацима је 1.5 m. Због мале дубине базена, хемијски и биолошки процеси значајно зависе од температуре воде, чија се оптимална вредност креће од 20°C до 27°C. Нагла и висока повишења и снижења температуре воде штетно делују на развој природне рибље хране, што за последицу има поремећај раста рибе. Висока температура воде, нарочито у присуству веће количине органске материје и амонијака условљава појаву различитих болести рибе. Зато је важно да се опсег температуре воде у базенима одржава загревањем воде помоћу рекуперисане отпадне топлоте из *CHP* дизел генератора, *TLC*-регулатора и бојлера. У оквиру рибњака налазе се пословна зграда у којој борави запослено особље, две оставе и један помоћни објекат.

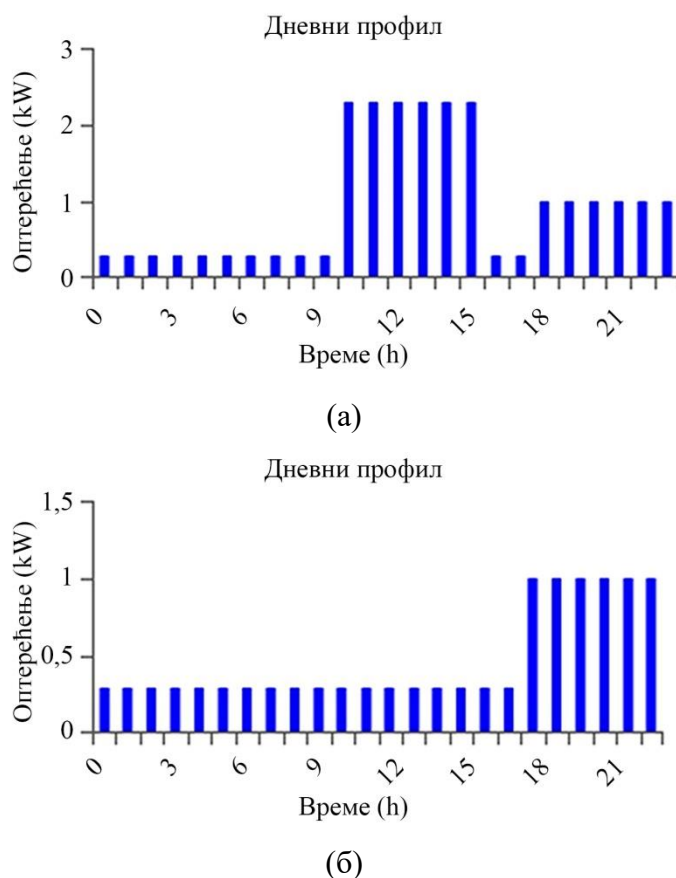
4.1 Дневни профил оптерећења

У првом случају (постојећи систем), електрична енергија коју производи хибридни систем троши се за напајање кућних апарата у пословној згради, затим за осветљавање рибњака, оксигенатор за производњу кисеоника и ледомат за прављење леда за потребе испоруке рибе. Подаци о наведеним потрошачима електричне енергије дати су у Табели 4.1, док су типични дневни профили оптерећења за радне дане и викенде у месецу јануару 2023. године приказани на Слици 4.3.

Табела 4.1 Потражња за електричном енергијом у постојећем систему пастрмског рибњака Јабланица

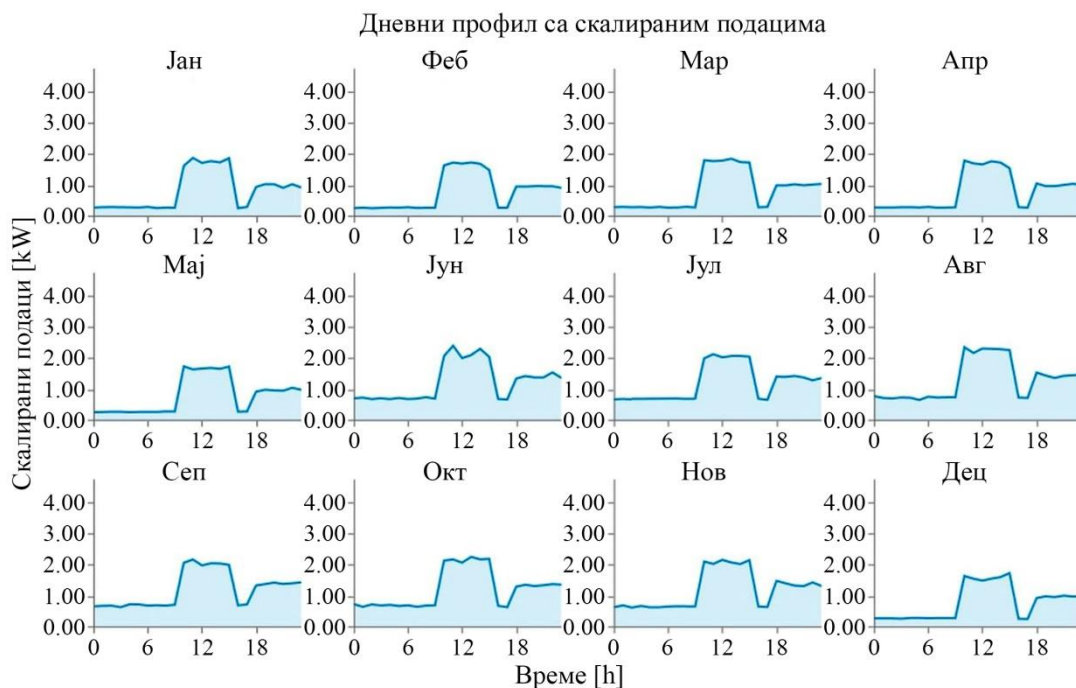
| | Снага (W) | Комада (број) | Погон (h/day) | | Енергија (Wh/day) | |
|---------------|--------------|------------------|------------------|--------|----------------------|--------|
| | | | Радни дани | Викенд | Радни дани | Викенд |
| Кућни апарати | 300 | 1 | 18 | 18 | 5400 | 5400 |
| Осветљење | 100 | 10 | 6 | 6 | 6000 | 6000 |
| Оксигенатор | 400 | 1 | 24 | 24 | 9600 | 9600 |
| Ледомат | 2000 | 1 | 6 | 0 | 12000 | 0 |
| Укупно | | | | | 33000 | 21000 |

Слике 4.3 и 4.4 показују да се вршно електрично оптерећење јавља радним данима у периоду од 10 h до 16 h, а минимално од 0 h до 10 h и од 16 h до 18 h. Током викенда максимално оптерећење је од 18 h до 0 h, а минимално од 0 h до 18 h. Средње годишња потрошња електричне енергије износи 24.79 kWh, вршна снага је 4.73 kW, а фактор оптерећења 0.22.



Слика 4.3 Типични дневни профили оптерећења за постојећи систем пастрмског рибњака Јабланица током: радних дана (а) и викенда (б) у месецу јануару

Профил оптерећења се мења из дана у дан. Комбинацијом варијабилности из дана у дан као и варијабилности из временског корака у временски корак, генеришу се подаци о оптерећењу који изгледају реалистичније. На Сlici 4.4 приказано је просечно дневно оптерећење по месецима, генерисано за 15% варијабилности из дана у дан и 20% варијабилности из временског корака у временски корак.



Слика 4.4 Месечни дијаграми са просечним дневним оптерећењима за постојећи систем пастрмског рибњака Јабланица током радних дана

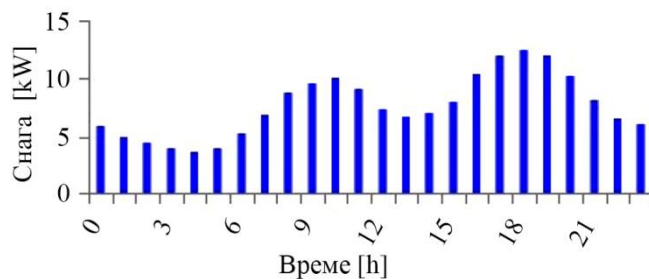
У другом случају (предложени систем), са модификацијом функције рибњака и повећањем оптерећења, уз електричну енергију, хибридни систем ће производити и топлоту за загревање воде у 5 затворених базена где ће се узгајати шаран. Електричном енергијом која се производи у хибридном систему напаја се пословна зграда са следећим допуњеним апаратима у односу на Табелу 4.1, неопходним за функционални живот: замрзивач, фрижидер, електрични шпорет, бојлер, телевизор, компјутер, веш машина, пегла, фен за косу, усисивач, клима уређај, котао за грејање зграде, унутрашње осветљење са 18 сијалица и спољашње осветљење са 15 сијалица. Поред тога, електричном енергијом се снабдевају и следећи уређаји који су неопходни за погон пастрмског рибњака: расхладна комора за потхлађивање рибе док чека испоруку (риба се ту само охлади али не замрзава, нпр. са температуре од 12°C колико је у базену на 6°C у комори), уређаји за распршивање воде који производе кисеоник, ледомат који прави лед на којем се риба транспортује (нпр. за количину рибе од 1 t ледомат се укључи 5 h раније како би се припремио лед), пумпа за ледомат, светло и видео надзор у мрестилишту рибе. Потребни подаци о наведеним апаратима и уређајима дати су у Табели 4.2, док су на Слици 4.5 приказани дневни дијаграми потрошње

електричне енергије за рибњак Јабланица током летњег периода који траје 7 месеци (април - октобар) и зимског периода који траје 5 месеци (новембар - март).

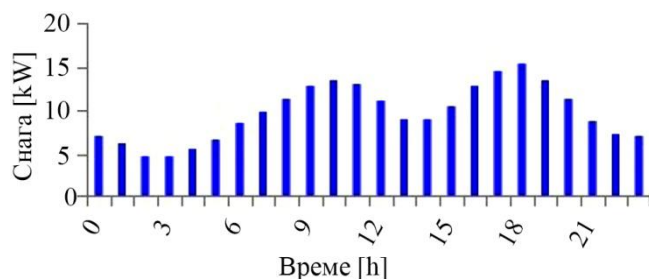
Табела 4.2 Потражња за електричном енергијом у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица

| Апарат или уређај | Снага (W) | Комада (број) | Погон (h/day) | | Енергија (Wh/day) | |
|--------------------------|-----------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | Лето (април-октобар) | Зима (новембар-март) | Лето (април-октобар) | Зима (новембар-март) |
| Замрзивач | 300 | 1 | 14 | 14 | 4200 | 4200 |
| Фрижидер | 200 | 1 | 14 | 14 | 2800 | 2800 |
| Електрични шпорет | 1000 | 1 | 2 | 2 | 2000 | 2000 |
| Бојлер | 2000 | 1 | 3 | 3 | 6000 | 6000 |
| ТВ и компјутер | 300 | 1 | 5 | 5 | 1500 | 1500 |
| Машина за прање веша | 2000 | 1 | 2 | 2 | 4000 | 4000 |
| Пегла | 400 | 1 | 2 | 2 | 800 | 800 |
| Фен за косу | 1500 | 1 | 1 | 1 | 1500 | 1500 |
| Усисивач | 300 | 1 | 1 | 1 | 300 | 300 |
| Клима уређај | 2500 | 1 | 5 | - | 12500 | - |
| Котао за грејање | 16000 | 1 | - | 3 | - | 48000 |
| Унутрашње осветљење | 100 | 18 | 10 | 15 | 18000 | 27000 |
| Спољашње LED осветљење | 40 | 15 | 10 | 15 | 6000 | 9000 |
| Расхладна комора | 10000 | 1 | 2 | 2 | 20000 | 20000 |
| Оксигенатор (кисеоник) | 500 | 6 | 24 | 24 | 72000 | 72000 |
| Ледомат | 2000 | 1 | 5 | 5 | 10000 | 10000 |
| Пумпа за ледомат | 500 | 1 | 5 | 5 | 2500 | 2500 |
| Осветљење и видео надзор | 500 | 1 | 24 | 24 | 12000 | 12000 |
| Укупно | | | | | 176100 | 223600 |

Према Сликама 4.5 и 4.6а, вршно електрично оптерећење јавља се у зимском периоду од 16 h до 19 h, а минимално у летњем периоду од 0 h до 8 h и од 13 h до 16 h. Затим, просечна дневна потрошња електричне енергије током године износи 203.78 kWh, вршна снага 26.5 kW, а фактор оптерећења 0.32.



(а)



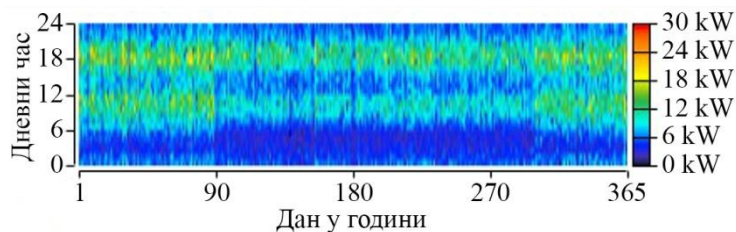
(б)

Слика 4.5 Типичан дневни дијаграм потрошње електричне енергије у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица током: летњег периода (а) и зимског периода (б)

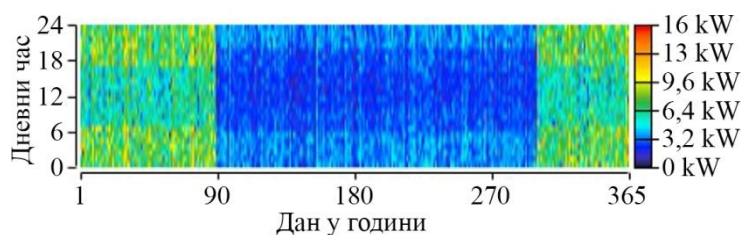
Топлота која би се производила у хибридном систему трошила би се на загревање воде у 5 бетонских базена где ће се узгајати риба шаран. Укупна запремина воде у овим базенима је 843.75 m^3 и она би се загревала помоћу бојлера, *TLC*-регулатора и *CHP* дизел генератора, а температура би се одржавала на 27°C . На Слици 4.6б је приказан годишњи дијаграм потрошње топлотне енергије у рибњаку Јабланица током летњег и зимског периода.

У стварности величина и облик оптерећења варирају из дана у дан. Додавањем дневног и часовног шума, долази до промене дневног профила оптерећења по величини и облику, чиме профил постаје реалистичнији. На Слици 4.6 приказан је годишњи дијаграм оптерећења са дневним и часовним шумом за

15% варијабилност из дана у дан и 20% варијабилност из временског корака у временски корак.



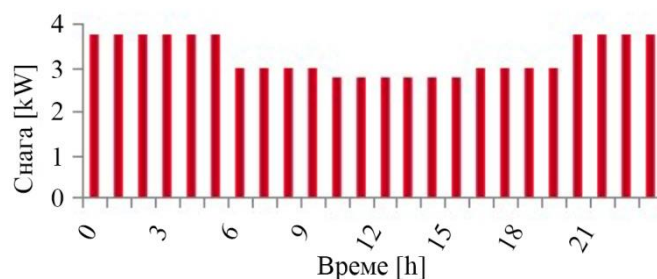
(а)



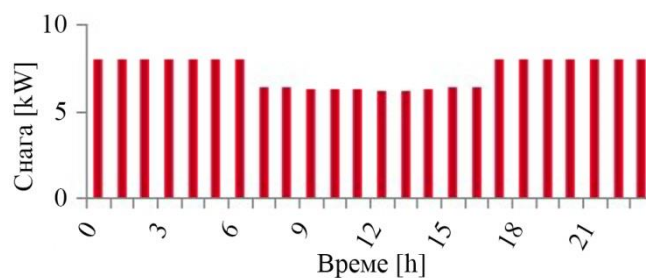
(б)

Слика 4.6 Приказ годишњег дијаграма оптерећења у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица са дневним и часовним шумом за: електрично (а) и тоplotно оптерећење (б)

Према Сликама 4.7 и 4.6б вршно тоplotно оптерећење се јавља у зимском периоду и траје од 17 h до 7 h, а минимално у летњем периоду од 10 h до 16 h. Затим, просечна дневна потрошња тоplotе током године износи 118.21 kWh, вршна снага је 15.6 kW, а фактор оптерећења 0.32.



(а)



(б)

Слика 4.7 Типичан дневни дијаграм потрошње топлотне енергије у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица током: летњег периода (а) и зимског периода (б)

4.2 Потенцијал *ОИЕ* и перформансе појединих компоненти

На основу истраживања спроведених у [59-61] показано је да разматрана локација поседује значајне количине хидроенергије, соларне енергије и биомасе које се могу користити за производњу електричне енергије у хибридном систему.

4.2.1 Хидроенергија и μ ХЕ

За производњу електричне енергије у μ ХЕ користи се вода на излазу из рибњака. После пролаза кроз базене у којима се узгаја пастрмка, вода се сакупља у сабирни базен (таложник) одакле се цевоводом доводи до турбине. На Слици 4.8 приказан је сабирни базен са испустом, док су на Слици 4.9 приказани цевовод и машинска кућица. Хистограм средње месечних протицаја воде за Радованску реку добијен је на основу вишегодишњих мерења [150] и дат је на Слици 4.10. Као што се може видети са Сlike 4.10, проток воде за Радованску реку опада током лета и јесени због великог броја сушних дана, а повећава се током зиме и пролећа услед значајних кишних и снежних падавина. При томе, сушни дани се догађају од месеца маја до месеца новембра, док се кишни дани имају од месеца децембра до месеца априла. Најмањи месечни проток реке је у октобру и износи 90 l/s, док је највећи месечни проток у априлу и износи 845 l/s. Просечан годишњи проток износи 328.04 l/s, а просечан заостали проток, који представља минималну

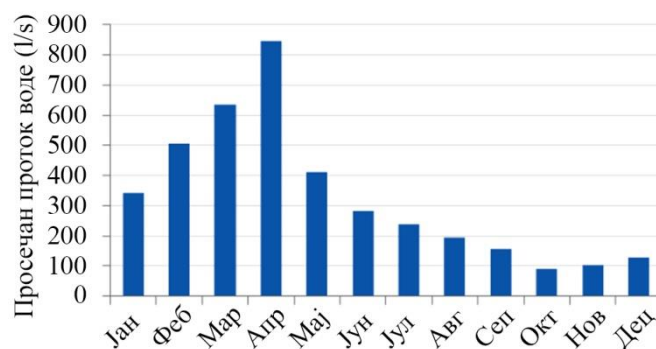
количину воде која се мора оставити да тече реком ради очувања водених екосистема, флоре и фауне, је 32.08 l/s. У Табели 4.3 дати су одговарајући технички и економски подаци о μXE који су коришћени у симулацијама.



Слика 4.8 Сабирни базен са испустом



Слика 4.9 Цевовод и машинска кућица



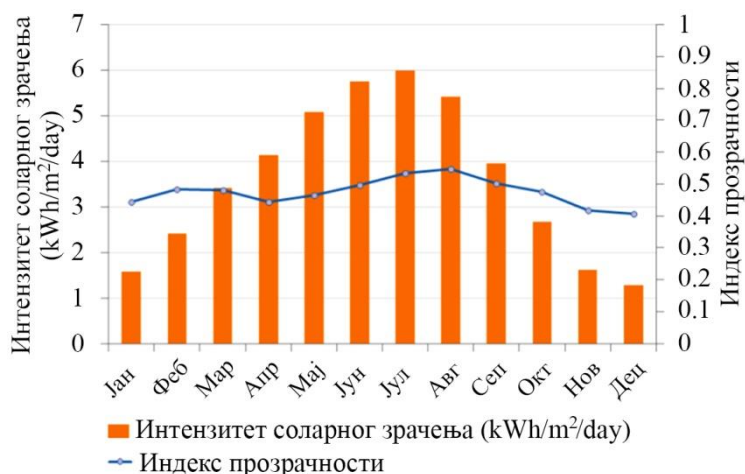
Слика 4.10 Хистограм средње месечних протицаја воде за Радованску реку

Табела 4.3 Техничке и економске перформансе μ ХЕ [18,24,31,151]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|------------|----------------------------------|---|
| μ ХЕ | Тип турбине | Пропелерна S |
| | Опсег протока (l/s) | 220 до 265 (пре модификације турбине) 90 до 360 (после модификације турбине) |
| | Нето пад (m) | 2.9 |
| | Ефикасност (%) | 84.9 (пре модификације турбине) 85.4 (после модификације турбине) |
| | Номинална снага (kW) | 6.4 (пре модификације турбине) 8.5 (после модификације турбине) |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 1000 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 1000 |
| | Трошкови <i>П&О</i> (USD/yr) | 192 |
| | Животни век (yr) | 25 |

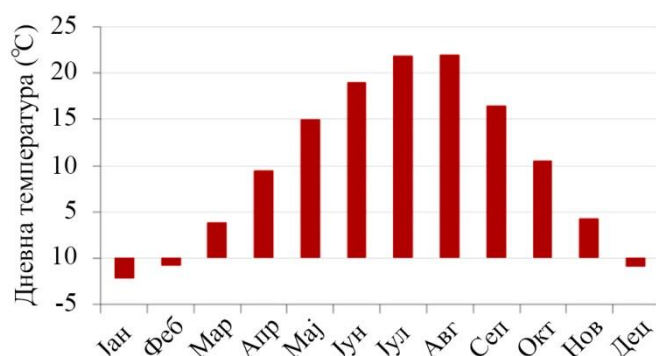
4.2.2 Соларно зрачење и PV генератор

Просечне месечне вредности соларног зрачења и индекса прозачности приказане су на Слици 4.11. Подаци о соларном зрачењу добијени су од *NASA Surface Meteorology and Solar Energy* [55] на основу географске ширине и дужине за град Бољевац, општину у којој се налази пастрмски рибњак Јабланица. Слика 4.11 показује да је ниво соларног зрачења у месецу јулу висок, а у месецу децембру низак. Затим, просечно годишње зрачење износи $3.62 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ а индекс прозачности 0.486.



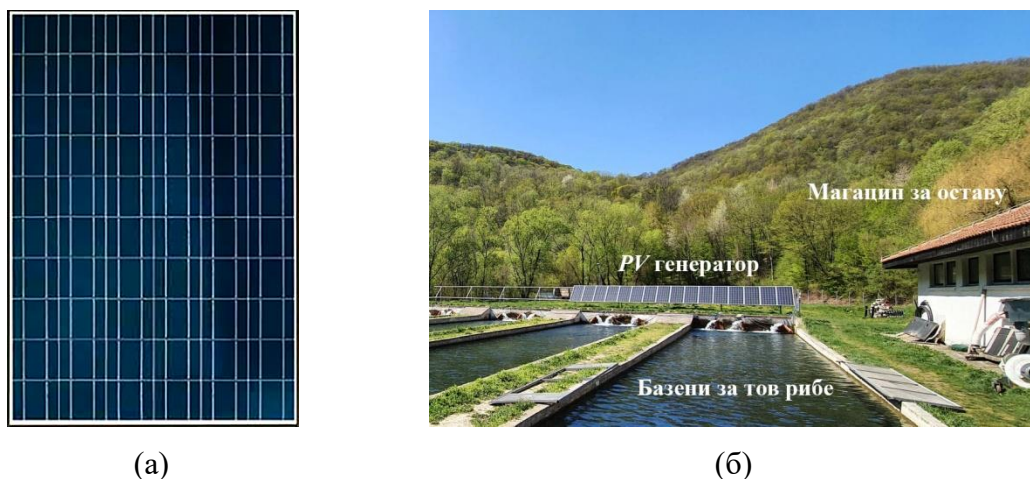
Слика 4.11 Просечне месечне вредности соларног зрачења и индекса прозирности за град Бољевац

Клима општине Бољевац има одлике умерено континенталне климе, са топлим летима и умерено хладним зимама. Подаци о температури ваздуха у Бољевцу добијени су од *NASA Surface Meteorology and Solar Energy* [55] на основу одговарајуће географске ширине и географске дужине и приказани су на Слици 4.12. Хладни дани са просечним месечним температурама ваздуха из опсега - 2.19°C до 9.51°C имају се током јесени и зиме, са најнижом температуром у месецу јануару. Топли дани са просечним месечним вредностима температуре ваздуха између 10.55°C и 21.97°C имају се током пролећа и лета, са највишом температуром у месецу августу. Средња годишња температура ваздуха у Бољевцу је 9.88°C.



Слика 4.12 Просечне месечне вредности температуре ваздуха за град Бољевац

За потребе симулација изабрани су поликристални *PV* модули [24,31,152] следећих називних снага: 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1,..., 15 kW (постојећи систем) и из опсега од 0 до 620 kW (предложени систем). На Слици 4.13а приказан је разматрани *PV* модул, док је на Слици 4.13б приказан *PV* генератор са истим таквим *PV* модулима. У Табели 4.4 дати су коришћени технички и економски подаци о *PV* генератору са Сlike 4.13б.



Слика 4.13 Изглед поликристалног *PV* модула (а) и *PV* генератор са модулима инсталираним на површини Земље на разматраној локацији (б) [152]

Табела 4.4 Техничке и економске перформансе *PV* генератора [24,31,152]

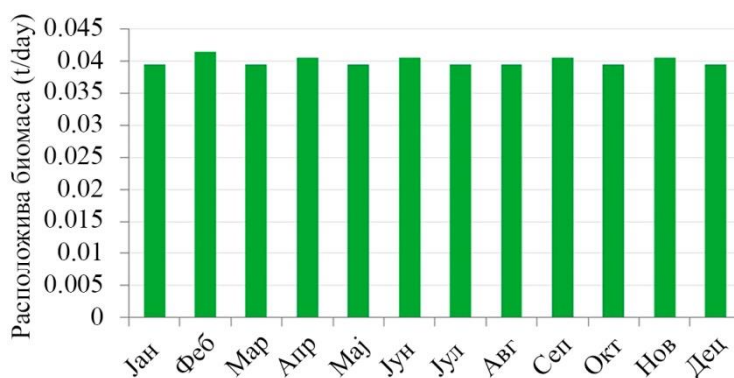
| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|---------------------|---|----------------|
| <i>PV</i> генератор | Називна снага (W) | 250 |
| | Толеранција снаге (W) | 0~+4.99 |
| | Напон отвореног кола (V) | 37.8 |
| | Максимални напон (V) | 30.6 |
| | Струја кратког споја (A) | 8.8 |
| | Максимална струја (A) | 8.17 |
| | Фактор губитака (%) | 88 |
| | Ефикасност при <i>STC</i> -условима (%) | 13 |
| | <i>NOCT</i> -температура (°C) | 47.5 |
| | Температурни коефицијент снаге (°C) | -0.485 |
| | Угао нагиба (°) | 40 |
| | Азимут (°) | 0 |

Табела 4.4 Техничке и економске перформансе PV генератора (наставак)
[24,31,152]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|--------------|--------------------------------|----------------|
| PV генератор | Димензије (mm) | 1650×990×38 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 544 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 544 |
| | Трошкови П&О (USD/yr) | 5 |
| | Животни век (yr) | 25 |

4.2.3 Биомаса и дизел генератор

Што се тиче шумске биомасе, највеће површине под шумом у Зајечарском округу налазе се у општинама Бољевац и Књажевац са преко 40000 ha [153]. Власник рибњака Јабланица поседује знатне површине под шумом (око 50 ha). Ова шума се највећим делом састоји од буковог дрвета која се може искористити за производњу дрвног чипса и даље за производњу дрвног биогаса. На Слици 4.14 је приказана просечна месечна количина дрвне биомасе која је расположива, а њена процена извршена је према [57,58]. Са дате слике може се видети да је средње годишњи просек дрвне биомасе 0.04 t/day.



Слика 4.14 Просечна месечна количина дрвне биомасе

У симулацијама се користи трофазни дизел генератор снаге 12 kW (Слика 4.15) [24,31,154]. У првом случају (постојећи систем) има се дизел генератор који

за погон користи дизел гориво. У овом случају, за почетну цену дизел горива узета је тржишна цена која је 16.08.2023. износила 1.705 USD/l [155,156].

У другом случају (предложени систем) дизел генератор за погон користи следеће четири врсте горива: дизел гориво, биогаз произведен из отпадног дрвета (дрвни исечци, грање, лишће, кора, пањеви и пиљевина), биогаз произведен из комерцијалног буковог дрвета и водоник, где су за почетне цене биомасе узете домаће тржишне цене од 16.08.2023. године: 34 USD/t и 96.20 USD/t, редом [157,158]. Крива потрошње горива и криве ефикасности за дизел генератор на различите врсте горива приказане су на Слици 4.16. У Табели 4.5 дате су перформансе дизел генератора, док су својства горива дата у Табели 4.6 [159,160]. Уз дизел генератор на биогаз (у Табели 4.5) додати су још додатни трошкови постројења за производњу биогаза [161], чији је принцип функционисања објашњен на Слици 3.9.



Слика 4.15 Изглед дизел генератора [161]

Табела 4.5 Перформансе дизел генератора [24,31,154,161]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|---|-------------------------------------|----------------|
| Дизел генератор на дизел гориво или водоник | Називна снага (kW) | 12 |
| | Називна привидна снага (kVA) | 13.7 |
| | Максимална привидна снага (kVA) | 15 |
| | Напон (V) | 220/380 |
| | Струја (A) | 22.7 |
| | Капацитет резервоара за гориво (l) | 25 |
| | Капацитет резервоара за уље (l) | 4 |
| | Минимално дозвољено оптерећење (%) | 30 |
| | Коефицијент рекулпације топлоте (%) | 50 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 3710 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 1500 |
| | Трошкови <i>P&O</i> (USD/yr) | 0.025 |
| | Животни век (h) | 15000 |
| Дизел генератор на биогаз | Називна снага (kW) | 12 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 5110 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 2900 |
| | Трошкови <i>P&O</i> (USD/yr) | 0.05 |
| | Животни век (h) | 15000 |

Табела 4.6 Својства горива

| Врста горива | Доња топлотна моћ (MJ/kg) | Густина (kg/m ³) | Садржај угљеника (%) | Садржај сумпора (%) |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| Дизел | 43.2 | 820 | 88 | 0.33 |
| Биогас (отпадно дрво) | 17.8 | 550 | 49.3 | 0.08 |
| Биогас (буково дрво) | 18.8 | 720 | 48.5 | 0.02 |
| Водоник | 120 | 0.09 | 0 | 0 |

Код дизел генератора на биогаз користи се коефицијент гасификације који представља однос између количине произведеног биогаза и количине биомасе утрошене у гасификатору, тј. коефицијент гасификације показује колико је биомасе потребно за производњу 1 kg биогаза. Овај коефицијент је константан и износи 0.7.

4.2.4 Претварач

У хибридном енергетским системима, двосмерни претварач се користи за повезивање *AC* и *DC* сабирница. Генерално, претварач се користи за претварање *DC* електричне енергије у *AC* електричну енергију; штавише, претварач се користи и као исправљач за претварање *AC* електричне енергије из дизел генератора и μXE у *DC* електричну енергију при пуњењу батерије. Изабрани претварач (Слика 4.17) има називну снагу од 1 kW [24,31,162]. Овај претварач претвара *DC* електричну енергију од 24 V или *AC* електричну енергију од 220V \pm 36% и 50Hz \pm 10Hz у *AC* електричну енергију од 220V \pm 6% и 50Hz \pm 0.5Hz [162]. Снаге претварача коришћене у симулацијама су следеће: 0, 1, 2,..., 6 kW (постојећи систем) и из опсега од 0 до 125 kW (предложени систем). Коришћене перформансе овог претварача дате су у Табели 4.7.



Слика 4.17 Изглед претварача [162]

Табела 4.7 Перформансе претварача [24,31,162]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|------------|--------------------------------|----------------|
| Претварач | Ефикасност (%) | 95 |
| | Релативни капацитет (%) | 100 |
| | Димензије (mm) | 390×145×210 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 235 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 235 |
| | Трошкови П&О (USD/yr) | 5 |
| | Животни век (yr) | 15 |

4.2.5 Батерија

За складиштење електричне енергије изабран је кинетички модел батерије [24,31,163]. Ова батерија је дизајнирана за циклчан погон и у процесу симулација су коришћени следећи бројеви батерија: 0, 1, 2, 3,..., 40 (постојећи систем), и из опсега од 0 до 1650 (предложени систем). На Слици 4.18 приказан је изглед батерије, док су у Табели 4.8 дате перформансе батерије.



Слика 4.18 Изглед батерије [163]

Табела 4.8 Перформансе батерије [24,31,163]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|------------|----------------------------------|----------------|
| Батерија | Називни напон (V) | 12 |
| | Максимални капацитет (Ah) | 115 |
| | Пропусност енергије (kWh) | 1212 |
| | Максимално стање напуњености (%) | 100 |
| | Минимално стање напуњености (%) | 20 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 235 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 235 |
| | Трошкови <i>P&O</i> (USD/yr) | 5 |
| | Животни век (yr) | 10 |

4.2.6 Регулатор термичког оптерећења (*TLC*–регулатор)

TLC–регулатор је електрични бојлер који претвара вишак електричне енергије из *OIE* у топлоту за потребе снабдевања оптерећења на топлотној магистрали. То је примарни извор топлотне енергије, док се остатак потребне топлоте добија из бојлера на дизел гориво. За ову студију случаја изабран је *TLC*–регулатор који је повезан на *AC* и *DC* сабирнице. У Табели 4.9 дате су перформансе *TLC*–регулатора, а снаге ове компоненте које су коришћене у симулацијама су: 0, 1, 2, 3,...,220 kW.

Табела 4.9 Перформансе *TLC*–регулатора [31,76]

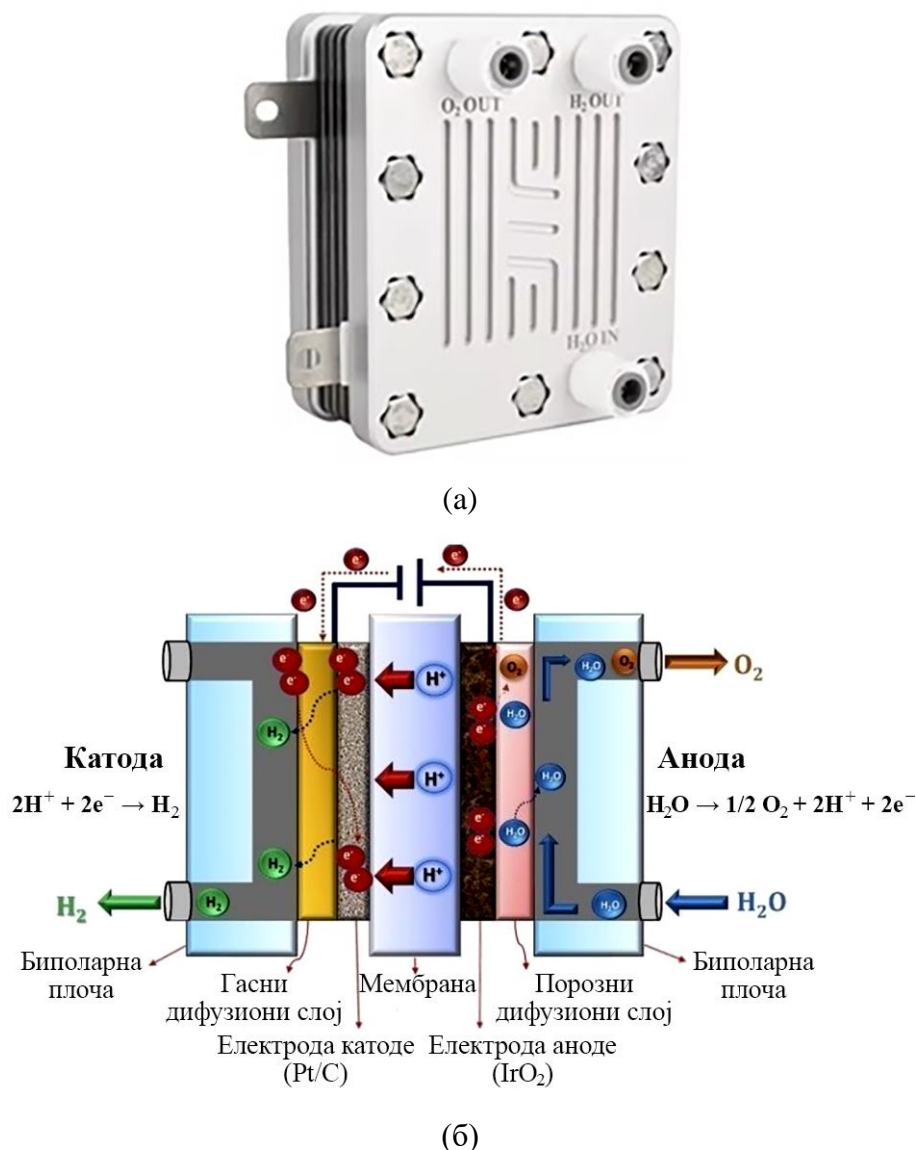
| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| <i>TLC</i> –регулатор | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 54 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 54 |
| | Животни век (yr) | 20 |

4.2.7 Бојлер

Претпоставља се да је мали бојлер за загревање воде интегрални део пословне зграде и да не захтева трошкове. Степен ефикасности бојлера износи 85% [31].

4.2.8 Електролизер

За производњу водоника електролизом воде изабран је електролизер са мембраном за размену протона (*PEM* од енг. *Proton Exchange Membrane*). Овај уређај користи електричну струју за разлагање молекула воде на молекуле водоника и кисеоника. Функција *PEM* електролизера је да претвори електричну у хемијску енергију која ће се ускладиштити у резервоару у форми гаса. *PEM* електролизер садржи електролитску мембрану која омогућава пролаз позитивно наелектрисаних јона водоника, а блокира пролаз електрона. Када се електрична струја доведе на крајеве *PEM* електролизера, долази до разлагања молекула воде на јоне водоника и молекуле кисеоника на аноди и катоде. Јони водоника затим пролазе кроз електролитску мембрану до катоде, где се спајају са електронима и формирају гасовити водоник. На Слици 4.19 је приказан изглед *PEM* електролизера са његовим основним деловима, док су у Табели 4.10 дате његове основне перформансе. Снаге *PEM* електролизера задаване у симулацијама су: 0, 0.4, 0.8, 1.2, ..., 15.2 kW.

Слика 4.19 *PEM* електролизер (а) и његови основни делови (б) [164]Табела 4.10 Перформансе *PEM* електролизера [31,164]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| Електролизер | Производња водоника (ml/min) | 600 |
| | Производња кисеоника (ml/min) | 300 |
| | Потрошња воде (ml/h) | ≥ 36 |
| | Циклични режим | Гравитациона циркулација |
| | Електролитички режим | Електролиза чисте воде |
| | Максимални притисак (MPa) | 0.1~1.3 |

Табела 4.10 Перформансе *PEM* електролизера (наставак) [31,164]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|--------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Електролизер | Захтев за воду (ppm) | ≤ 5 |
| | Захтев за називну струју (A) | 20 |
| | Захтев за излазни напон (V) | 13-16 |
| | Димензије (mm) | $\geq 86 \times 96 \times 41.8$ |
| | Тежина (kg) | 0.7-0.8 |
| | Минимални однос оптерећења (%) | 20 |
| | Ефикасност (%) | 85 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kW) | 575 |
| | Трошкови замене (USD/kW) | 380 |
| | Трошкови <i>П&О</i> (USD/yr) | 3.25 |
| | Животни век (yr) | 15 |

4.2.9 Резервоар водоника

На Слици 4.20 приказан је резервоар водоника за складиштење водоника под ниским притиском који је направљен од метал-хидрида и са капацитетом складиштења од >2.38 kg. Неке од технолошких предности овог резервоара су: могућност складиштење водоника високе запреминске густине (пружа већу запреминску густину складиштења водоника од традиционалног складиштења гаса под високим притиском), безбедност и поузданост (погон при ниском напону који значајно побољшава безбедност коришћења), висока енергетска ефикасност (систем управљања топлотом током процеса пуњења и испуштања водоника побољшава укупну ефикасност), еколошка прихватљивост (могућност рециклаже, без штетног отпада). У Табели 4.11 дате су преостале перформансе овог резервоара, а у симулацијама су коришћене следеће величине овог резервоара: 2.38, 4.76, 7.14, ..., 30.94 kg.



Слика 4.20 Резервоар за складиштење водоника [165]

Табела 4.11 Перформансе резервоара водоника [31,165]

| Компонента | Параметар | Назив/Вредност |
|--------------------|---------------------------------------|----------------|
| Резервоар водоника | Пречник резервоара (mm) | 232 |
| | Висина резервоара (mm) | 1400 |
| | Тежина (kg) | 170 |
| | Запремина (l) | 40 |
| | Капацитет складиштења водоника (kg) | >2.38 |
| | Притисак при пуњењу водоником (MPa) | 3.5 |
| | Притисак при испуштању водоника (MPa) | 0.6 |
| | Брзина испуштања водоника (l/min) | >30 |
| | Услови коришћења (°C) | -20~70 |
| | Релативни ниво у резервоару (%) | 20 |
| | Инвестициони трошкови (USD/kg) | 165 |
| | Трошкови замене (USD/kg) | 100 |
| | Трошкови <i>П&О</i> (USD/yr) | 0.75 |
| | Животни век (yr) | 15 |

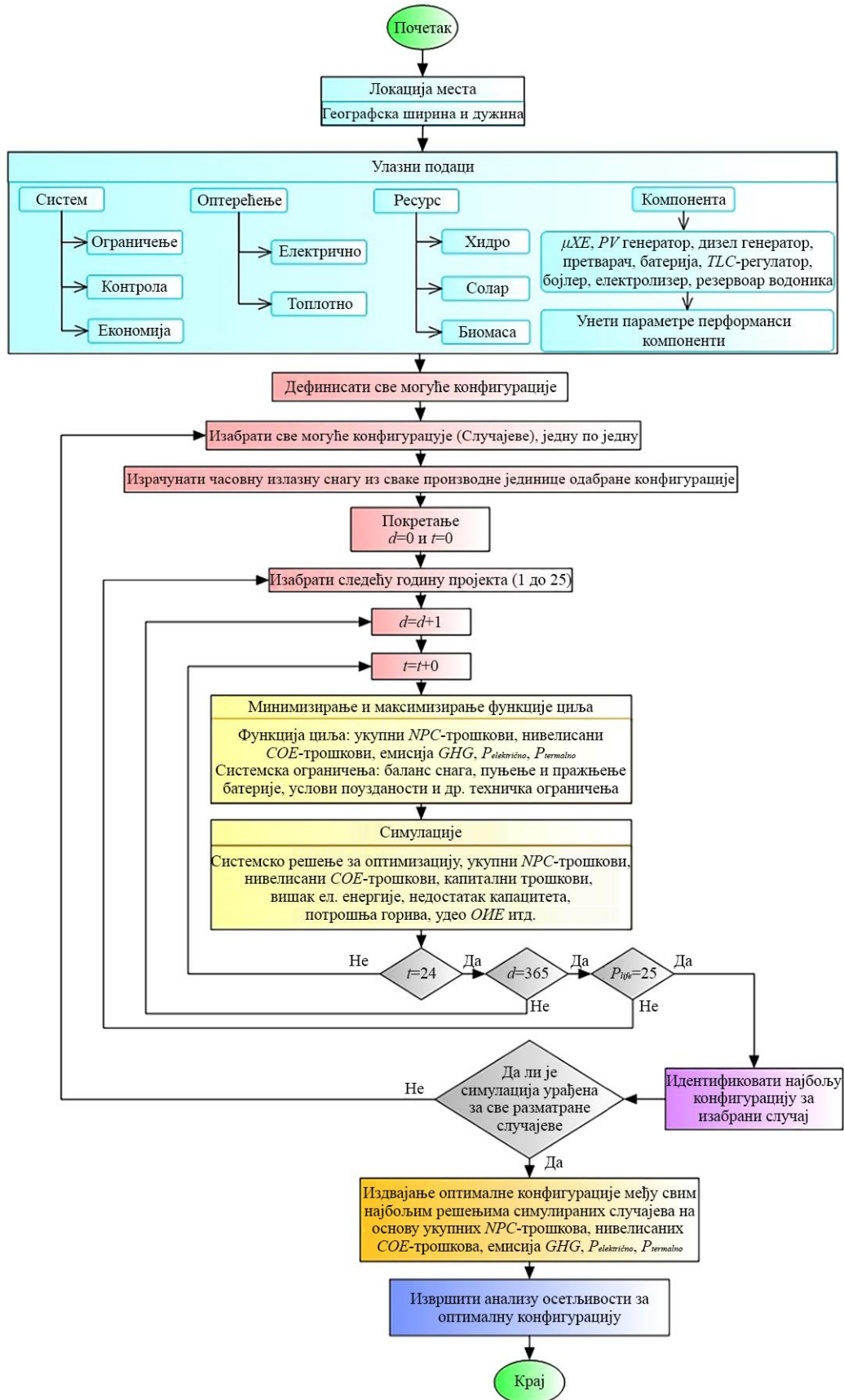
4.3 Методолошки дијаграм тока и стратегија управљања енергијом у ванрежном хибридном енергетском систему

Неколико улазних података је неопходно за пројектовање система, укључујући економију система и тип стратегије отпреме енергије, електрично и топлотно оптерећење, *ОИЕ* (нпр. хидро, соларно зрачење и биомасу) на одабраној локацији и перформансе компонената система. Параметри перформанси компонената μXE , *PV* генератора, дизел генератора, претварача, батерија, *TLC*–регулатора, бојлера, електролизера и резервоара водоника обезбеђују основу за процену различитих алтернативних сценарија с аспеката економије, технике и физике хибридног система. Техничка изводљивост система се потврђује симулацијама, док се при оптимизацији проверава системска изводљивост многих конфигурација хибридног система како би се пронашла она која задовољава техничка ограничења при најнижем трошку целог животног века. Са оптималним резултатима добијеним у софтверу *HOMER Pro*, спроводе се даље анализе. Штавише, врши се анализа осетљивости како би се квантификовали утицаји промена дијапазона различитих параметара на оптималну конфигурацију хибридног система. На Слици 4.21 је представљен методолошки дијаграм тока за ову студију случаја, док су неки економски подаци коришћени у анализи дати у Табели 4.12.

Табела 4.12 Економски улазни подаци

| Опис | Вредност | Јединица | Референца |
|-------------------------------|----------|------------|-----------|
| Валута | 1 USD | 107.92 RSD | [24,31] |
| Номинална дисконтна стопа | 8 | % | [24,31] |
| Очекивана стопа инфлације | 2 | % | [24,31] |
| Реална дисконтна стопа | 5.88 | % | [24,31] |
| Животни век хибридног система | 25 | Yr | [24,31] |

Вредност реалне дисконтне стопе од 5.88% из Табеле 4.12, добија се на основу израза (3.74) када се уврсте реалне вредности номиналне дисконтне стопе и очекиване стопе инфлације.



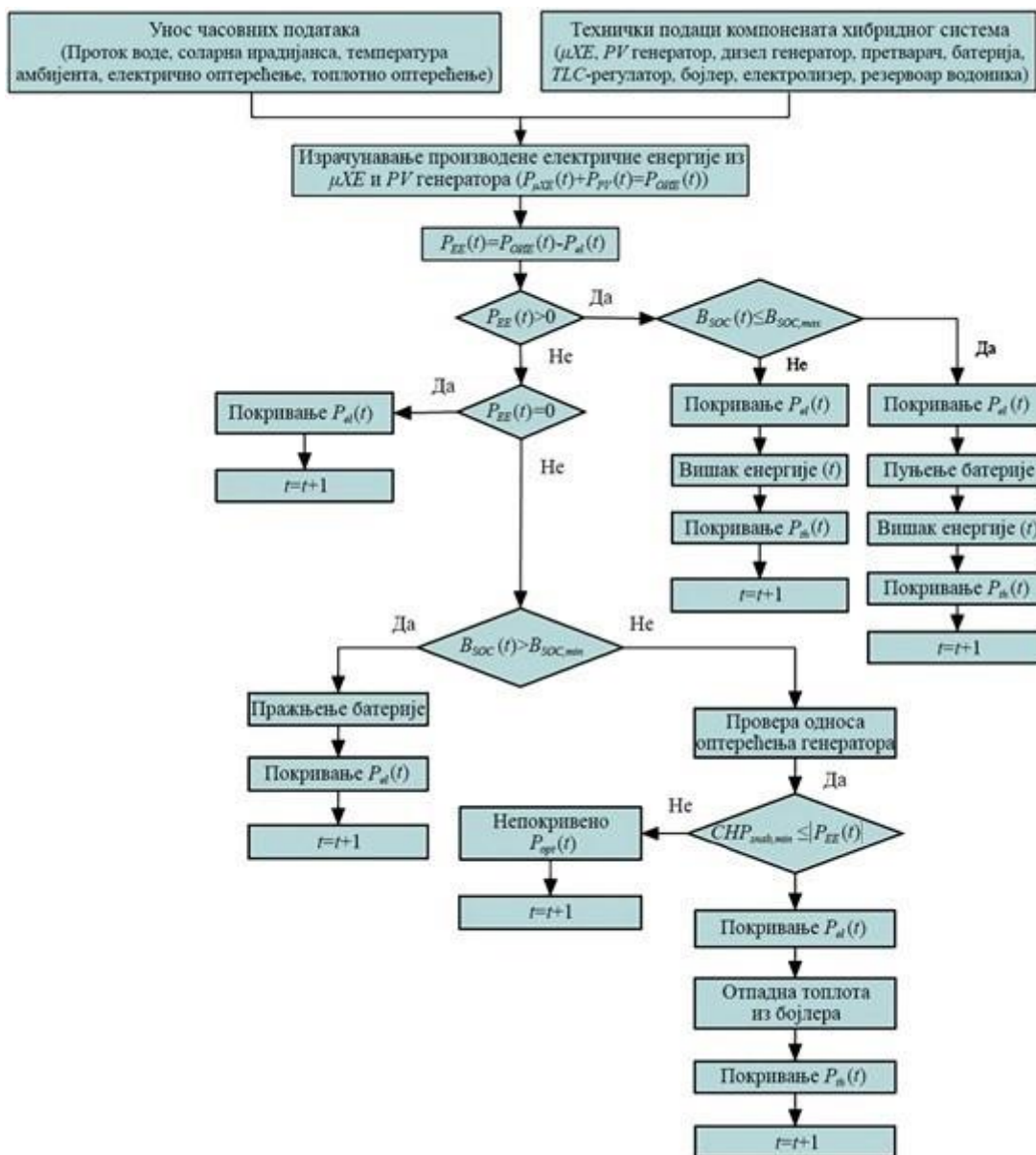
Слика 4.21 Методолошки дијаграм тока

Због високе варијабилности енергетских улаза и излаза у ванмрежном хибридном енергетском систему, управљање токовима енергије је сложен задатак. Табела 4.13 садржи могуће исходе у вези са расположивошћу електричне и топлотне енергије у ванмрежном хибридном енергетском систему добијене симулацијом његовог погона за потребе димензионисања компоненти.

Табела 4.13 Могући исходи у вези са расположивошћу електричне и топлотне енергије у ванмрежном хибридном енергетском систему

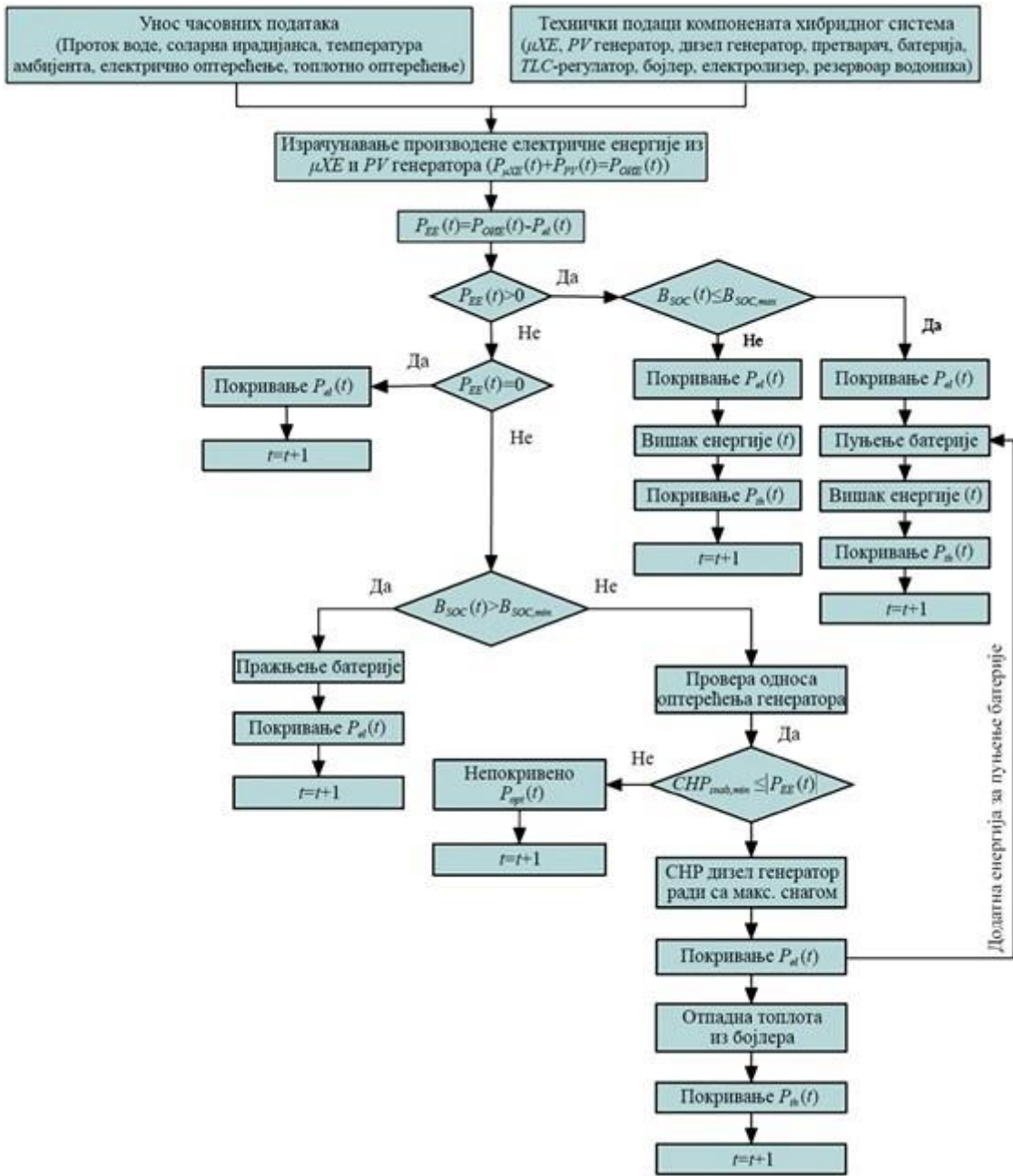
| Могући исходи за сценарио мањка електричне енергије произведене у <i>ОИЕ</i> | |
|--|--|
| 1 | систем није самодовољан, потребно је повећати капацитет <i>ОИЕ</i> |
| 2 | напајање електричном енергијом врши се из <i>ОИЕ</i> и допуњава из дизел генератора |
| 3 | напајање електричном енергијом врши се из <i>ОИЕ</i> и допуњава из батерије |
| Могући исходи за сценарио вишка електричне енергије произведене у <i>ОИЕ</i> | |
| 4 | батерија се пуни вишком произведене електричне енергије |
| 5 | вишак произведене електричне енергије користи се у електролизеру за производњу H_2 |
| 6 | вишак произведене електричне енергије се усмерава за потребе грејања воде у базенима помоћу <i>TLC</i> -регулатора |
| Могући исходи у вези са расположивошћу топлотне енергије | |
| 7 | треба повећати почетну количину топлоте <i>TLC</i> -регулатора због веће потражње у односу на производњу |
| 8 | <i>TLC</i> -регулатор се празни због потребе рибњака за топлим водом |
| 9 | <i>TLC</i> -регулатор се пуни енергијом произведеном у <i>ОИЕ</i> |
| 10 | бојлер производи топлотну енергију коришћењем дизел горива |
| 11 | <i>СНР</i> дизел генератор производи рекуперисану топлотну енергију |
| Могући исходи у вези са расположивошћу енергије водоника | |
| 12 | постоји мањак H_2 који се мора надокнадити повећањем почетне количине H_2 |
| 13 | резервоар H_2 испоручује водоник, јер је <i>СНР</i> дизел генератор на водоник у погону |
| 14 | резервоар H_2 се пуни водоником, јер је електролизер у погону |
| 15 | треба повећати капацитет резервоара H_2 , јер се повећава разлика у производњи/потрошњи H_2 |

Овде су за потребе испитивања техно-економских перформанси предложеног ванмрежног хибридног система примењене две диспечерске стратегије, и то: *LF*–стратегија и *CC*–стратегија. Прва је приказана на Слици 4.22. Производња електричне енергије из *ОИЕ* ($P_{OIE}(t)$) је упоређена са захтевом за електричним оптерећењем ($P_{el}(t)$), и тада су могућа два сценарија: мањак и вишак електричне енергије из *ОИЕ*. Уколико енергија произведена у *ОИЕ* није довољна за покривање оптерећења, допуна се врши из система за складиштење енергије (батерија или резервоар водоника) у зависности од стања напуњености батерије (B_{SOC}). Допуна енергијом из батерије врши се док се не достигне њено минимално стање напуњености ($B_{SOC,min}$). Уколико и даље постоји потреба за електричном енергијом, укључује се *CHP* дизел генератор који производи додатну количину електричне енергије сагласно захтеву потражње. По овој стратегији, *CHP* дизел генератор ради са капацитетом који покрива примарно оптерећење потребном (довољном) количином електричне енергије. С друге стране, потражња испод минималног односа оптерећења остаје као непокривено оптерећење. Рекуперисана отпадна топлота се затим заједно са топлотом из бојлера користи за покривање потражње за топлотом. Када се појави вишак произведене електричне енергије (тј. $P_{EE}(t) > 0$), алгоритам прво проверава ниво напуњености батерије (B_{SOC}). Када је ниво напуњености нижи од максималног нивоа напуњености батерије ($B_{SOC,max}$), вишак електричне енергије се користи за пуњење батерије до достизања $B_{SOC,max}$, а остатак електричне енергије представља вишак. У случају када је батерија максимално напуњена, а постоји вишак произведене електричне енергије, укључују се *TLC*–регулатор који је коришћен за покривање потребе за топлотом ($P_{th}(t)$) и електролизер који производи водоник из вишка електричне енергије. Наиме, покривање топлотног оптерећења врши се из три извора, у зависности од њихове расположивости. Први извор је споменути *TLC*–регулатор, који на годишњем часовном нивоу са *AC* и *DC* сабирнице узима једнаку количину произведене електричне енергије. Преостала два извора су *CHP* дизел генератор са рекулацијом отпадне топлоте и бојлер на дизел гориво.



Слика 4.22 LF–стратегија за покривање електричног и топлотног оптерећења

Кораци *СС*–стратегије приказани су на Слици 4.23. Алгоритам се састоји од потпуно истих корака као *LF*–стратегија, а разликује се само када се оптерећење снабдева помоћу *СНР* дизел генератора. У случају *СС*–стратегије, *СНР* дизел генератор ради са својом максималном снагом како би покрио примарно електрично оптерећење. Након покривања примарне потражње, остатак енергије се користи за пуњање батерије. Међутим, у било ком тренутку када би се батерија потпуно напунила, *СНР* дизел генератор би могао да покрива потражњу.



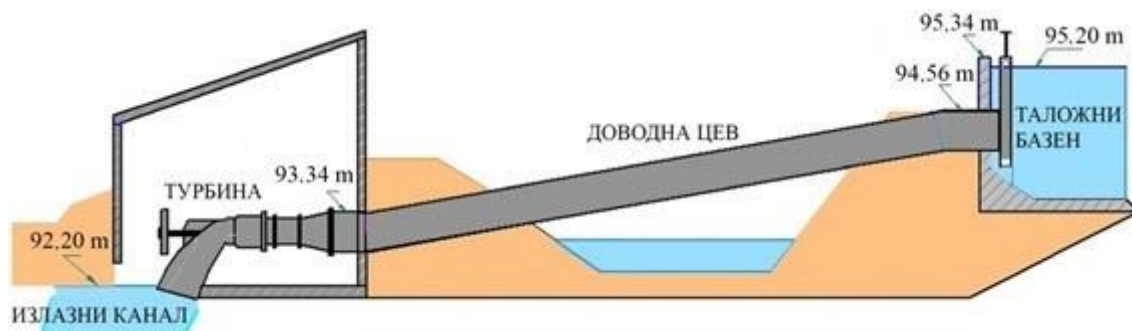
Слика 4.23 *СС*-стратегија за покривање електричног и топлотног оптерећења

5. ХИБРИДНИ СИСТЕМ μ ХЕ-РV ГЕНЕРАТОР-ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР-ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА–СЦЕНАРИО I: ОПТИМИЗАЦИЈА ПЕРФОРМАНСИ ХИДРОТУРБИНЕ

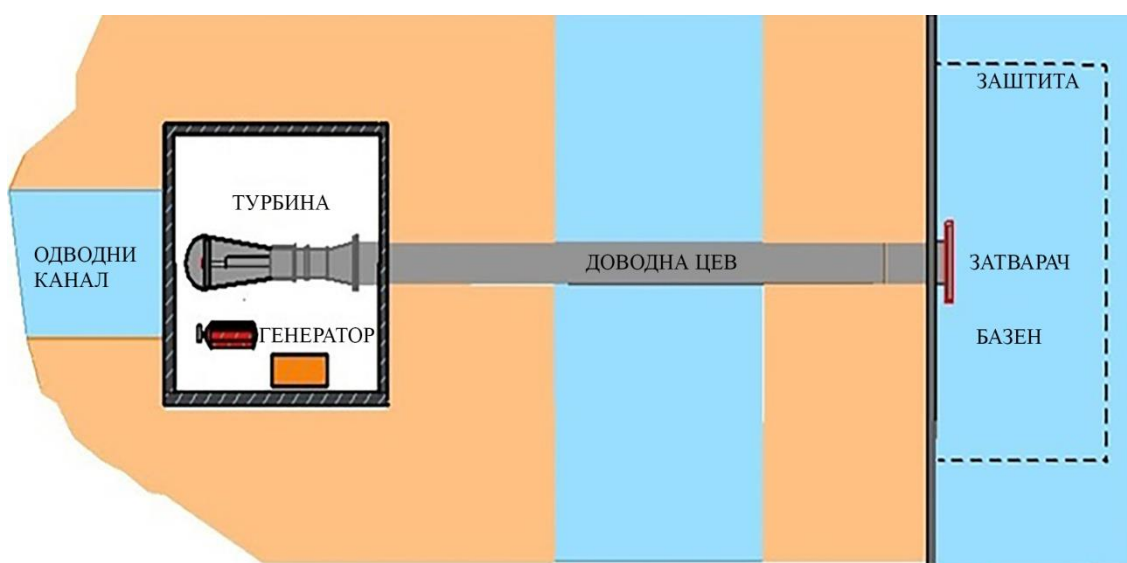
5.1 Студија случаја

Ова студија предлаже конфигурацију хибридног електроенергетског система који би користио расположиве *ОИЕ* (воду и соларно зрачење), као и постојеће објекте и инфраструктуру рибњака. Последњих година долази до великих варијација количине воде у водотоковима на Балкану, тако да су данас речни токови зими и у пролеће изузетно велики, а лети изузетно мали. Сходно томе, ванмрежни хибридни електроенергетски систем за снабдевање пастрмског рибњака Јабланица мора ефикасно искоришћавати постојећи водни ресурс. Као што је већ поменуто, предложени хибридни електроенергетски систем би се састојао од μ ХЕ, РV генератора, дизел генератора, претварача и батерије за складиштење електричне енергије. Претпоставља се да је хидротурбина у μ ХЕ проперелна S-турбина која ће користити воду из прелива таложника са нето падом од 2.9 m. На Слици 5.1 приказани су вертикални и хоризонтални попречни пресеци μ ХЕ на излазу воде из таложника, где бројеви представљају вредности надморске висине у односу на релативну коту водног огледала, коју представља мирна водена површина таложног базена дизајнирана тако да својом површином рефлектује околину стварајући ефекат огледала. Вода из таложника се помоћу цеви пречника 500 mm и дужине 8 m усмерава на пропелерну S-турбину.

Овде ће се разматрати следећа два типа пропелерне S-турбине: хидротурбина са фиксним лопатицама пропелера и фиксним водећим лопатицама – Случај 1, и хидротурбина са фиксним лопатицама пропелера и подесивим водећим лопатицама – Случајеви 2 и 3. У Случају 1 претпостављен је просечни годишњи проток кроз таложни базен, док су у Случајевима 2 и 3 редом претпостављени мањи и већи проток кроз таложни базен.



(а)

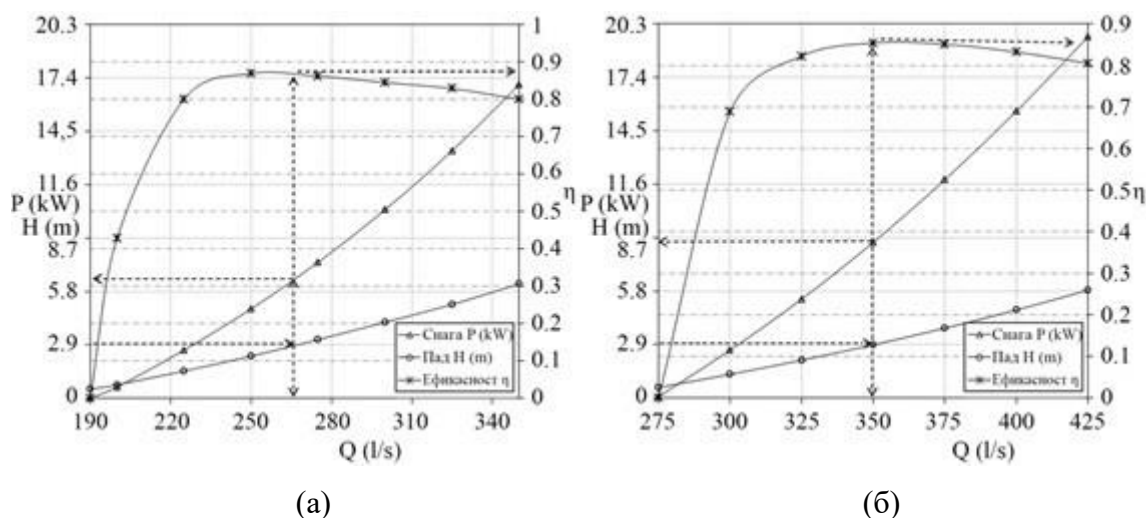


(б)

Слика 5.1 Вертикални (а) и хоризонтални (б) попречни пресеци μ ХЕ на излазу воде из таложног базена (таложника)

За Случај 1, узето је да су фиксне лопатице пропелера и фиксне водеће лопатице оптимизирани и прилагођени годишњем просечном протоку кроз таложни базен применом поступка скалирања. За Случајеве 2 и 3, узето је да су фиксне лопатице пропелера пројектоване за протоке кроз таложни базен различите од годишњег просечног протока. У Случају 2, претпоставља се да су подесиве водеће лопатице оптимизирани и прилагођени за мање протоке кроз таложни базен (тј. нижу ефикасност хидротурбине у летњим месецима и сушним годинама), односно за проток који је 20% мањи од годишњег просечног протока кроз таложни базен. У Случају 3, претпоставља се да су подесиве водеће лопатице оптимизирани и прилагођени за веће протоке кроз таложни базен (тј. ефикаснији погон хидротурбине у зимским месецима).

Карактеристичне криве перформанси за два разматрана типа пропелерне S-турбине преузете су из [23] и приказане на Слици 5.2.



Слика 5.2 Карактеристичне криве перформанси генерисане за: оптимизирани модел пропелерне S-турбине са фиксним лопатицама пропелера и фиксним водећим лопатицама – први тип који одговара Случају 1 (а) и оптимизирани модел пропелерне S-турбине са фиксним лопатицама пропелера и подесивим водећим лопатицама – други тип који одговара Случајевима 2 и 3 (б)

Упоређивањем кривих са Слика 5.2а и 5.2б, запажа се значајно побољшање параметара перформанси оптимизираног дизајна хидротурбине који одговара Случајевима 2 и 3. Конкретно, оптимална излазна снага турбине повећана је са 6.4 kW на 8.5 kW, а оптимални проток кроз турбину се повећао са 265 l/s на 350 l/s. Поред тога, може се видети да оптимални дизајн хидротурбине може да ради са протоком од $Q = 350$ l/s и нето падом од $H = 2.9$ m, постижући оптималну ефикасност од $\eta \approx 0.86$. Смањењем протока испод оног који одговара оптималном погону, ефикасност пропелерне S-турбине нагло опада јер су лопатице пропелера и водеће лопатице фиксирани. Даље, у Случајевима 2 и 3 се претпоставља да се водеће лопатице могу подесити тако да хидротурбина може да ради (са мањом ефикасношћу) у летњим месецима и у сушним годинама када су протоци значајно смањени (до 30% оптималног протока). У овом конкретном случају, софтвер *НOMEP Pro* се користи за процену излазне снаге и ефикасности хидротурбине.

Овде је основни циљ максимизирање производње електричне енергије, смањење укупних NPC -трошкова и минимизирање емисије GHG , на основу променљивог протока кроз разматрану хидротурбину. Конкретно, ова дисертација има за циљ (1) избор ванмрежног хибридног електроенергетског система μXE - PV генератор-дизел генератор-претварач-батерија за снабдевање пастрмског рибака Јабланица удаљеног од електродистрибутивног система Србије; (2) спровођење оптимизације и техно-економске анализе предложеног система за два различита типа хидротурбине и три различита случаја погона; и (3) идентификацију конфигурације предложеног система са најбољим перформансама на основу добијених резултата.

Шематски приказ предложеног ванмрежног хибридног електроенергетског система дат је на Слици 3.3, док су перформансе и модели појединих компоненти у том систему представљени у Поглављима 3 и 4.

5.2 Резултати анализе и дискусија

Симулације су извршене за обе разматране конфигурације састављене од μXE , PV генератора, дизел генератора, претварача и батерија, са могућношћу искључења само PV генератора или μXE , као и за сваки разматрани случај погона одвојено (Случајеви 1, 2 и 3). Након 70028 симулација и 13 минута и 55 секунди рада софтвера *HOMER Pro*, појединачно за сваки од три случаја, добијају се категоризована системска решења, односно системске конфигурације категоризоване по профитабилности од најпрофитабилнијих до најмање профитабилних. За сва три разматрана случаја изабрана је стратегија LF -стратегија.

Резултати у вези са разматраним конфигурацијама система претходно су публиковани у [24] и дати су у Табели 5.1, као и на Сликама 5.3 и 5.4. Табела 5.1 приказује снагу, укупне NPC -трошкове и производњу електричне енергије за појединачне компоненте разматраних конфигурација система у Случајевима 1, 2 и 3. Ова табела садржи и одговарајуће податке о конфигурацијама целог система. Слика 5.3 даје преглед трошкова за појединачне компоненте разматраних конфигурација система током животног века система у Случајевима 1, 2 и 3, док

Слика 5.4 приказује просечну месечну производњу електричне енергије из μ ХЕ, PV генератора и дизел генератора за Случајеве 1, 2 и 3.

Табела 5.1 Снага, укупни NPC–трошкови и укупна годишња производња електричне енергије за појединачне компоненте разматраних конфигурација система у Случајевима 1, 2 и 3

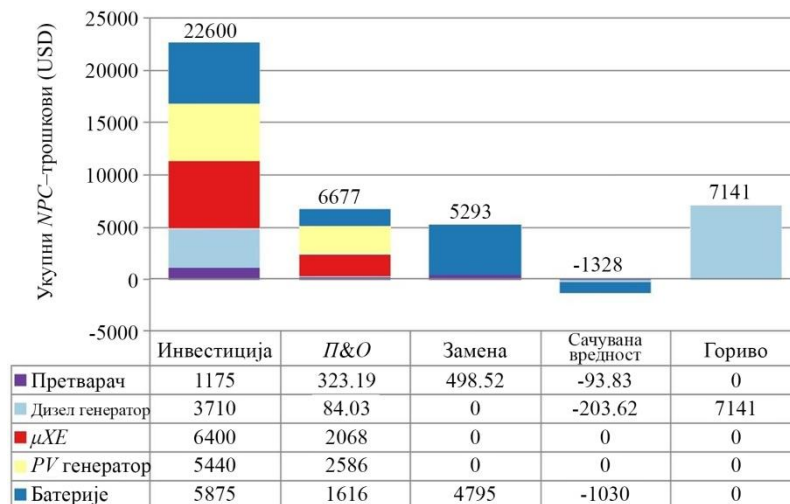
| Компонента или цео систем | Снага (kW) | | | Укупни NPC– трошкови (USD) | | | Укупна годишња производња електричне енергије (kWh/yr) | | |
|---------------------------------|---------------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|--|------------------|------------------|
| | Случај 1 | Случај 2 | Случај 3 | Случај 1 | Случај 2 | Случај 3 | Случај 1 | Случај 2 | Случај 3 |
| μ ХЕ | 6.4 | 8.5 | 8.5 | 8468 | 10132 | 10132 | 23444 (62.4%) | 32979 (73.7%) | 38399 (76.7%) |
| PV генератор | 10 | 8.25 | 8.25 | 8026 | 6621 | 6621 | 13184 (35.1%) | 10877 (24.3%) | 10877 (21.7%) |
| Дизел генератор | 12 | 12 | 12 | 10731 | 10617 | 9766 | 936 (2.5%) | 922 (2%) | 814 (1.6%) |
| Батерије | 25 | 24 | 18 | 11255 | 7750 | 5641 | / | / | / |
| Претварач | 5 | 4 | 4 | 1903 | 1522 | 1522 | / | / | / |
| Цео систем | 28.4 | 28.75 | 28.75 | 40383 | 36643 | 33683 | 37564 (100%) | 44777 (100%) | 50090 (100%) |

Из Табеле 5.1 је очигледно да параметри перформанси хидротурбине утичу на дизајн разматраног хибридног електроенергетског система. У поређењу са Случајем 1, излазна снага и укупна годишња производња електричне енергије за μ ХЕ су већи у Случају 2 или Случају 3, док су у случају PV генератора, у поређењу са Случајем 1, исти параметри нижи за Случајеве 2 и 3. Поред тога, укупни NPC–трошкови за цео систем у Случајевима 2 и 3 су за 9.3% и 16.6% нижи него у Случају 1. Такође, излазна снага и укупна годишња производња електричне енергије из целог система у Случају 3 су за 1.2% и 33.3% виши него у Случају 1, а истовремено за 0% и 11.9% виши него у Случају 2, редом. Повећање излазне снаге целог система са 28.4 kW на 28.75 kW може се објаснити на следећи начин: Оптимизацијом пропелерне S-турбине, излазна снага μ ХЕ се повећава са

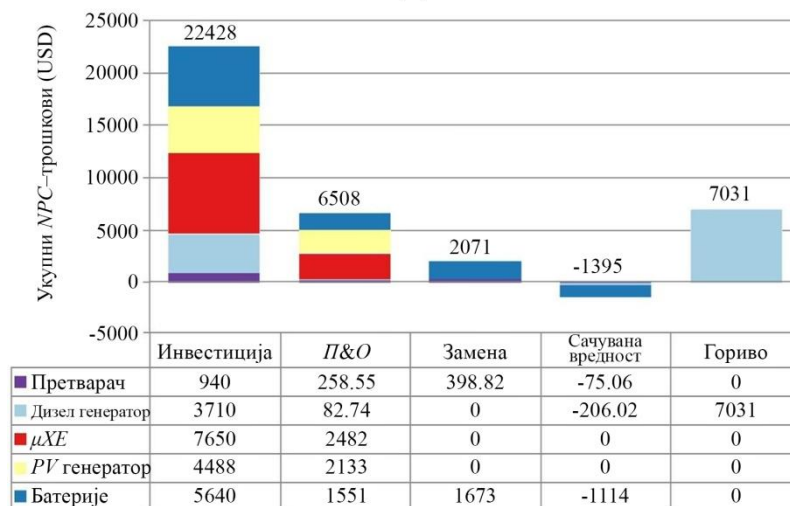
6.4 kW (Случај 1) на 8.5 kW (Случај 2 или 3). То значи да се добија више електричне енергије из μXE , а мање из PV генератора, а то је због знатно већих укупних NPC -трошкова у случају μXE . Сходно томе, излазна снага PV генератора се смањује за 1.75 kW, број батерија за складиштење електричне енергије се смањује са 25 у Случају 1 на 24 у Случају 2 или 18 у Случају 3, а снага претвараача опада са 5 kW у Случај 1 до 4 kW у Случајевима 2 и 3. Истовремено, излазна снага дизел генератора остаје непромењена, али се користе различите количине горива, и то: 324 l у Случају 1, 319 l у Случају 2 и 282 l у Случају 3.

На основу израза (3.75) и резултата из Табеле 5.1, вредности нивелисаних COE -трошкова су 0.346 USD/kWh за Случај 1, 0.313 USD/kWh за Случај 2 и 0.288 USD/kWh за Случај 3. Такође, Табела 5.1 показује да укупни NPC -трошкови за цео систем износе 40383 USD у Случају 1, 36643 USD у Случају 2 и 33683 USD у Случају 3. Дакле, укупни NPC -трошкови целог система у Случају 3 су мањи него у Случају 1 или Случају 2. Међутим, укупна годишња производња електричне енергије у целом систему у Случају 3 (50090 kWh/yr) је знатно већа него у Случају 1 (37564 kWh/yr) или у Случају 2 (44777 kWh/yr). Овде добијена вредност нивелисаних COE -трошкова је блиска вредностима нивелисаних COE -трошкова добијених за хибридне μXE - PV генератор-дизел генератор системе разматране у [4,10]. Као што је већ речено, у [63,69] је установљено да више фактора утичу на укупне NPC -трошкове и нивелисане COE -трошкове. У вези са тим, цена дизел горива је један од тих фактора. Усвојена цена дизел горива је висока (1.705 USD/l), што је у овој студији, у поређењу са одговарајућим вредностима из других студија, довело до повећања вредности нивелисаних COE -трошкова.

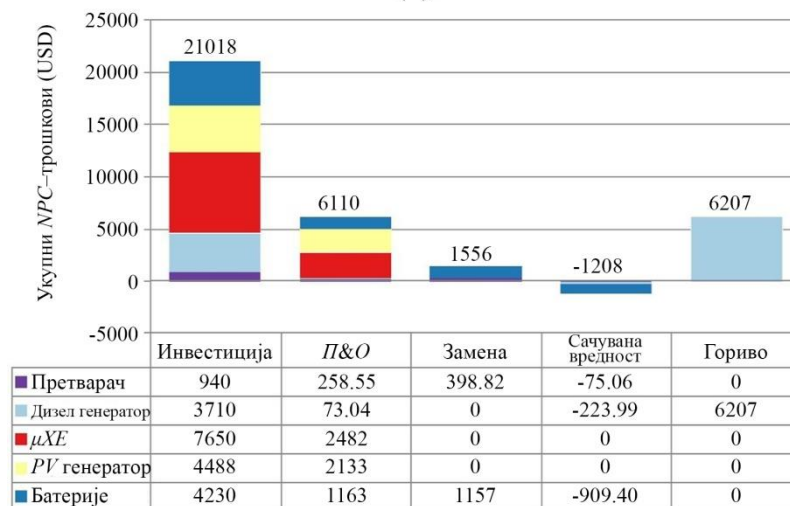
Графикони са Сlike 5.3 показују да OIE (μXE и PV генератор) имају релативно велике инвестиционе трошкове и трошкове $P&O$ за разлику од дизел генератора, али да дизел генератор има високе трошкове горива. За Случај 1 са Сlike 5.3а, укупни трошкови батерије за складиштење електричне енергије су највећи и износе 11256 USD (5875+1616+4795-1030). За Случај 2 са Сlike 5.3б, укупни трошкови дизел генератора су највећи и износе 10617.72 USD, док за Случај 3 са Сlike 5.3в, укупни трошкови μXE су највећи и износе 10132 USD. У сва три случаја трошкови $P&O$ дизел генератора су веома ниски и износе 84.03 USD за Случај 1, 82.74 USD за Случај 2 и 73.04 USD за Случај 3.



(а)



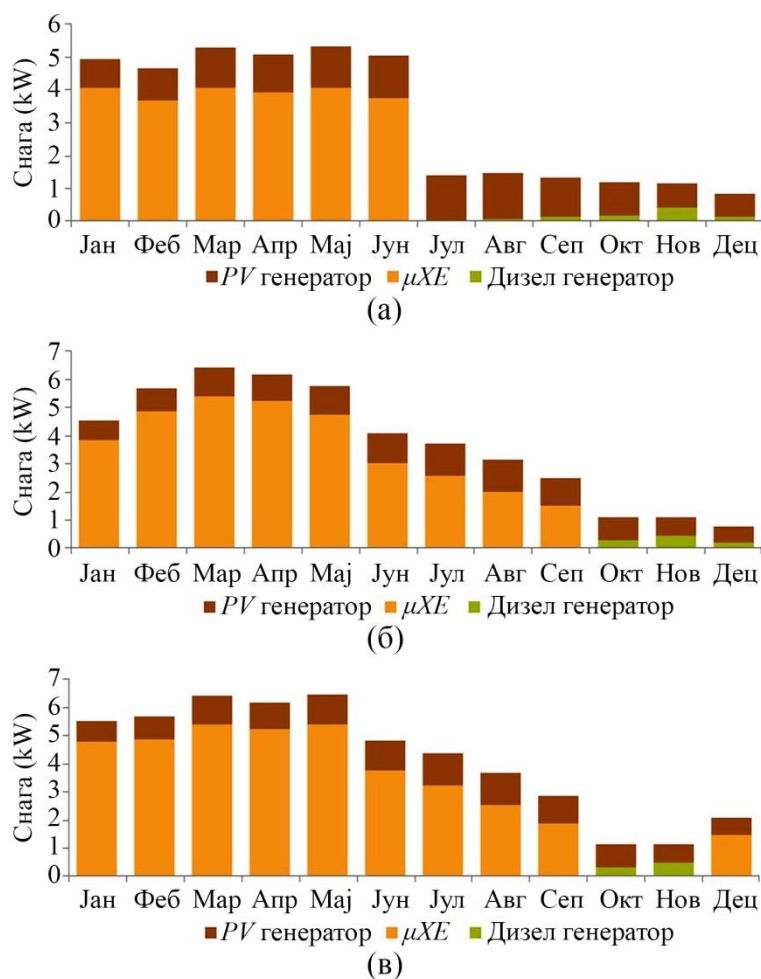
(б)



(в)

Слика 5.3 Преглед трошкова за појединачне компоненте у разматраним конфигурацијама система током њиховог животног века за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в)

На Слици 5.4 приказана је просечна месечна производња електричне енергије из μXE , PV генератора и дизел генератора за сва три разматрана случаја. Оптимизирана пропелерна S -турбина из Случаја 2 или Случаја 3 омогућава погон μXE при нижим протоцима реке у месецима јулу, августу, септембру и децембру. Дакле, укупна годишња производња електричне енергије из μXE у Случају 3 је за 14955 kWh/уг већа него у Случају 1 и 5420 kWh/уг већа него у Случају 2. Укупна годишња производња електричне енергије из PV генератора у Случају 2 или Случају 3 је за 2307 kWh/уг нижа него у Случају 1, док је укупна годишња производња електричне енергије из дизел генератора у Случају 3 за 122 kWh/уг и 108 kWh/уг нижа него у Случају 1 и Случају 2, редом. До ових запажања дошло се на основу података из Табеле 5.1.

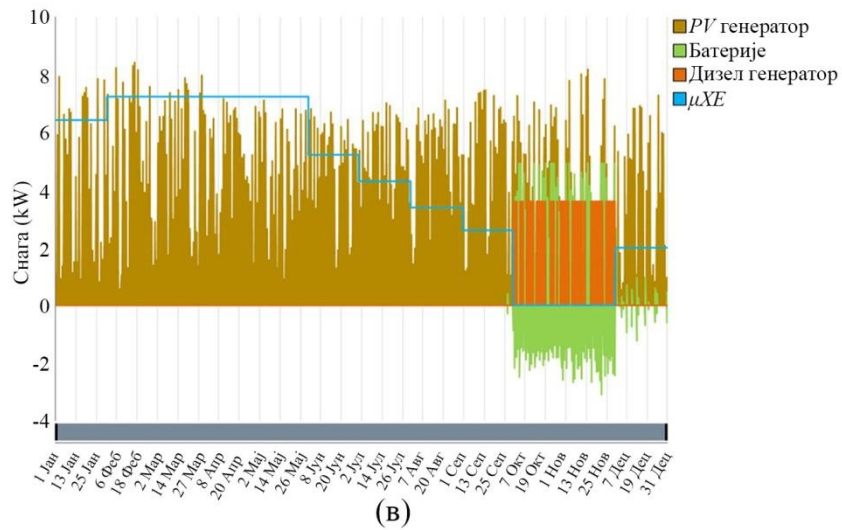
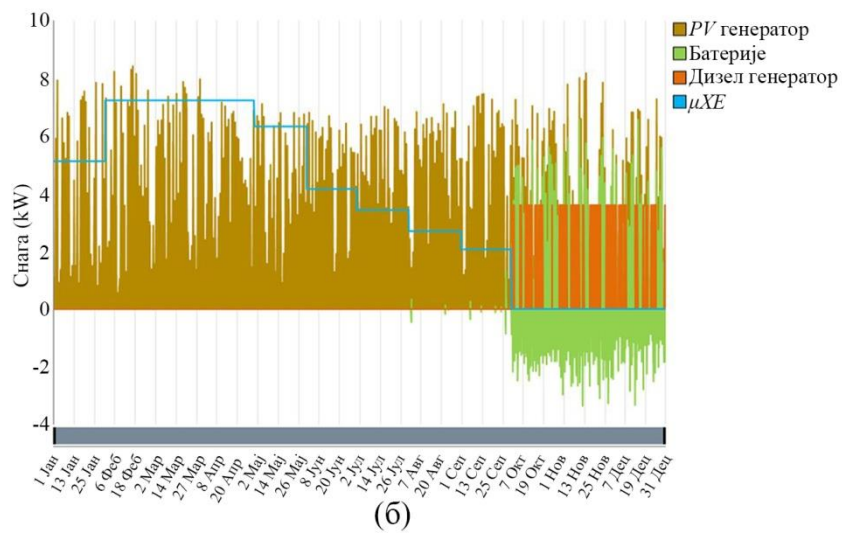
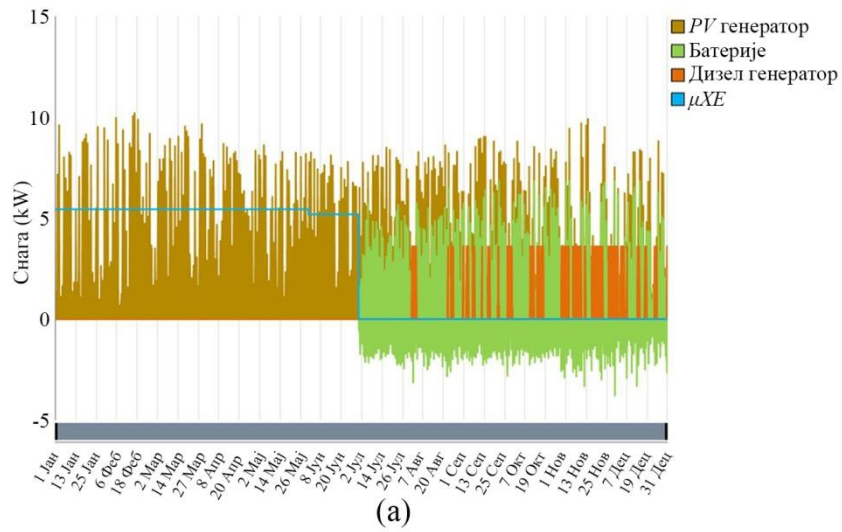


Слика 5.4 Просечна месечна производња електричне енергије из μXE , PV генератора и дизел генератора за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в)

На Слици 5.5 приказани су часовни графикони излазне снаге μXE , PV генератора и дизел генератора и часовни графикони улазне снаге батерије за Случајеве 1, 2 и 3. Са Сlike 5.5 може се видети да су главни извори електричне енергије μXE и PV генератор, а да су помоћни извори електричне енергије дизел генератор и батеријска јединица. Слика 5.5.а показује да μXE учествује у производњи електричне енергије од 1. јануара до 30. јуна са укупно 4344 часова погона годишње и максималном излазном снагом од 5.44 kW, док од 1. јула до 31. децембра μXE не учествује у производњи електричне енергије јер је расположиви проток воде кроз таложни базен мањи од минималног протока воде кроз турбину који износи 220 l/s. PV генератор обезбеђује електричну енергију током целе године са укупно 4383 часова погона и максималном излазном снагом од 10.2 kW. Од 1. јула до 31. децембра, дизел генератор учествује у производњи електричне енергије са укупно 260 часова погона годишње и максималном излазном снагом од 3.6 kW. Истовремено, батеријска јединица ради са максималном улазном снагом од 6.83 kW.

Уз то, у поређењу са Случајем 1 са Сlike 5.5а, са Сlike 5.5б се види да се у Случају 2 учешће μXE у укупној годишњој производњи електричне енергије повећава од 1. јула до 30. септембра. У том случају μXE у производњи електричне енергије учествује са укупно 6552 часова погона годишње и максималном излазном снагом од 7.23 kW. На годишњем нивоу у Случају 2, PV генератор ради укупно 4383 часова са максималном излазном снагом од 8.41 kW, док дизел генератор ради укупно 256 часова са максималном снагом од 6.56 kW. У поређењу са Случајем 1, време погона дизел генератора у Случају 2 је скраћено, а тиме и емисија GHG .

У Случају 3 са Сlike 5.5в, у производњи електричне енергије μXE учествује и у месецу децембру, па је време њеног погона додатно повећано и износи укупно 7296 часова годишње. У Случају 3, максималне излазне снаге μXE и PV генератора остају исте као у Случају 2, док максимална улазна снага батерије за складиштење електричне енергије сада износи 4.92 kW.



Слика 5.5 Часовне излазне снаге μ ХЕ, PV генератора и дизел генератора, и часовна улазна снага батерије за складиштење електричне енергије за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в)

За све разматране случајеве симулирани су и погонски режими у којима један од *ОИЕ* (*PV* генератор или μ *XE*) отказује. Поново, циљ је оптимизирати, односно максимизирати перформансе компоненти хибридног система. Резултати ових симулација дати су у Табели 5.2.

Табела 5.2 Максимална излазна снага компоненти система добијена за Случајеве 1, 2 и 3 када је искључен *PV* генератор или μ *XE*

| Случај | Излазна снага μ <i>XE</i> (kW) | Излазна снага <i>PV</i> генератора (kW) | Излазна снага дизел генератора (kW) | Улазна снага батерије (kW) | Излазна снага претварача (kW) | |
|--------|------------------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------|
| | | | | | Инвертор | Исправљач |
| 1* | 5.44 | / | 3.6 | 3 | 2.71 | 3 |
| 1** | / | 12.2 | 3.6 | 9.02 | 4.42 | 3.2 |
| 2* | 7.23 | / | 3.6 | 2.73 | 2.7 | 2.73 |
| 2** | / | 12.2 | 3.6 | 9.02 | 4.42 | 3.2 |
| 3* | 7.23 | / | 3.6 | 2.73 | 2.66 | 2.73 |
| 3** | / | 12.2 | 3.6 | 9.02 | 4.42 | 3.2 |

* *PV* генератор искључен.

** μ *XE* искључена.

Пошто се дизел генератор појављује у свим разматраним случајевима, то значи да постоје и емисије *GHG*. Концентрације различитих загађивача као што су CO_2 , CO , SO_2 , итд. су приказане у Табели 5.3. Из дате табеле може се видети да је укупна емисија *GHG* у Случају 3 за 112.6 kg/yr мања него у Случају 1, за 99.41 kg/yr мања него у Случају 2. То је због тога што дизел генератор у укупној годишњој производњи електричне енергије учествује са само 1.6% у Случају 3, са 2% у Случају 2 и са 2.5% у Случају 1.

У Табели 5.4 упоредно су приказани добијени резултати и резултати других студија које се баве сличним хибридним енергетским системима μ *XE*-*PV* генератор-дизел генератор. Из Табеле 5.4 следи да је најнижа вредност укупних *NPC*-трошкова добијена управо у овој дисертацији. Вредности нивелисаних *COE*-трошкова и укупне годишње производње електричне енергије варирају у зависности од трошкова појединих компоненти система, величине система и

других фактора издвојених у другом поглављу. У свакој од студија из Табеле 5.4, придружена μXE има највећи допринос укупној годишњој производњи електричне енергије, што је био један од разлога за оптимизацију разматраног ванмрежног система на основу параметара перформанси пропелерне S-турбине.

Табела 5.3 Емисија *GHG*

| Загађивач | Емисије (kg/yr) | | |
|-------------------------|-----------------|----------|----------|
| | Случај 1 | Случај 2 | Случај 3 |
| Угљен-диоксид | 848 | 835 | 737 |
| Угљен-моноксид | 5.29 | 5.21 | 4.6 |
| Несагорели угљоводоници | 0.233 | 0.23 | 0.203 |
| Атмосферске честице | 0.0317 | 0.0313 | 0.0276 |
| Сумпор-диоксид | 1.71 | 1.69 | 1.49 |
| Азотни оксиди | 4.98 | 4.9 | 4.33 |
| Укупно | 860.25 | 847.06 | 747.65 |

Табела 5.4 Упоредни приказ добијених резултата и резултата других студија са сличним хибридном енергетским системима μXE -PV генератор-дизел генератор

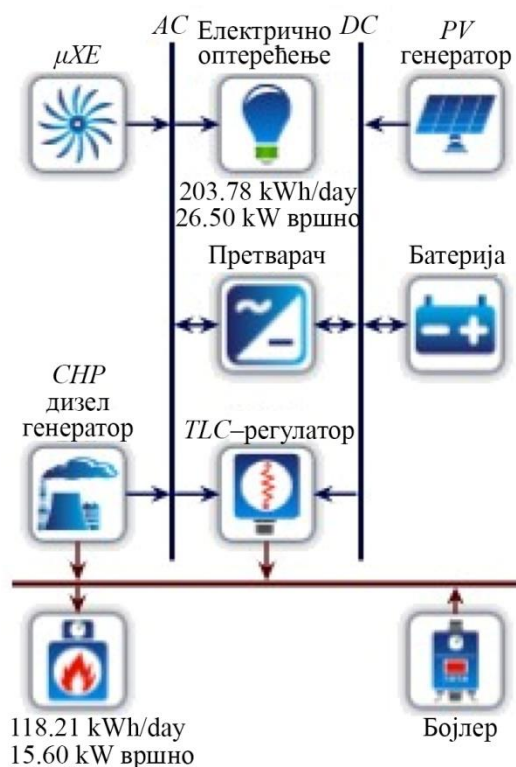
| Студија или референца | Укупни <i>NPC</i> -трошкови (USD) | Нивелисани <i>COE</i> -трошкови (USD/kWh) | Укупна годишња производња електричне енергије (kWh/yr) | Главни извор и произведена количина електричне енергије (kWh/yr) |
|-----------------------|-----------------------------------|---|--|--|
| Ова студија, Случај 3 | 33683 | 0.288 | 50090 | μXE 38399 |
| [24] | 70042 | 0.278 | 25515 | μXE 15493 |
| [67] | 113201 | 0.054 | 227504 | μXE 189262 |
| [68] | 963431 | 0.112 | 1518895 | μXE 1178600 |
| [69] | / | 0.131-0.206 | / | / |
| [70] | 997334 | 0.133 | / | μXE 497075 |
| [71] | 316827 | 0.566 | 55344 | μXE 45144 |
| [72] | 6804257 | / | 101572 | μXE 55885 |
| [73] | 2650126 | 0.5611 | 620002 | μXE 508874 |

6. ХИБРИДНИ СИСТЕМ μ XE-PV ГЕНЕРАТОР-CHP ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР-ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА-TLC-РЕГУЛАТОР-БОЈЛЕР-СЦЕНАРИО II: ОПТИМИЗАЦИЈА НАПАЈАЊА ЕЛЕКТРИЧНОМ И ТОПЛОТНОМ ЕНЕРГИЈОМ

6.1 Студија случаја

Са променом функције рибњака (тј. са повећањем понуде врста рибе) дошло је до промене у погледу захтева за оптерећењем, а самим тим и до промене врсте и перформанси компонената у систему. На Слици 6.1 дат је предлог конфигурације хибридног система са одговарајућим компонентама за пастрмски рибњак Јабланица, док су технички и економски параметри као и модели за поједине компоненте система представљени у Поглављима 3 и 4. Посебна пажња посветиће се искоришћењу рекуперисане отпадне топлоте из дизел генератора и вишка електричне енергије из *OIE* (μ XE и PV генератора) чија је функција покривање потреба за топлотном енергијом. Биће показано да ово додатно доприноси смањењу укупних трошкова система и емисије штетних гасова у животну средину, чиме се истиче неопходност примене TLC-регулатора у ванмрежним хибридним системима.

Конкретно, главни циљеви ове анализе су: (1) промена функције рибњака, која подразумева да се уз пастрмку узгаја и шаран за чији је правилан раст потребна топлија вода; (2) рекуперисану отпадну топлоту из дизел генератора и вишак електричне енергије у хибридном систему искористити за претварање у топлоту којом ће се загревати вода у базенима где ће се узгајати шаран; (3) оптимизација и техно-економска анализа хибридног система са различитим комбинацијама следећих компонената: μ XE, PV генератор, CHP дизел генератор, батерија, претварач, TLC-регулатор и бојлер; (4) избор најбоље конфигурације хибридног система на основу финансија, поузданости, одрживости и техничке функционалности. Основни циљеви су максимизирање производње енергије (електричне и топлотне) и повећање удела *OIE*, као и минимизирање емисије *GHG* и смањење укупних *NPC*-трошкова и нивелисаних *COE*-трошкова.



Слика 6.1 Предлог хибридног система за пастрмски рибањак Јабланица

Свеобухватна техно-економска анализа извршена је у софтверу *HOMER Pro*, помоћу којег је процењено и упоређено 12 могућих конфигурација са различитим комбинацијама компоненти система.

6.2 Резултати анализе и дискусија

У Табели 6.1 приказани су резултати оптималне конфигурације хибридног система претходно публикованих у [31] (који садржи $\mu\text{ХЕ}$, PV генератор, СНР дизел генератор, батерију, претварач, TLC -регулатор и бојлер) са укупним NPC -трошковима, нивелисаним COE -трошковима, процентуалним уделом ОИЕ у производњи енергије, процентуалним уделом вишка електричне енергије (ЕЕ) из ОИЕ и укупном производњом електричне и топлотне енергије. За све разматране конфигурације система усвојена је CC -стратегија. На Слици 6.2 дат је преглед трошкова појединачних компонента оптималног хибридног система у току његовог животног века, које укључују инвестиционе трошкове, трошкове P\&O , трошкове замене, трошкове горива, као и сачувану вредност.

Табела 6.1 Конфигурације хибридног система оптимизиране према укупним *NPC*–трошковима

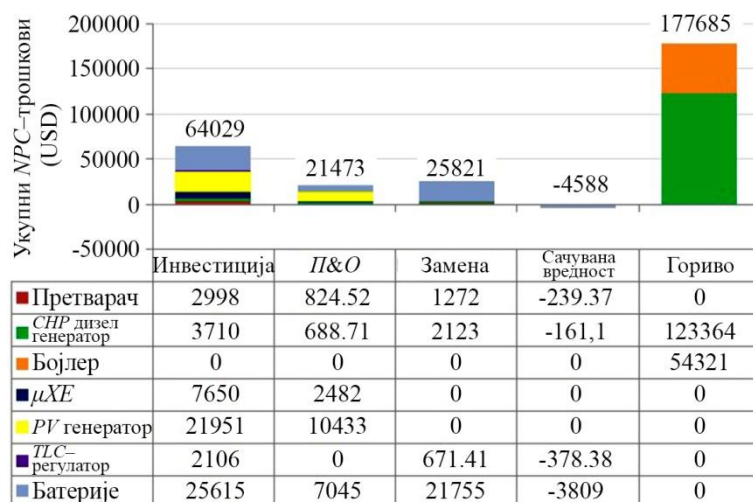
| Ранг | μXE (kW) | <i>PV</i> генератор (kW) | <i>CHP</i> дизел генератор (kW) | Батерија (комада) | Претварач (kW) | <i>TLC</i> –регулатор (kW) | Нивелисани <i>COE</i> –трошкови (USD/kWh) | Укупни <i>NPC</i> – трошкови (USD) | Удео <i>OIE</i> (%) | Удео <i>EE</i> (%) | Електрична енергија (kWh/yr) | Топлотна енергија (kWh/yr) |
|------|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|---|--|------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 8.5 | 40.4 | 12 | 109 | 12.8 | 39 | 0.178 | 284421 | 51.2 | 29 | 109899 | 70849 |
| 2 | 8.5 | 36.5 | 12 | 107 | 12.7 | - | 0.199 | 305176 | 43 | 25.9 | 105380 | 48127 |
| 3 | 8.5 | - | 12 | 43 | 9.11 | 8 | 0.248 | 352398 | 19.1 | 3.38 | 77993 | 58081 |
| 4 | 8.5 | - | 12 | 43 | 9.11 | - | 0.254 | 357566 | 17.3 | 3.09 | 77835 | 57773 |
| 5 | - | 56.8 | 12 | 35 | 18.3 | 49 | 0.297 | 399380 | 19.1 | 36 | 119927 | 93196 |
| 6 | - | 94 | 12 | 381 | 31.2 | - | 0.317 | 418783 | 54.1 | 35.8 | 131937 | 45962 |
| 7 | 8.5 | 167 | - | 766 | 26.8 | 208 | 0.362 | 461173 | 73.6 | 69.1 | 258172 | 43407 |
| 8 | 8.5 | 147 | - | 812 | 36.5 | - | 0.382 | 480238 | 63.3 | 65.8 | 232856 | 43147 |
| 9 | - | 164 | - | 773 | 26.9 | 195 | 0.398 | 496008 | 70.2 | 60.8 | 216426 | 166599 |
| 10 | - | 157 | - | 790 | 36.2 | - | 0.409 | 507024 | 63.3 | 59.1 | 207560 | 43147 |
| 11 | - | - | 12 | 95 | 10.4 | 2 | 0.467 | 562853 | 0 | 0.188 | 75690 | 67324 |
| 12 | - | - | 12 | 95 | 10.4 | - | 0.468 | 562959 | 0 | 0.188 | 75690 | 67324 |

Из Табеле 6.1 може се видети да се оптимална конфигурација хибридног система састоји од 8.5 kW μXE , 40.4 kW *PV* генератора, 12 kW *CHP* дизел генератора, 109 батерија (132108 kWh), 12.8 kW претварача и 39 kW *TLC*–регулатора. Оптимални систем има најмање укупне *NPC*–трошкове и нивелисане *COE*–трошкове који износе 284421 USD и 0.178 USD/kWh, редом, као и висок процентуални удео *OIE* од 51.2% и процентуални удео вишка електричне енергије из *OIE* од 29% у укупној производњи електричне енергије. Са високим процентуалним уделом *OIE* има се већи број часова погона у току године, а тиме и већа производња електричне и топлотне енергије, које у овом случају износе 109899 kWh/yr и 70849 kWh/yr, редом. Другорангирани систем је идентичан са првим само не садржи *TLC*–регулатор, одакле следи да се снаге *PV* генератора и претварача смањују, као и број батерија. Даље, имају се мањи процентуални удели *OIE* и *EE* у укупној производњи, па је производња електричне и топлотне

енергије мања, а укупни *NPC*-трошкови и нивелисани *COE*-трошкови су виши у односу на прворангирани систем.

Такође, седморангирани систем има највише процентуалне уделе *OIE* и *EE* у укупној производњи електричне енергије од 73.6% и 69.1%, редом, као и нивелисане *COE*-трошкове који су за 0.184 USD/kWh виши од оних добијених за прворангирани систем. Међутим, величина *PV* генератора у овом рангу је 167 kW што је скоро четири пута више у односу на прворангирани систем, а исто тако ту су већи број батерија и већа снага претварача, па су и укупни трошкови система виши за 176752 USD у односу на оне код прворангираног система. Једанаесто и дванаесторангирани системи састоје се од *CHP* дизел генератора, батерије, претварача и бојлера са и без *TLC*-регулатора и имају много вишу вредност емисије *GHG* од најбоље конфигурације хибридног система, као што је то наведено у Табели 6.1. Уз то, укупни *NPC*-трошкови и нивелисани *COE*-трошкови су много већи у поређењу са њима одговарајућим трошковима код најбоље конфигурације. Стога се прворангирани систем сматра најбољом конфигурацијом ванмрежног система за снабдевање разматране локације електричном и топлотном енергијом.

Преглед новчаног тока са Сlike 6.2, показује да капитални трошкови и трошкови горива имају највеће процентуалне уделе у укупним трошковима система. Високи капитални трошкови се јављају због инсталације *PV* генератора и батерија, док се добијена цена горива приписује времену погона *CHP* дизел генератора и бојлера. Одржавање *PV* генератора води високим трошковима *P&O* у износу од 10433 USD, трошковима замене батерија од 21755 USD и нултим трошковима замене *OIE* (μXE и *PV* генератора) јер је њихов животни век исти као и животни век система. При томе, укупни трошкови *TLC*-регулатора су најнижи и износе 2399 USD (што чини 0.85% од укупних трошкова система), док су трошкови *CHP* дизел генератора највећи и износе 129724 USD (што чини 45.6% од укупних трошкова система).

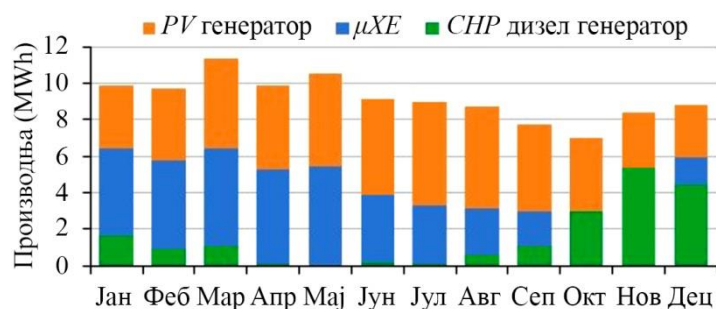


Слика 6.2 Преглед новчаног тока за оптималну конфигурацију хибридног система током његовог животног века

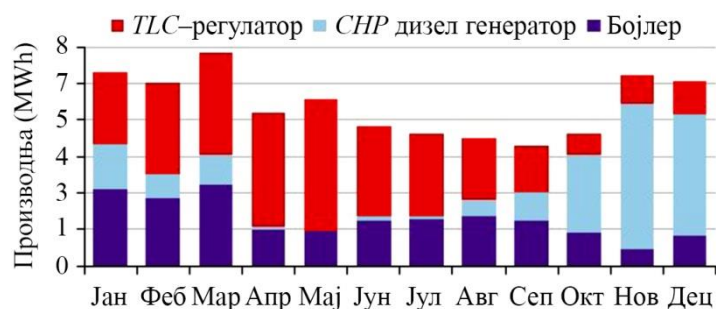
Следећи корак је прецизно предвиђање потрошње (оптерећења) и балансирање производње из различитих извора електричне и топлотне енергије. У вези с тим, на Слици 6.3 приказана је месечна производња електричне и топлотне енергије из μ ХЕ, *PV* генератора, *CHP* дизел генератора, *TLC*-регулатора и бојлера, док су токови електричне и топлотне енергије и одговарајућа расподела снаге у периоду од 365 дана приказани на Слици 6.4. Слика 6.4 приказује излазне снаге које су добијене за часовни погон следећих извора енергије: μ ХЕ, *PV* генератора, *CHP* дизел генератора, *TLC*-регулатора и бојлера, као и улазне снаге система за складиштење енергије (батерије). Са Слика 6.3а и 6.4а може се видети да су кључни извори електричне енергије μ ХЕ и *PV* генератор, а помоћни *CHP* дизел генератор и батерије. Највише електричне енергије у хибридном систему производи *PV* генератор са 53197 kWh/yr, затим следе μ ХЕ са 38399 kWh/yr и *CHP* дизел генератор са 18304 kWh/yr, што чини 48.4%, 34.9% и 16.7%, од укупне производње електричне енергије, редом. Такође, може се видети да се *CHP* дизел генератор и батерије укључују у систем када се не може покрити потражња из *PV* генератора и μ ХЕ, конкретно током зимских месеци када је интензитет соларног зрачења нижи и током летњих месеци када је проток воде у реци нижи.

Графикон са Слике 6.4а показује да *PV* генератор у производњи електричне енергије учествује са укупним радом током године од 4383 часова и максималном излазном снагом од 41.1 kW, да μ ХЕ ради 7296 часова са

максималном излазном снагом од 7.23 kW, да *CHP* дизел генератор ради 2131 часова са максималном излазном снагом од 12 kW и да батерије раде са максималном улазном снагом од 28.72 kW.



(а)

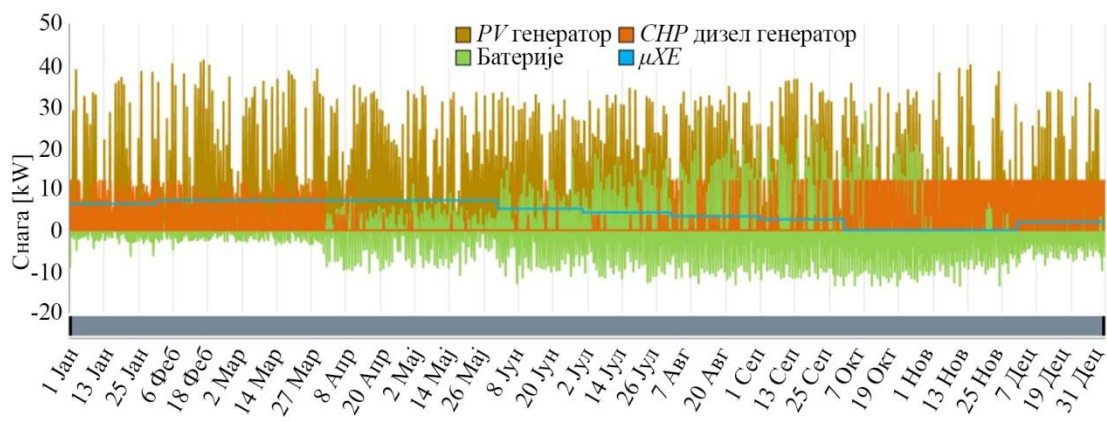


(б)

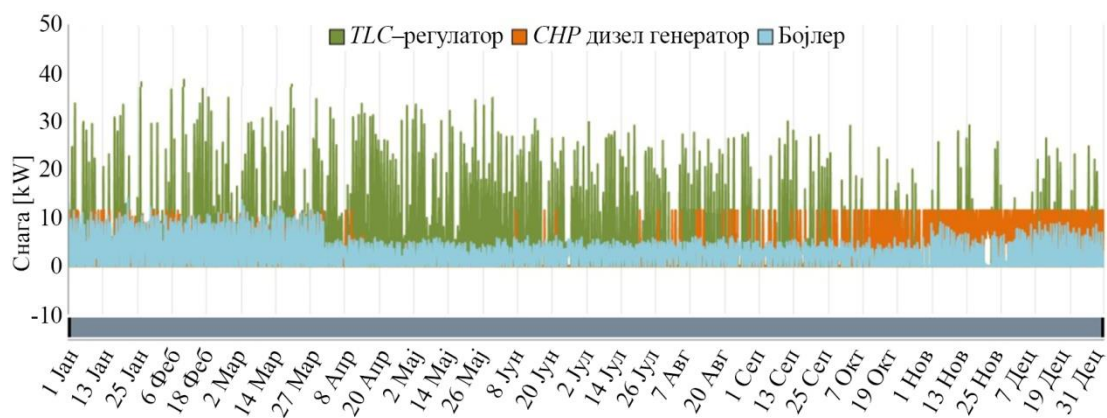
Слика 6.3 Просечна месечна производња енергије за поједине компоненте оптималног хибридног система: производња електричне енергије (а) и производња топлотне енергије (б)

Са Слика 6.3б и 6.4б може се видети да се вршна производња топлотне енергије има током зимских месеци, док се најмања производња топлотне енергије има током летњих месеци. При томе, највише топлотне енергије требало би да произведе *TLC*-регулатор (31851 kWh/yr), затим бојлер (20613 kWh/yr) и *CHP* дизел генератор (18385 kWh/yr), што редом чини 45.0%, 29.1% и 25.9% од укупне производње топлотне енергије. Конкретно, Слика 6.4б приказује доприносе *CHP* дизел генератора, бојлера и *TLC*-регулатора у покривању топлотног оптерећења разматраног рибака у периоду од 365 дана. Постојећи *TLC*-регулатор омогућава да се вишак произведене електричне енергије претвори у топлоту, тако да преостаје врло мало или нимало неискоришћене електричне

енергије. Времена рада *TLC*-регулатора, бојлера и *CHP* дизел генератора у току године износе 2982, 5189 и 2131 час, редом, док су њихове максималне излазне снаге редом 38.6 kW, 14.2 kW и 11.6 kW.



(a)



(б)

Слика 6.4 Расподела снаге у периоду од 365 дана: токови електричне енергије (а) и токови топлотне енергије (б)

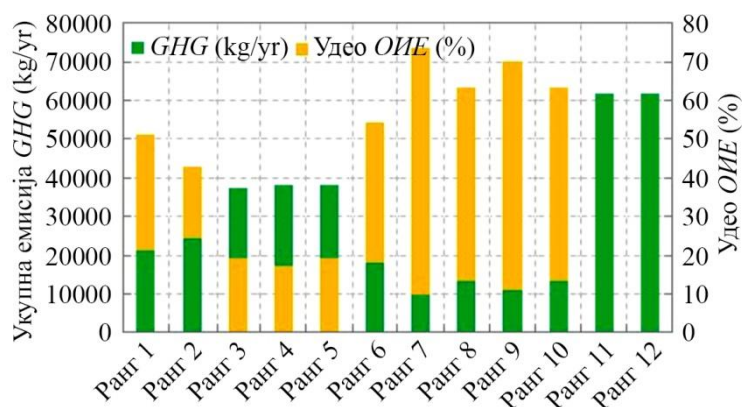
Табела 6.2 приказује емисије *GHG* укључујући угљен-диоксид (CO_2), угљен-моноксид (CO), несагореле угљоводонике (UHC), атмосферске честице (PM), сумпор-диоксид (SO_2) и азотне оксиде (NO) ослобођене из сваке конфигурације система. Ослобађање емисија *GHG* и других загађивача од стране датог хибридног електроенергетског система приписује се потрошњи дизел горива у *CHP* дизел генератору и бојлеру. Из Табеле 6.2 може се видети да је оптимална конфигурација система еколошки прихватљива јер емитује загађујуће материје у количини од 21398 kg/уг и има потрошњу дизел горива од 8061 l/уг.

Седморангирани систем има најмању емисију *GHG* од 9814 kg/yr и потрошњу дизел горива од 3702 l/yr, док дванаесторангирани систем има највећу емисију *GHG* од 61801 kg/yr и потрошњу дизел горива од 23272 l/yr.

Такође, Табела 6.2 показује да је главни загађивач атмосфере на овој локацији CO_2 , затим CO и NO , док атмосферске честице најмање доприносе укупној емисији *GHG*. И у овом случају, један од начина за смањење емисије *GHG* је повећано коришћење *ОИЕ*. Ова зависност удела *ОИЕ* од емисије *GHG* је приказана на Слици 6.5, одакле се може видети да се са повећањем удела *ОИЕ* смањује емисија *GHG* и обрнуто. Као што се може видети са Слике 6.5, седморангирани систем има највећи удео *ОИЕ* и најмању емисију *GHG*, док дванаесторангирани систем нема *ОИЕ* и зато је емисија *GHG* највећа.

Табела 6.2 Емисија *GHG* из различитих конфигурација хибридног система

| Ранг | Емисија (kg/yr) | | | | | |
|------|-----------------|-------------|--------------|------------|---------------|-------------|
| | CO_2 | CO | UHC | PM честице | SO_2 | NO |
| 1 | 21173 | 91.5 | 4.03 | 0.548 | 42.9 | 86.0 |
| 2 | 24348 | 94.4 | 4.16 | 0.566 | 49.4 | 88.7 |
| 3 | 36830 | 201 | 8.84 | 1.20 | 74.5 | 188 |
| 4 | 37468 | 199 | 8.79 | 1.20 | 75.8 | 187 |
| 5 | 37705 | 227 | 10.0 | 1.36 | 76.2 | 214 |
| 6 | 18335 | 39.0 | 1.72 | 0.234 | 37.3 | 36.7 |
| 7 | 9794 | 0 | 0 | 0 | 20.0 | 0 |
| 8 | 13649 | 0 | 0 | 0 | 27.9 | 0 |
| 9 | 11077 | 0 | 0 | 0 | 22.7 | 0 |
| 10 | 13649 | 0 | 0 | 0 | 27.9 | 0 |
| 11 | 60924 | 378 | 16.6 | 2.27 | 123 | 355 |
| 12 | 60926 | 378 | 16.6 | 2.27 | 123 | 355 |



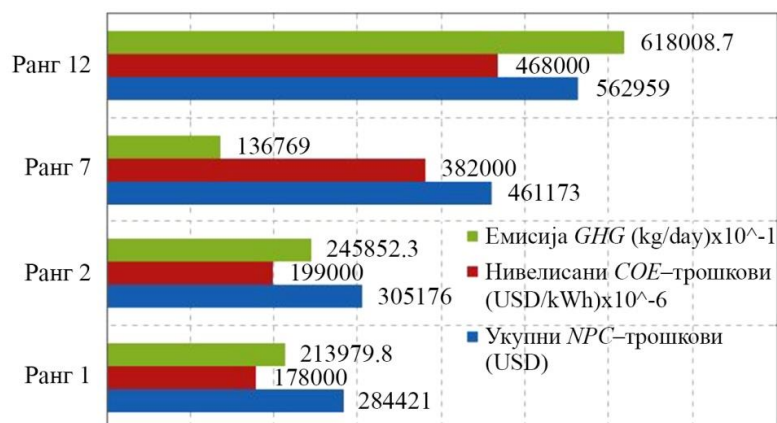
Слика 6.5 Еколошке перформансе различитих конфигурација хибридног система

Да би се истражили ефекти *OIIE* и *TLC*-регулатора на оптимално понашање хибридног енергетског система међусобно су упоређивани различити индикатори. Конкретно, оптимални хибридни систем упоређен је са следећа три хибридна система сличне конфигурације:

1. Дванаесторангирани хибридни систем (основни случај), који не укључује *OIIE* и *TLC*-регулатор;
2. Седморангирани хибридни систем, који не укључује *CHP* дизел генератор;
3. Другорангирани хибридни систем, који не укључује *TLC*-регулатор.

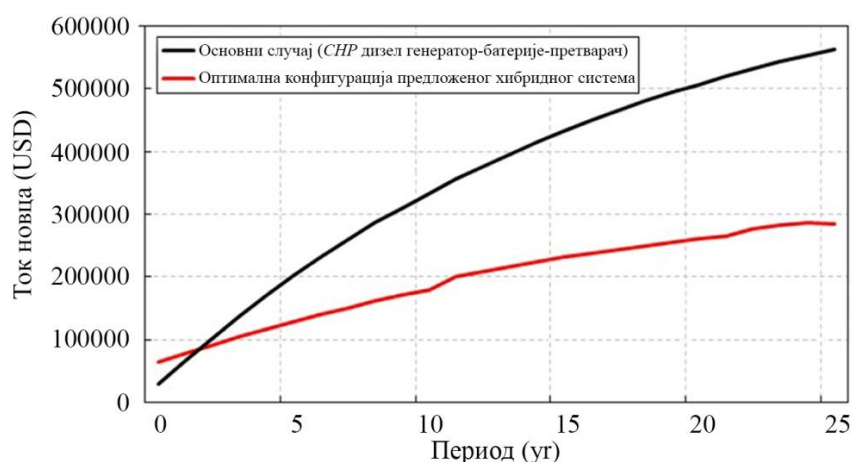
Као што се може видети са Сlike 6.6 и из Табеле 5.4, у поређењу са другоранганим хибричним системом, употреба *TLC*-регулатора може смањити укупне *NPC*-трошкове, нивелисане *COE*-трошкове и емисију *GHG* за 20755 USD, 0.021 USD/kWh и 31872.5 kg/yr, редом. Међутим, у поређењу са седморанганим хибричним системом, где је изражен ефекат *PV* генератора, оптимални хибридни систем захтева четири пута мање снаге *PV* генератора и приближно седам пута мањи број батерија. У вези са тим, следи да су одговарајући укупни *NPC*-трошкови и нивелисани *COE*-трошкови нижи за 38.3% и 53.4%, редом; а да су одговарајуће емисије *GHG* веће за 36.1%. Даље, у поређењу са дванаесторанганим хибричним системом, интеграција *OIIE* са *CHP* дизел генератором, *TLC*-регулатором и бојлером може значајно утицати на уштеду уложеног новца и очување животне средине. Према овом последњем поређењу,

оптимизација може снизити укупне NPC -трошкове, нивелисане COE -трошкове и емисије GHG за 278538.0 USD, 0.29 USD/kWh и 40402.9 kg/yr, редом.



Слика 6.6 Упоредни приказ утицаја OIE и TLC -регулатора на перформансе система

Кумулативни дисконтовани новчани ток за оптималну конфигурацију предложеног хибридног система и основни хибридни систем (основни случај) током животног века система приказан је на Слици 6.7. Под основним хибричним системом подразумева се конфигурација хибридног система без OIE и са највећим укупним NPC -трошковима. Ова слика показује да предложени хибридни систем може да врати уложени новац за само 1.8 година, а да после тога може да остварује профит. Даке, може се сматрати да је оптимална конфигурација предложеног хибридног система изводљива.



Слика 6.7 Кумулативни дисконтовани новчани ток током животног века система

7. ХИБРИДНИ СИСТЕМ μ XE-PV ГЕНЕРАТОР-CHP ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОР-ПРЕТВАРАЧ-БАТЕРИЈА-TLC-РЕГУЛАТОР- БОЈЛЕР-ЕЛЕКТРОЛИЗЕР-РЕЗЕРВОАР ВОДОНИКА- СЦЕНАРИО II: ОПТИМИЗАЦИЈА НАПАЈАЊА ЕЛЕКТРИЧНОМ И ТОПЛОТНОМ ЕНЕРГИЈОМ

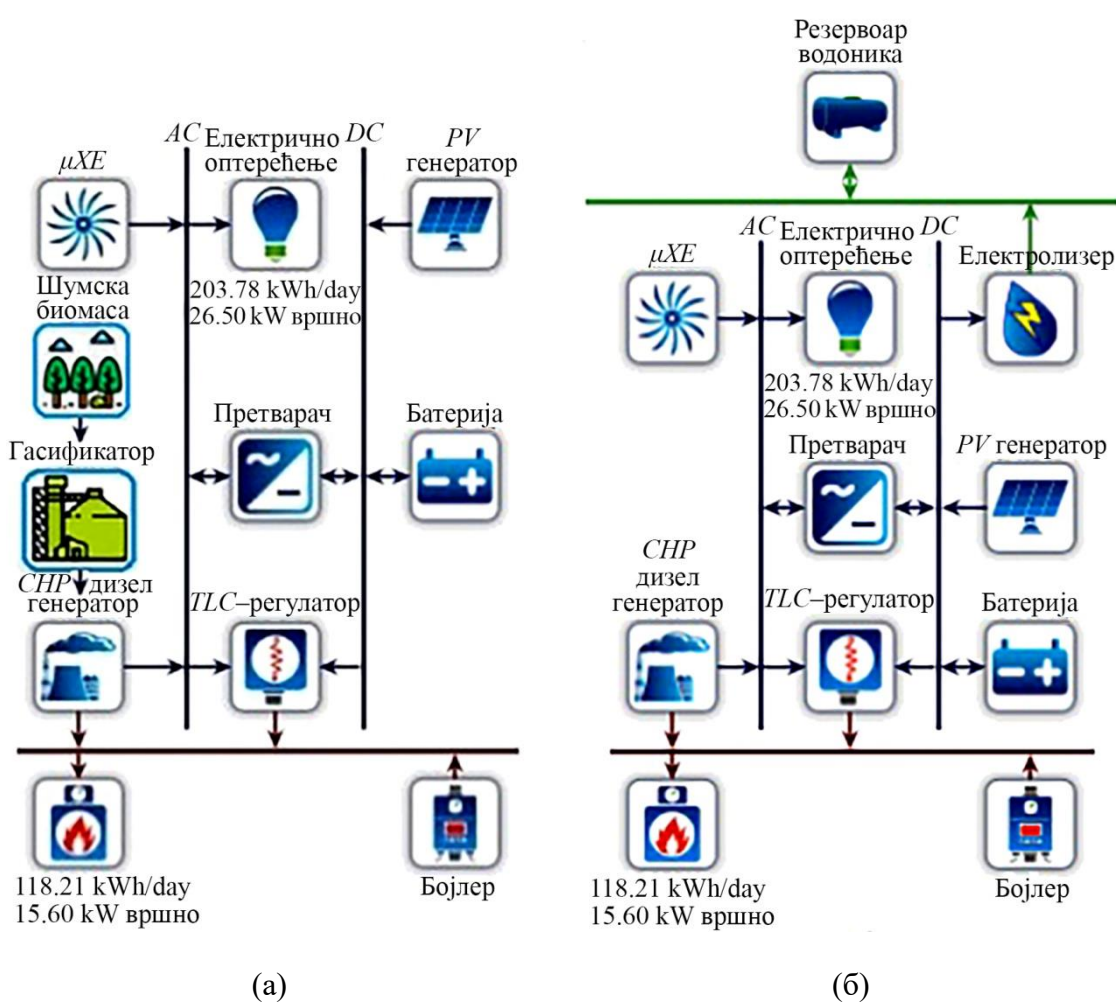
7.1 Студија случаја

Биомаса је један од *ОИЕ*, који је погодан за употребу у хибридним електроенергетским системима. Смањена емисија *GHG*, повећана енергетска ефикасност и смањени трошкови су главни разлози за примену биомасе у хибридним системима [166]. Удаљени и изоловани рибњаци [167], са пастрмком, окружени шумама, погодне су локације за изградњу хибридних система који користе биогаз из дрвета уместо фосилних горива у *CHP* дизел генераторима. Такође, вишак произведене електричне енергије се помоћу електролизера може претворити у водоник и ускладиштити у резервоар водоника, одакле се као гориво користи за погон *CHP* дизел генератора.

Циљеви овог поглавља су оптимизација и техно-економско поређење два хибридна енергетска система за разматрани рибњак, у којима би се користили потенцијали шумске биомасе, хидро енергије и соларног зрачења. Оптимизација хибридног система врши се по основу укупних *NPC*-трошкова, нивелисаних *COE*-трошкова и емисије *GHG*. У овом поглављу, оптимизација система биће спроведена за случајеве комбинације μ XE и PV генератора са *CHP* дизел генератором који за погон користи: биогаз произведен пиролизом отпадног дрвета (Случај 1), биогаз произведен пиролизом комерцијалног буковог дрвета (Случај 2); и водоник (Случај 3). При томе, под комерцијалним буковим дрветом се подразумева крупно буково дрво где 71% од укупне количине јесу стабла, док се под отпадним дрветом подразумевају остаци од буковог дрвета са уделом од 29% у укупној количини дрвне масе (дрвни исечци, грање, лишће, кора, пањеви и пиљевина) [168]. Како би се утврдили цена и количина дрвне биомасе, каматна

стопа, соларна ирадијанса и проток воде у реци за који се може користити задата оптимална конфигурација система (за напајање разматране локације електричном и топлотном енергијом) извршена је анализа осетљивости. Све симулације су изведене у софтверу *HOMER Pro* [52].

На Слици 7.1 је дат шематски приказ конфигурације предложеног хибридног система са компонентама за пастрмски рибњак Јабланица, док су технички и економски параметри, као и модели који описују поједине компоненте система представљени у Поглављима 3 и 4.



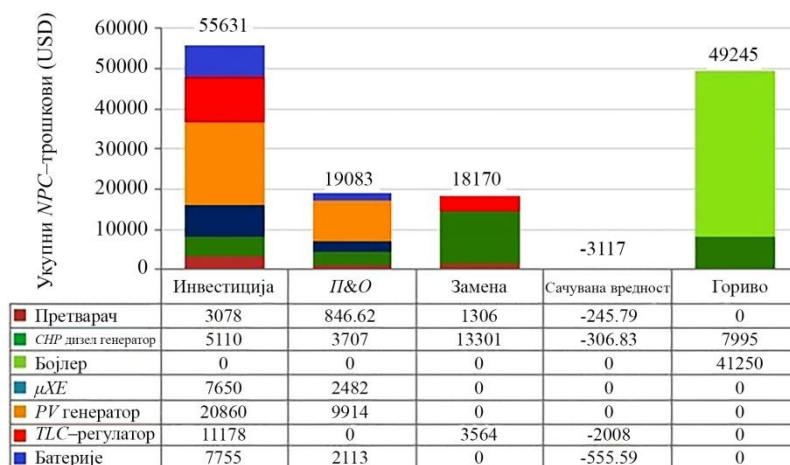
Слика 7.1 Конфигурација предложеног хибридног система са: *CHP* дизел генератором на биогаз (а) и *CHP* дизел генератором на водоник (б)

7.2 Резултати анализе и дискусија

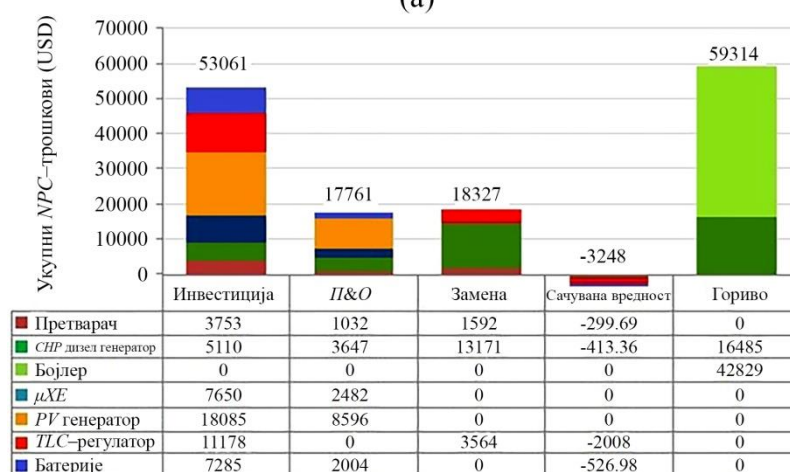
Симулира се погон обе конфигурације са Сlike 7.1, које се састоје од μXE , PV генератора, CHP јединице, батерије, претварача, TLC -регулатора и бојлера, као и за сваки разматрани случај погона (Случајеви 1, 2 и 3). За сваки од три разматрана случаја, софтвер *HOMER Pro* је табелирао све резултате симулација са свим изводљивим комбинацијама, односно категорисао конфигурације система из којих су одабране најпрофитабилније (са најмањим укупним NPC -трошковима).

Резултати добијени за обе разматране конфигурације система претходно су публиковани у [16,17,19] и дати су у Табели 7.1. У овој табели дати су капацитети и број компоненти и укупна снага система, као и економски, енергетски и еколошки подаци о систему за три разматрана случајева. Слика 7.2 даје преглед трошкова појединачних компоненти оптималног хибридног система током животног века система за Случајеви 1, 2 и 3. На Слици 7.3 приказана је месечна производња енергије за појединачне компоненте хибридног система, и то: производња електричне енергије од стране μXE , PV генератора и CHP дизел генератора, као и производња топлотне енергије од стране TLC -регулатора, CHP дизел генератора и бојлера, за Случајеви 1, 2 и 3. На Слици 7.4 приказана је излазна снага CHP дизел генератора и његово учешће у укупној производњи електричне и топлотне енергије током године за три разматрана случајева.

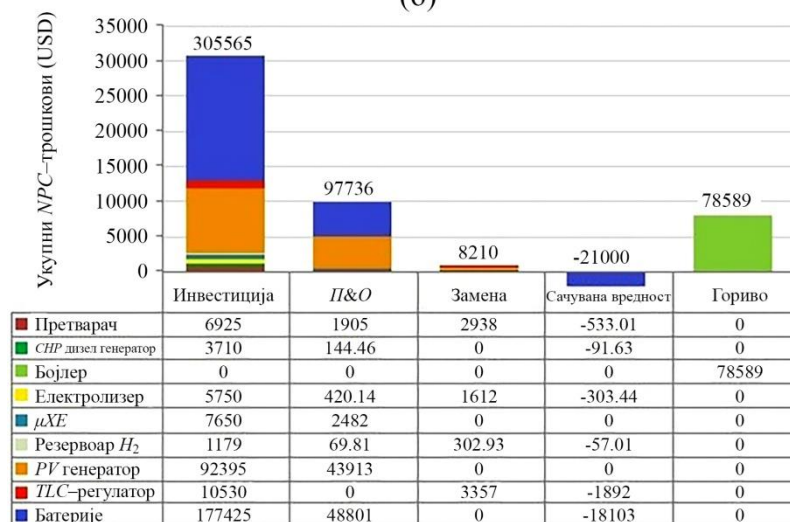
Из Табеле 7.1 може се видети да оптимална конфигурација хибридног система одговара Случају 1 и да садржи μXE снаге 8.5 kW, PV генератор снаге 38.3 kW, CHP дизел генератор на биогаз из отпадног дрвета снаге 12 kW, 33 батерије (39966 kWh), претварач снаге 13.1 kW, TLC -регулатор снаге 207 kW и један бојлер. Оптимална конфигурација има најмање укупне NPC -трошкове и нивелисане COE -трошкове од 139014 USD и 0.0263 USD/kWh, редом. Укупна снага система износи 278.9 kW и она је виша од оне из Случаја 2 за 2.2 kW и мања од оне из Случаја 3 за 146.3 kW.



(а)

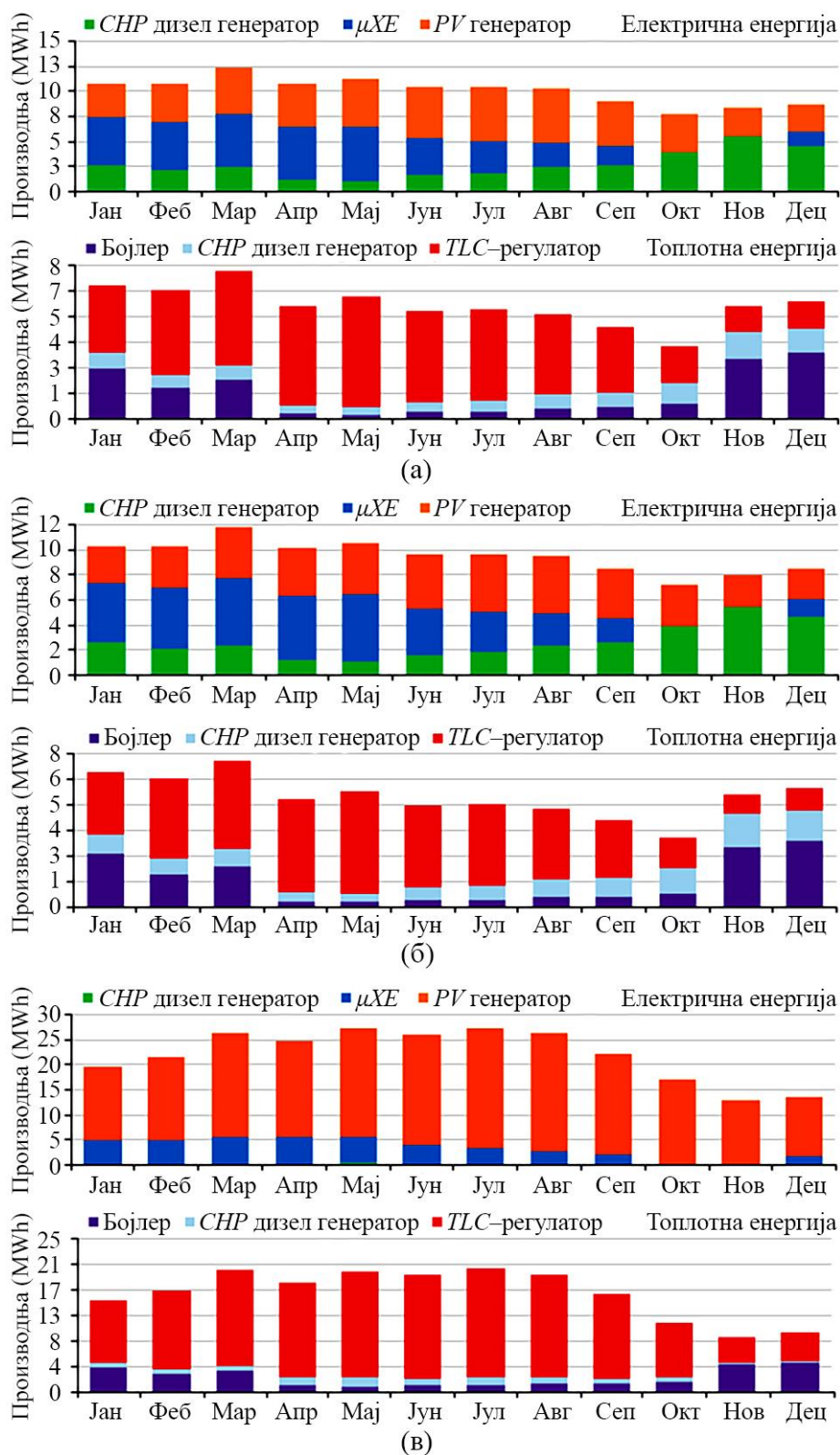


(б)



(в)

Слика 7.2 Приказ трошкова за поједине компоненте у разматраним конфигурацијама система током животног века система за: Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в)



Слика 7.3 Просечна месечна производња електричне (горњи графикон) и топлотне енергије (доњи графикон) појединих компоненти у оптималном хибридном систему за: Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в)

Табела 7.1 Приказ оптималних конфигурација система

| Разматрани систем | Случај 1 | Случај 2 | Случај 3 |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------|
| Гориво | Биогас из отпадног дрвета | Биогас из буковог дрвета | Водоник |
| Стратегија отпреме енергије | <i>CC</i> | <i>CC</i> | <i>LF</i> |
| <i>Компонента</i> | | | |
| μXE (kW) | 8.5 | 8.5 | 8.5 |
| <i>PV</i> генератор (kW) | 38.3 | 33.2 | 170 |
| <i>CHP</i> дизел генератор (kW) | 12 | 12 | 12 |
| Батерија (број) | 33 | 31 | 755 |
| Претварач (kW) | 13.1 | 16 | 29.5 |
| <i>TLC</i> -регулатор (kW) | 207 | 207 | 195 |
| Бојлер (количина) | 1 | 1 | 1 |
| Електролизер (kW) | / | / | 10 |
| Резервоар водоника (kg) | / | / | 7.14 |
| Укупна снага система (kW) | 278.9 | 276.7 | 425 |
| <i>Економија</i> | | | |
| Инвестициони трошкови (USD) | 55631 | 53061 | 305565 |
| Трошкови замене (USD) | 18170 | 18327 | 8210 |
| Трошкови <i>P&O</i> (USD/год) | 19083 | 17761 | 97736 |
| Укупни <i>NPC</i> -трошкови (USD) | 139014 | 145214 | 469100 |
| Нивелисани <i>COE</i> -трошкови (USD/kWh) | 0.0263 | 0.0328 | 0.370 |
| Трошкови горива (USD) | 49245 | 59314 | 78589 |
| Време погона <i>CHP</i> дизел генератора (h/yr) | 5735 | 5643 | 447 |
| Потрошња дизел горива (l/yr) | 1871 | 1943 | 3566 |
| Потрошња горива (kg/yr) | 14600 | 14500 | 676 |
| <i>Електрична енергија</i> | | | |
| Производња из μXE (kWh/yr) | 38399 | 38399 | 38399 |
| Производња из <i>PV</i> генератора (kWh/yr) | 50554 | 43829 | 223917 |
| Производња из <i>CHP</i> дизел генератора (kWh/yr) | 31753 | 31650 | 2038 |
| Укупна производња (kWh/yr) | 120706 | 113878 | 264354 |
| Укупна потрошња (kWh/yr) | 74347 | 74336 | 105605 |
| Непокривено оптерећење (kWh/yr) | 32.7 | 43.9 | 64.4 |

| | | | |
|--|---------|---------|--------|
| Удео вишка електричне енергије (%) | 37.6 | 33.9 | 58.1 |
| Удео <i>ОИЕ</i> (%) | 87.4 | 86.2 | 74.6 |
| <i>Топлотна енергија</i> | | | |
| Производња из <i>СНР</i> дизел генератора (kWh/yr) | 9387 | 10723 | 10242 |
| Производња из <i>TLC</i> –регулатора (kWh/yr) | 45428 | 38602 | 155599 |
| Производња из бојлера (kWh/yr) | 16252 | 16851 | 29822 |
| Укупна производња (kWh/yr) | 71067 | 66176 | 193725 |
| Укупна потрошња (kWh/yr) | 43147 | 43147 | 43147 |
| Удео вишка топлотне енергије (%) | 64.7 | 50.6 | 349 |
| <i>Емисија GHG</i> | | | |
| Угљен-диоксид (kg/yr) | 4977 | 5167 | 9434 |
| Угљен-моноксид (kg/yr) | 0.237 | 0.239 | 11.0 |
| Несагорели угљоводоници (kg/yr) | 0.0105 | 0.0105 | 0.486 |
| Атмосферске честице (kg/yr) | 0.00142 | 0.00143 | 0.0662 |
| Сумпор-диоксид (kg/yr) | 10.1 | 10.5 | 19.3 |
| Азотни оксиди (kg/yr) | 0.223 | 0.224 | 10.4 |
| Укупно (kg/yr) | 4988 | 5178 | 9475 |

Очигледно је да се коришћењем хибридног система са *СНР* дизел генератором на биогаз из отпадног дрвета уместо *СНР* дизел генератора на биогаз из буковог дрвета и *СНР* дизел генератора на водоник, укупни *NPC*–трошкови смањују за 6200 USD у поређењу са Случајем 2 и за 330086 USD у поређењу са Случајем 3. Разлика у укупним трошковима система највећим делом настаје због разлике у начину производње водоника, биогаза из буковог дрвета и биогаза из отпадног дрвета, као и разлике у укупној потрошњи горива. При коришћењу *СНР* дизел генератора на водоник (Случај 3), због високе вредности доње топлотне моћи и ниске густине горива (Табела 4.6), ослобађа се велика количина топлоте при сагоревању, па је ефикасност *СНР* дизел генератора нижа (Слика 4.16д) и потребна је већа количина горива. У Случају 3 примењује се *LF*–стратегича по којој систем тежи ефикаснијем искоришћењу обновљивих ресурса, пре свега соларног зрачења, због чега се снага *PV* генератора повећава на 170 kW. Даље, са повећањем снаге *PV* генератора долази до пораста снаге претварача на 29.5 kW, као и броја батерија на 755, што резултира високим нивелисаним *COE*–

трошковима који у Случају 3 износе 0.370 USD/kWh. Ови трошкови су виши у поређењу са оним из Случаја 2 (0.0328 USD/kWh) и Случаја 1 (0.0263 USD/kWh) и то онда када су ови трошкови најнижи. Са већим коришћењем биомасе из отпадног дрвета, која у Случају 1 износи 14.6 t/уг потрошња дизел горива у бојлеру се значајно смањује и износи 1871 l/уг, што је за 72 l/уг мање него у Случају 2 и 1695 l/уг мање него у Случају 3.

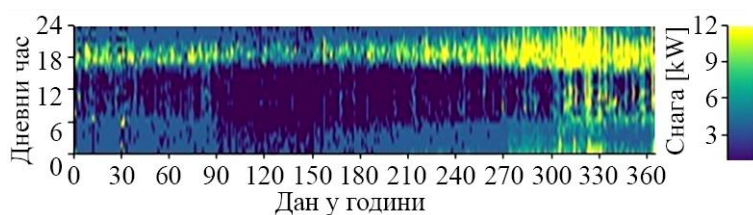
Преглед новчаног тока са Сlike 7.2 показује да трошкови горива и инвестициони трошкови имају највеће уделе у укупним трошковима система. У Случају 1 трошкови горива су најнижи и износе 49245 USD од чега трошкови биогаса из отпадног дрвета износе 5.7%, и трошкови дизел горива износе 29.7% од укупних трошкова система. Овај хибридни систем смањује укупне трошкове горива за 10069 USD у поређењу са Случајем 2 и за 29344 USD у поређењу са Случајем 3. Што се тиче инвестиционих трошкова, већа улагања су потребна за инсталацију *PV* генератора, батерија за складиштење електричне енергије и *TLC*-регулатора који претвара вишак електричне у топлотну енергију. Конкретно, инвестициони трошкови појединих компоненти система за Случајеве 1 и 2 су слични и у укупном капиталу за *PV* генератор, *TLC*-регулатор, *μХЕ*, батерије, *СНР* дизел генератор и претварач износе 15%, 8%, 5.5%, 5.6%, 3.7% и 2.2% (Случај 1) и 12.4%, 7.7%, 5.3%, 5%, 3.5% и 2.6% (Случај 2), редом (Слика 7.2а и Слика 7.2б). У Случају 3 инвестициони трошкови за батерије, *PV* генератор, *TLC*-регулатор, *μХЕ*, претварач, електролизер, *СНР* дизел генератор и резервоар водоника износе 37.8%, 19.7%, 2.2%, 1.6%, 1.5%, 1.2%, 0.8% и 0.2% од укупних капиталних улагања, редом (Слика 7.2в). Трошкови замене и *П&О* су углавном потребни за батерије и *СНР* дизел генератор, док трошкови бојлера не захтевају никаква улагања осим за куповину дизел горива. Због краћег погонског времена *СНР* дизел генератора који у Случају 1 износи 2.62 године, трошкови замене су прилично високи и износе 13301 USD, што је за 130 USD више него у Случају 2 када је погонско време *СНР* дизел генератора 2.66 година. Исто тако, трошкови замене су виши од оних у Случају 3, где нема трошкова замене за погонско време *СНР* дизел генератора од 33.6 година.

При коришћењу *СНР* дизел генератора на биогаз из дрвета (Случајеви 1 и 2), због ниских вредности доње топлотне моћи и густине биогаса (Табела 4.6)

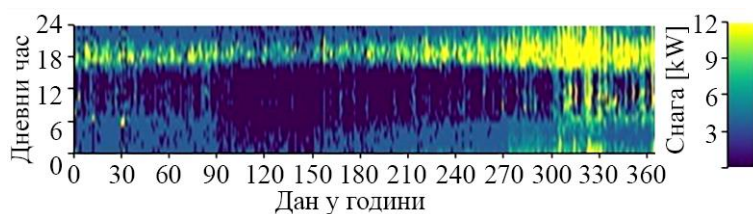
ослобађа се мала количина топлоте при сагоревању, виши је степен искоришћења генератора ((Слика 4.16в) и Слика 4.16г)) и систем тежи повећању производње електричне енергије. Са већим учешћем *CHP* дизел генератора долази до смањења снаге *PV* генератора и броја батерија у поређењу са Случајем 3. Из Табеле 6.2 и са Сlike 7.3 може се видети да је укупна годишња производња електричне енергије у Случају 1 (120706 kWh) већа него у Случају 2 (113878 kWh) и мања у односу на Случају 3 (264354 kWh), а 41.9% ове енергије се генерише из *PV* генератора, 31.8% из μXE и 26.3% из *CHP* дизел генератора. У Случајевима 2 и 3 *CHP* дизел генератор учествује са 25.8% и 0.8% у укупној годишњој производњи електричне енергије. Због ниске топлотне моћи биогаса у поређењу са водоником, *CHP* дизел генератор у Случају 1 производи најмање топлотне енергије (9387 kWh/yr). Како би се надокнадила овако мала производња из *CHP* дизел генератора систем тежи да претвори вишак произведене електричне енергије из других извора енергије (првенствено из μXE и *PV* генератора) у топлотну енергију, па се и снага *TLC*-регулатора повећава са 195 kW колико износи у Случају 3 на 207 kW у Случајевима 1 и 2. Са већом снагом *TLC*-регулатора повећава се и укупна производња топлотне енергије у систему која у Случају 1 износи 71067 kWh/yr, што је за 4891 kWh/yr више него у Случају 2. При томе, у сва три разматрана случаја највише топлотне енергије се добија из *TLC*-регулатора, затим из бојлера и *CHP* дизел генератора који у укупној производњи учествују са: 63.9%, 22.9% и 13.2% за Случај 1; 59.4%, 24.1% и 16.5% за Случај 2; 79.3%, 15.4% и 5.3% за Случај 3; редом.

Са већом потрошњом дрвне биомасе која у Случају 1 износи 14600 kg/yr повећава се и време погона *CHP* дизел генератора и износи 5735 h/yr, што је за 92 h/yr више него у Случају 2 и 5288 h/yr више него у Случају 3. При томе значајно се смањује време погона бојлера, а самим тим и потрошња дизел горива. Времена погона бојлера у Случајевима 1, 2 и 3 износе: 4845 h/yr, 5032 h/yr и 5453 h/yr, редом. На Слици 7.4 приказана је излазна снага *CHP* дизел генератора и њено учешће у укупној производњи енергије за три разматрана случаја. Са Сlike 7.4 може се видети да *CHP* дизел генератор учествује у производњи енергије у тренутку када се има недовољна производња из μXE и *PV* генератора, а то је углавном у периоду између 0 и 6 h и између 18 и 24 h, као и током зимских месеци

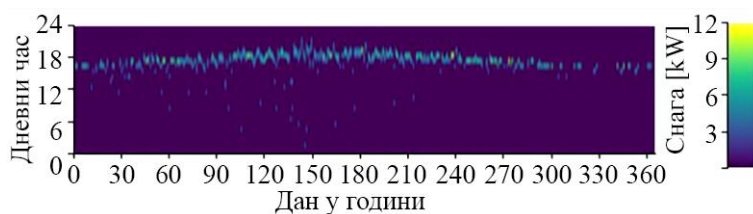
(новембар, децембар) када је проток воде у реци смањен, а интензитет соларног зрачења слабији. При томе, минимална, максимална и средња електрична и топлотна излазна снага *CHP* дизел генератора редом износе: 3.60 kW, 12 kW, 5.54 kW и 1.64 kW у Случају 1; 3.60 kW, 12 kW, 5.61 kW и 1.9 kW у Случају 2; 3.60 kW, 10.2 kW, 4.56 kW и 1.75 kW у Случају 3.



(а)



(б)

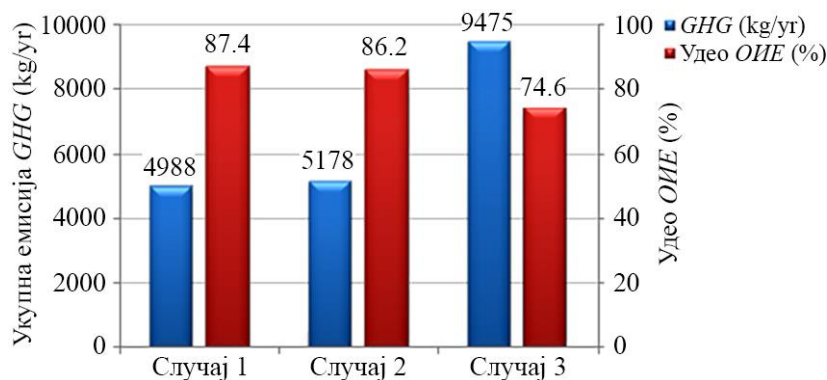


(в)

Слика 7.4 Излазна снага *CHP* дизел генератора за:
Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в)

Како су у свим разматраним оптималним конфигурацијама присутни *CHP* дизел генератор и бојлер, који за погон користе биогаз из дрвне биомасе и дизел гориво, неизбежна је емисија *GHG*. Најзаступљеније честице у емисији *GHG* су CO_2 , CO и SO_2 , док HNC , атмосферских честица и NO има најмање. На Слици 7.5 дат је графички приказ укупне емисије наведених загађивача, као и удео обновљивих извора у укупној производњи енергије за три разматрана случаја.

Конкретно, Табела 6.2 и Слика 7.5 показују да је емисија *GHG* у Случају 1 за 190 kg/yr нижа него у Случају 2 и за 4487 kg/yr нижа него у Случају 3. Ова разлика у емисији *GHG* се приписује потрошњи дизел горива у *CHP* дизел генератору и бојлеру. Са већом потрошњом дрвног биогаса у *CHP* дизел генератору има се мања потрошња дизел горива у бојлеру. Конкретно, у Случају 1 потрошња дизел горива је смањена за 3.7% у односу на Случај 2 и 47.5% у односу на Случај 3 где се као погонско гориво користе дизел и водоник. Такође, са Сlike 7.5 може се видети да се са повећањем удела *OIE* смањује емисија *GHG*, и обратно. Исто тако, највећи удео *OIE* има конфигурација система из Случаја 1 где тај удео износи 87.4%, што је за 1.2% више него у Случају 2 и 12.8% више него у Случају 3.



Слика 7.5 Укупна емисија *GHG* и удео *OIE* за три разматрана случаја

7.3 Резултати анализе осетљивости

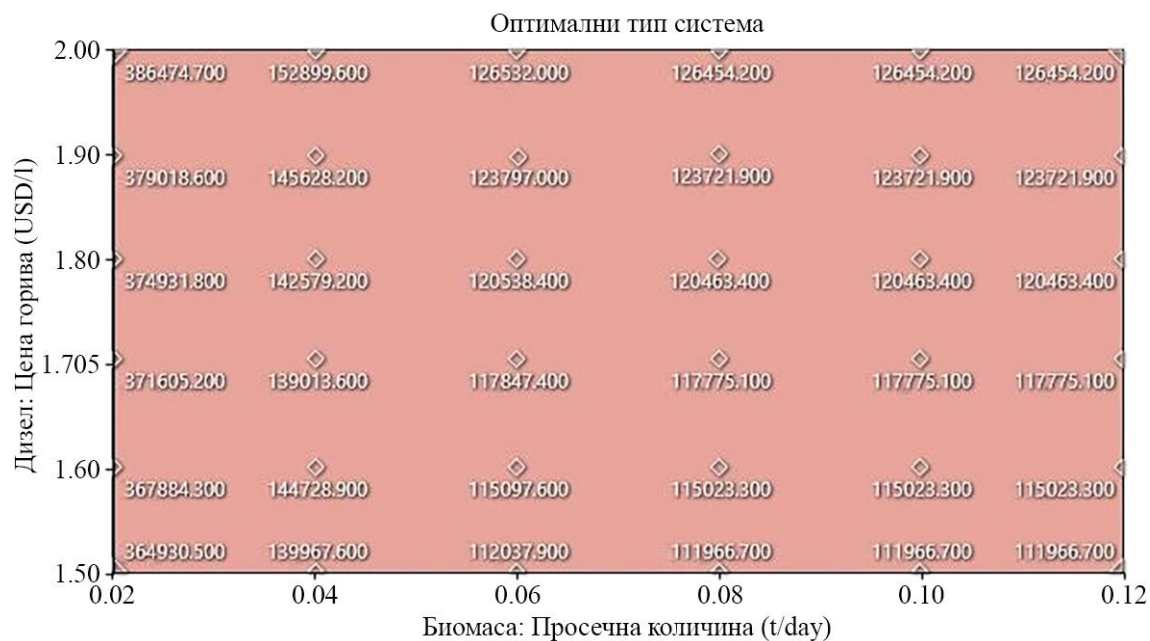
С обзиром да се последњих година због турбуленција у сфери геополитике и климатских промена цене горива често мењају и да долази до екстремних промена временских прилика на дневној бази, великих осцилација температуре, јаких киша, поплава, појаве клизишта и слично [21], у овој тачки је спроведена анализа осетљивости како би се квантификовао утицај свих улазних променљивих на излазне перформансе оптималне конфигурације система за Случај 1 из Табеле 7.1. Анализирана је осетљивост укупних *NPC*–трошкова на цену дизел горива, цену и количину дрвне биомасе, соларну ирадијацију и проток воде у реци, као и на промену номиналне дисконтне стопе и очекиване стопе инфлације. Будући да

су у дисертацији разматрана два сценарија хибридног система са различитим потрошачима енергије, спроведена је анализа утицаја различитих вредности потршње електричне и топлотне енергије на укупне *NPC*-трошкове. У Табели 7.2 приказан је опсег улазних променљивих коришћених у анализи осетљивости.

Табела 7.2 Опсег улазних променљивих коришћених у анализи осетљивости за оптималну конфигурацију хибридног система из Случаја 1

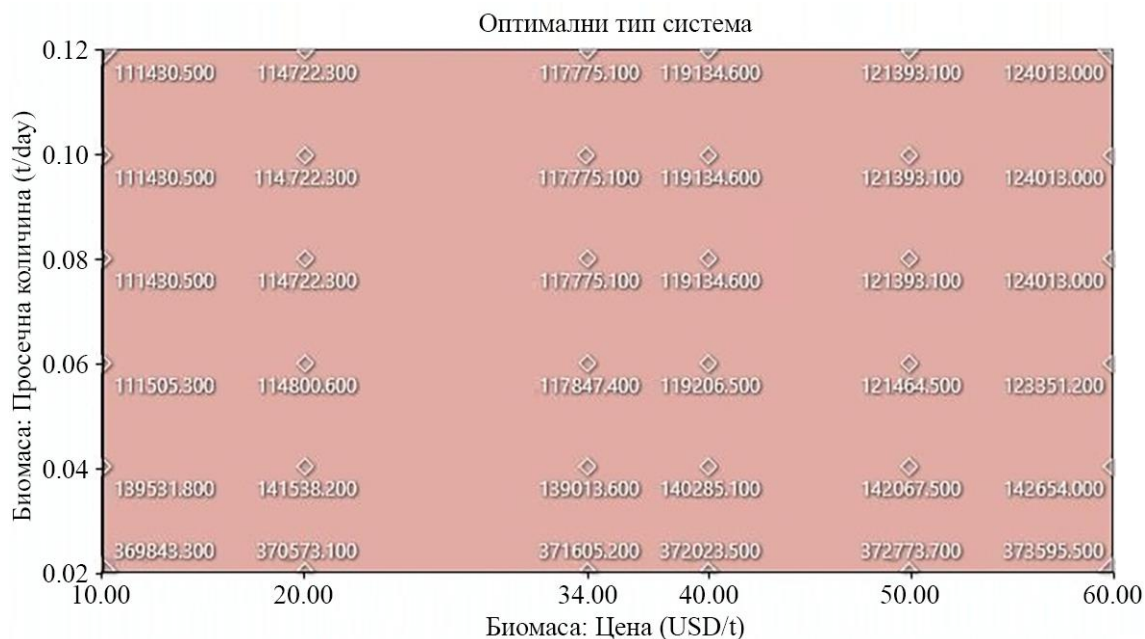
| Променљива осетљивости | Јединица | Опсег (мин.–макс.) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Цена дизел горива | USD/l | 1.5–2 |
| Цена дрвне биомасе | USD/t | 10–60 |
| Просечна количина дрвне биомасе | t/day | 0.02–0.12 |
| Просечна годишња соларна ирадијација | kWh/m ² /day | 1.5–5 |
| Просечни годишњи проток воде | l/s | 150–550 |
| Номинална дисконтна стопа | % | 5–11 |
| Очекивана стопа инфлације | % | 0.05–4 |
| Просечно електрично оптерећење | kWh/day | 100–300 |
| Просечно топлотно оптерећење | kWh/day | 50–200 |

Са Сликe 7.6 може се видети да количина дрвне биомасе (отпадно дрво) и цена дизел горива имају значајан утицај на укупне *NPC*-трошкове. Најнижи трошак (111966.7 USD) остварује се при количини дрвне биомасе од 0.08 t/day и цени дизел горива од 1.50 USD/l. Укупни *NPC*-трошкови се повећавају на 117775.1 USD при цени дизел горива од 1.705 USD/l и истој количини дрвне биомасе. Са повећањем количине дрвне биомасе изнад 0.08 t/day укупни *NPC*-трошкови остају константни, док се са смањењем количине дрвне биомасе они повећавају. Конкретно, када се количина дрвне биомасе смањи са 0.08 t/day на 0.06 t/day, укупни *NPC*-трошкови расту на 117847.4 USD при цени дизел горива од 1.705 USD/l. Када се цена дизел горива повећа ови системски трошкови постају још већи, па се највећи трошкови у систему (386474.7 USD) јављају при максималној вредности цене дизел горива од 2 USD/l и минималној вредности количине дрвне биомасе од 0.02 t/day.



Слика 7.6 Утицај просечне количине дрвне биомасе (отпадно дрво) и цене дизел горива на укупне *NPC*-трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1

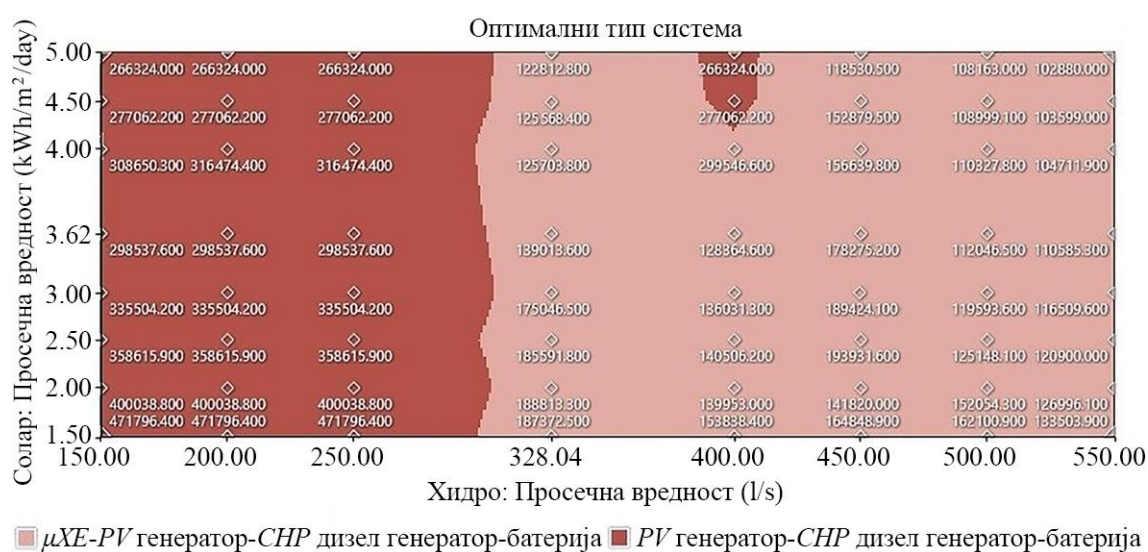
Слика 7.7 приказује утицаје количине и цене дрвне биомасе (отпадно дрво) на укупне *NPC*-трошкове (при константној цени дизел горива од 1.705 USD/l). Са Сликe 7.7 јасно се може видети да ове улазне променљиве различито утичу на трошкове система. Укупни *NPC*-трошкови расту са 369843.3 USD на 371605.2 USD када цена дрвне биомасе порасте са 10 USD/t на 34 USD/t при количини дрвне биомасе од 0.02 t/day. Са овом количином дрвне биомасе и ценом од 60 USD/t трошкови система постају максимални и износе 373595.5 USD. Трошкови се смањују када количина дрвне биомасе расте при истој цени, као што је то приказано на Слици 7.7. Трошкови система се смањују до вредности количине дрвне биомасе од 0.08 t/day када су минимални и износе 111430.5 USD, да би са даљим повећањем количине дрвне биомасе од 0.08 t/day до 0.12 t/day трошкови система остали константни.



Слика 7.7 Утицаји цене и просечне количине дрвне биомасе (отпадно дрво) на укупне *NPC*–трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1

Слика 7.8 приказује резултате анализе осетљивости оптималне конфигурације система из Случаја 1 на соларно зрачење и проток воде у реци. Унутар опсега ове две променљиве осетљивости разматрана су следећа два оптимална система: *PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија и μ *XE-PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија. Први систем је оптималан у опсегу соларне ирадијације од 1.5 до 5 kWh/m²/day и протоку воде у реци од 150 до 300 l/s, при чему се укупни *NPC*–трошкови смањују са повећањем соларне ирадијације, и не зависе од протока воде. Са повећањем средњег протока воде прелази се са система *PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија на систем μ *XE-PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија. За средњи проток воде од 400 l/s и соларну ирадијацију од 3.62 kWh/m²/day укупни трошкови система μ *XE-PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија износе 128364.6 USD и они су за 7.7% нижи у односу на укупне трошкове добијене за разматрани оптимални систем из Случаја 1, односно за 57.0% су нижи у односу на систем *PV* генератор-*CHP* дизел генератор-батерија. Ова разлика у цени се објашњава на следећи начин: због постојеће μ *XE* на датој локацији, са већим бројем кишних месеци током године расте и проток воде у реци, па систем повећава производњу из μ *XE* и нису

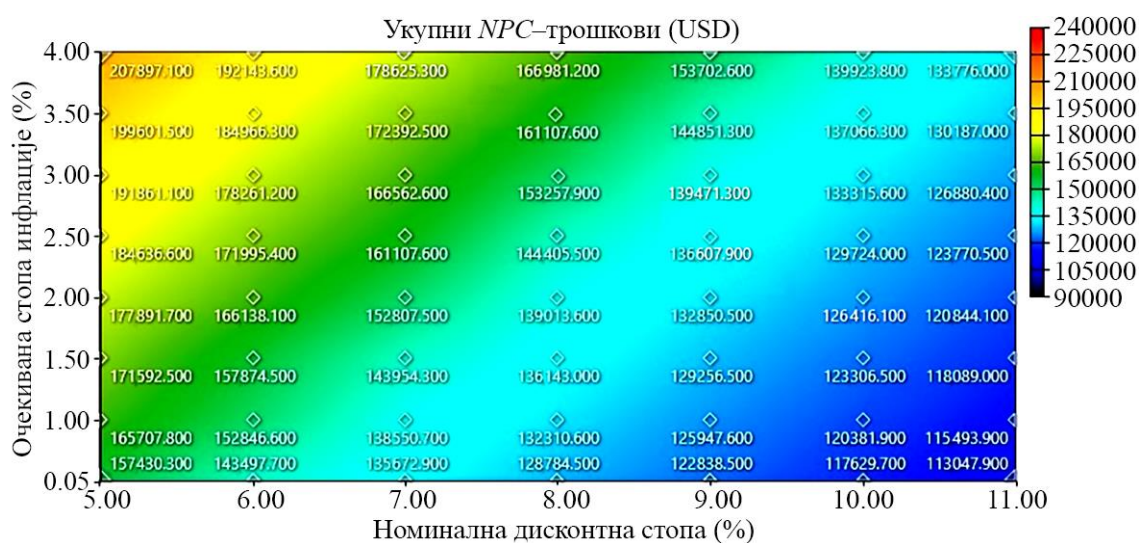
потребна никаква додатна улагања, осим трошкова *П&О*. Са друге стране, ако се има већи број сунчаних дана у току године, а самим тим и јача соларна ирадијација, потребно је додати још *PV* модула и батерија, а то све доводи до нових инвестиционих улагања и поскупљења хибридног система. При томе, минимални трошкови система се имају при највишим, а максимални трошкови при најнижим вредностима разматраних променљивих осетљивости.



Слика 7.8 Утицаји просечне соларне ирадијансе и протока воде у реци на укупне *NPV*–трошкове за оптималну конфигурацију система из Случаја 1

Са Сlike 7.9 јасно се може видети да варијације номиналне дисконтне стопе и очекиване стопе инфлације имају значајан утицај на економске перформансе хибридног система. Укупни *NPV*–трошкови су директно пропорционални очекиваној стопи инфлације и са сваком њеним порастом долази до њиховог повећања. Конкретно, ако се очекивана стопа инфлације повећа са 2% на 4% (уз константну номиналну дисконтну стопу од 8%) укупни *NPV*–трошкови постају виши за 27967.6 USD, или ако се очекивана стопа инфлације смањи са 2% на 0.05% укупни *NPV*–трошкови постају нижи за 10229.1 USD у односу на оптималну конфигурацију система за Случај 1. Очигледно је да су укупни *NPV*–трошкови више осетљиви на пораст очекиване стопе инфлације него на њено смањење. С друге стране, укупни *NPV*–трошкови су обрнуто пропорционални номиналној дисконтној стопи и са сваким њеним повећањем долази до њиховог

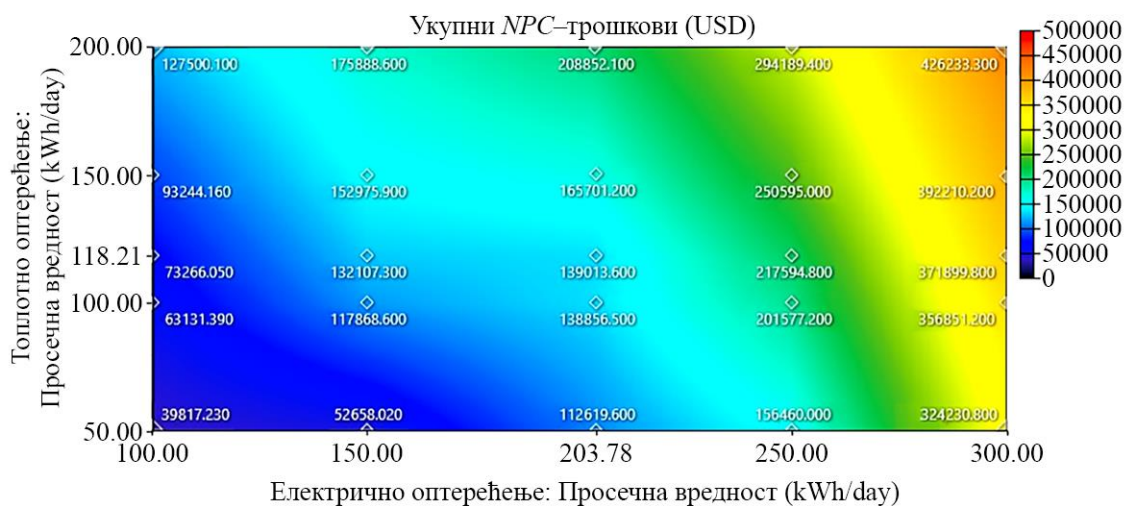
смањења. Заправо, ако се номинална дисконтна стопа повећа са 8% на 11% (уз непроменљиву очекивану стопу инфлације од 2%) укупни *NPC*-трошкови постају нижи за 18169.5 USD, или ако се номинална дисконтна стопа смањи са 8% на 5% укупни *NPC*-трошкови постају виши за 38878.1 USD у односу на оптималну конфигурацију система за Случај 1. Такође, може се запазити да су укупни *NPC*-трошкови више осетљиви на смањење номиналне дисконтне стопе него на њено повећање.



Слика 7.9 Утицаји номиналне дисконтне стопе и очекиване стопе инфлације на укупне *NPC*-трошкове за оптималну конфигурацију система из Случаја 1

На Слици 7.10 представљени су утицаји просечног електричног и тоplotног оптерећења на укупне *NPC*-трошкове. Са ове слике може се видети да су трошкови система директно пропорционални промени просечног електричног и тоplotног оптерећења и да се са њиховим порастом повећавају и укупни *NPC*-трошкови, и обратно. Праћењем промене електричног оптерећења од 100 до 203.78 kWh/day (уз константно тоplotно оптерећење од 118.21 kWh/day), може се видети да су на графикону упадљиве плава и светло плава боја и да се укупни *NPC*-трошкови благо повећавају, да би са даљим порастом електричног оптерећења од 203.78 до 400 kWh/day дошло до наглог повећања укупних *NPC*-трошкова (од светло плаве, преко зелене, жуте па до наранџасте боје). Са друге стране, укупни *NPC*-трошкови расту скоро линеарно са променом тоplotног

оптерећења (уз константно електрично оптерећење од 203.78 kWh/day). Такође, са датог графика може се видети да су укупни *NPC*-трошкови више осетљиви на промену електричног оптерећења него на промену топлотног оптерећења, јер нпр. при промени топлотног оптерећења са 118.21 на 100 kWh/day разлика у укупним *NPC*-трошковима износи 157.1 USD, док при промени електричног оптерећења са 203.78 на 100 kWh/day разлика у укупним *NPC*-трошковима износи 65747.5 USD.



Слика 7.10 Утицаји просечног електричног и топлотног оптерећења на укупне *NPC*-трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1

На основу свеобухватне анализе осетљивости, утврђено је да се оптимални дизајн система има за просечно електрично оптерећење од 100 kWh/day и просечном топлотном оптерећењу од 50 kWh/day, при соларној ирадијанси од 5 kWh/m²/day и протоку воде у реци од 550 l/s, са номиналном дисконтном стопом, очекиваном стопом инфлације, ценом дизел горива, ценом и количином дрвне биомасе из отпадног дрвета од 11%, 0.05%, 1.5 USD/l, 10 USD/t и 0.08 t/day, редом. Резултати генерално показују да су варијације излазних параметара, као што су укупни *NPC*-трошкови, изложени директном утицају економских и сезонских променљивих осетљивости.

8. ЗАКЉУЧАК И ПРАВЦИ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Техно-економска анализа која је спроведена у овој докторској дисертацији имала је за циљ пројектовање ванмрежног хибридног енергетског система за напајање пастрмског рибњака Јабланица и проналажење оптималне конфигурације система са аспекта минимизације укупних *NPC*-трошкова, нивелисаних *COE*-трошкова и емисије *GHG*, као и максимизације укупне производње електричне и топлотне енергије. Анализа је извршена у софтверу *HOMER Pro* за два сценарија функционисања рибњака: (Сценарио I) када потрошња електричне енергије износи 24.79 kWh/day – постојећи систем, и (Сценарио II) када потрошње електричне и топлотне енергије износе 203.78 kWh/day и 118.21 kWh/day, редом – предложени систем.

За Сценарио I, може се, на основу добијених резултата, закључити да би удаљени пастрмски рибњак Јабланица, који се налази у источној Србији, могао самостално и ефикасно да се напаја из разматраног хибридног система μ ХЕ-РV генератор-дизел генератор-претварач-батерија коришћењем хидроенергије из прелива таложника. У том случају, перформансе прелива таложника могу да се користе за оптимизацију дизајна хидротурбине, а самим тим и читавог ванмрежног хибридног електроенергетског система. Оптимизација и техно-економска анализа разматраног хибридног електроенергетског система μ ХЕ-РV генератор-дизел генератор-претварач-батерија обављени су успешно коришћењем софтвера *HOMER Pro* за два различита типа хидротурбине и три различита случаја погона.

Први тип хидротурбине (са фиксним лопатицама пропелера и фиксним водећим лопатицама) пројектован је за проток од 265 l/s кроз таложни базен (Случај 1), док је други тип хидротурбине (са фиксним лопатицама пропелера и подесивим водећим лопатицама) пројектован за проток од 350 l/s кроз исти таложни базен (Случајеви 2 и 3). У Случају 2, узето је у обзир да хидротурбина може да ради са ниском ефикасношћу у летњим месецима и сушним годинама, и то: са протоком који је 20% мањи од годишњег просечног протока кроз таложни базен. У Случају 3, узето је у обзир да рад хидротурбине може бити ефикаснији у

зимским месецима. Такође, у Случајевима 2 и 3, претпостављено је да су водеће лопатице подесиве тако да хидротурбина може да ради током целе године без обзира на проток кроз таложни базен.

Конкретно, у овој дисертацији упоређена су три оптимална решења добијена за две различите конфигурације разматраног хибридног електроенергетског система $\mu\text{XE-PV}$ генератор-дизел генератор-претварач-батерија, од којих је свако одабрано аутоматски из скупа од 70028 резултата симулације у софтверу *HOMER Pro*. Резултати симулације су показали да оптимална конфигурација ванмрежног хибридног електроенергетског система у Случају 3 треба да се састоји од 8.5 kW μXE , 8.25 kW *PV* генератора, 12 kW дизел генератора, 4 kW претварача и 18 батерија. У вези с тим, такође је показано да разматрана модификација перформанси хидротурбине може позитивно утицати на перформансе целог ванмрежног хибридног електроенергетског система. Конкретно, ова модификација може повећати излазну снагу μXE са 6.4 kW на 8.5 kW, као и укупну годишњу производњу електричне енергије читавог система са 37564 kWh/yr у Случају 1, на 44777 kWh/yr у Случају 2, или 50090 kWh/yr у Случају 3, што је повећање од 19.2% (Случај 2) или 33.3% (Случај 3) у поређењу са Случајем 1.

Поред тога, модификација може смањити укупне *NPC*-трошкове целог система са 40383 USD у Случају 1 на 36643 USD у Случају 2 или 33683 USD у Случају 3, што чини смањење од 9.3% (Случај 2) или 16.6% (Случај 3) у поређењу са Случајем 1. Ово такође може смањити нивелисане *COE*-трошкове са 0.346 USD/kWh у Случају 1 на 0.313 USD/kWh у Случају 2 или 0.288 USD/kWh у Случају 3, што чини смањење од 9.5% (Случај 2) или 16.8% (Случај 3) у поређењу са Случајем 1. Осим тога, иста модификација може смањити емисију *GHG* из читавог система са 860.25 kg/yr у Случају 1 на 847.06 kg/yr у Случају 2 или 747.65 kg/yr у Случају 3, што чини смањење од 1.5% (Случај 2) или 13.1% (Случај 3) у поређењу са Случајем 1. Слично томе, у поређењу са Случајем 1, смањења броја и снаге *PV* генератора, претварача и батерија добијена у Случају 2 и Случају 3 јесу резултати исте модификације перформанси хидротурбине. Анализом добијених резултата и података прикупљених из других релевантних студија дошло се до закључка да је припадајућа μXE обично имала највећи допринос у укупној

годишњој производњи електричне енергије из датог хибридног система $\mu\text{ХЕ-}\text{PV}$ генератор-дизел генератор-претварач-батерија.

По Сценарију II, предвиђено је да се поред пастрмке узгаја и шаран, па је предложена интеграција постојећег система у аутономни хибридни систем који користи воду из прелива таложника, соларну енергију, дизел гориво, комбиновану топлоту и енергију, батерије, TLC -регулатор, претварач и бојлер. Резултати ове анализе могу се сумирати на следећи начин:

- Од 12 могућих комбинација, хибридни систем који се састоји од 8.5 kW $\mu\text{ХЕ}$, 40.4 kW PV генератора, 12 kW CHP дизел генератора, 109 батерија, 12.8 kW претварача и 39 kW TLC -регулатора представља оптималну конфигурацију за напајање електричном и топлотном енергијом разматране локације.
- Предложени хибридни систем има најмање укупне NPC -трошкове од 284421 USD и нивелисане COE -трошкове од 0.178 USD/kWh од свих могућих комбинација.
- Предложени хибридни систем може смањити укупне NPC -трошкове, нивелисане COE -трошкове и емисију GHG за 49.5%, 62.0% и 65.4%, редом, а повећати производњу електричне и топлотне енергије, као и удео ОИЕ за 31.1%, 5.0% и 51.2%, редом, у поређењу са хибричним системом CHP дизел генератор-батерија-претварач-бојлер.
- Укључивањем TLC -регулатора у хибридни систем постиже се смањење укупних NPC -трошкова, нивелисаних COE -трошкова и емисије GHG за 6.8%, 10.5% и 13.0%, редом. Такође, ово утиче и на побољшање удела ОИЕ за 8.2%.
- Детаљна анализа кумулативног новчаног тока показала је да је дизајнирани хибридни систем изводљив јер се уложени новац може повратити након само 1.8 година.

Анализом добијених резултата дошло се до закључка да утрошена количина дизел горива и његова цена представљају главне факторе који су довели до високих укупних трошкова хибридног система и емисије GHG . Конкретно, код оптималног хибридног система само трошкови горива су чинили 62.5% укупних трошкова система. Један од начина за смањење укупних NPC -трошкова и емисије

GHG, поред интеграције *OIE*, јесте да се дизел гориво у *CHP* дизел генератору замени са горивом добијеним из биомасе и водоником. То представља оригиналну идеју која је такође разматрана у овој дисертацији.

Следећи део анализе показао је да хибридни систем μXE -*PV* генератор-*CHP* дизел генератор на бази дрвета представља идеално решење за напајање рибњака Јабланица по основу укупних *NPC*-трошкова, нивелисаних *COE*-трошкова, укупне производње електричне и топлотне енергије и емисије *GHG*. Анализа овог хибридног система је спроведена за случајеве комбинације μXE и *PV* генератора са *CHP* дизел генератором који за погон користи: биогаз произведен пиролизом отпадног дрвета (Случај 1); биогаз произведен пиролизом комерцијалног буковог дрвета (Случај 2); и водоник (Случај 3). Кључни налази ове анализе су следећи:

- Оптимална конфигурација система одговара Случају 1 и она се састоји од 8.5 kW μXE , 38.3 kW *PV* генератора, 12 kW *CHP* дизел генератора на биогаз из отпадног дрвета, 33 батерије, 13.1 kW претварача, 207 kW *TLC*-регулатора и једног бојлера. Дата конфигурација има најмање укупне *NPC*-трошкове (139014 USD) и они су нижи за 4.3% од укупних *NPC*-трошкова из Случаја 2 и за 70.4% од укупних *NPC*-трошкова из Случаја 3.
- Нивелисани *COE*-трошкови су најнижи у Случају 1 (0.0263 USD/kWh) и они су нижи за 19.8% од оних из Случаја 2 и за 92.9% од оних из Случаја 3.
- Произведене количине електричне (120706 kWh) и топлотне енергије (71067 kWh) у Случају 1 биле су значајно велике, али за 6% и 7.7% веће него у Случају 2, као и за 54.3% и 63.3% мање него у Случају 3, редом.
- Утврђено је да се коришћењем мешавине горива са дрвним биогазом повећава број часова погона *CHP* дизел генератора који у Случају 1 износи 5735 h/уг, што је за 92 h/уг више него у Случају 2 и 5288 h/уг више него у Случају 3. Самим тим је емисија *GHG* из хибридног система мања и у Случају 1 износи 4988 kg/уг, а то је за 190 kg/уг мање него у Случају 2 и за 4487 kg/уг мање него у Случају 3.

- На основу спроведене анализе осетљивости, закључено је да конфигурација хибридног система из Случаја 1 остаје непромењена у широким опсезима промене соларне ирадијације (од 1.5 до 5 kWh/m²/day) и протока воде у реци (од 300 до 550 l/s), а да се са порастом цене дизел горива, цене дрвне биомасе, очекиване стопе инфлације, просечног електричног и топлотног оптерећења пропорционално повећавају и укупни *NPC*-трошкови, док се са повећањем количине дрвне биомасе и номиналне дисконтне стопе укупни *NPC*-трошкови смањују обрнуто пропорционално.

Предложена конфигурација хибридног система је погодна за будуће примене у ширем подручју разматране локације, јер је она богата шумама које се могу користити за производњу дрвног чипса, а затим и биогаса. У овој дисертацији, пре свега је демонстриран значај коришћења биогаса произведеног из отпадног дрвета (као што су дрвни исечци, грање, лишће, кора, пањеви и пиљевина) за напајање хибридних електроенергетских система. Уместо да та дрвна биомаса пропада и трули у шуми, иста се може искористити за производњу биогаса и помешати са дизел горивом или водоником у *CHP* дизел генераторима чиме се значајно побољшавају економски, енергетски и еколошки параметри система. Једина лоша страна једног таквог хибридног система јесте и даље релативно висока емисија *GHG*.

Анализом и применом новог модела хибридног система за напајање локације удаљене од електродистрибутивне мреже, остварени су следећи доприноси у докторској дисертацији:

- Предложено је иновативно решење новог хибридног система минималног капацитета компоненти за опслуживање електричног и топлотног профила оптерећења пастрмског рибњака Јабланица.
- Развијен је модел самосталног хибридног система који спроводи часовну симулацију рада свих компоненти хибридног система постигнуто комбинованом употребом два рачунарска алата.

- Развијена је стратегија за управљање и контролу процеса размене електричне и топлотне енергије између различитих извора енергије у хибридном систему минималног капацитета компоненти.
- Демонстриран је значај коришћења *ОИЕ* у ванмрежни хибридни систем, јер се имплементацијом μXE и *PV* генератора у хибридни систем побољшавају енергетске, економске и еколошке карактеристике а уложени новац се може повратити за много краћи временски период у поређењу са хибридном системом заснованог само на *СНР* дизел генератору.
- Показано је да хибридна енергетска технологија примењена на одређену компоненту може побољшати перформансе не само те компоненте већ утицати на перформансе целог хибридног система у погледу укупних *NPC*–трошкова, нивелисаних *COE*–трошкова, емисије *GHG*, као и укупне годишње производње електричне и топлотне енергије.
- Утврђено је да *TLC*–регулатор као компонента у хибридном систему може допринети смањењу вишка произведене електричне енергије из *ОИЕ* и искористити за производњу топлотне енергије чиме се смањују нивелисани *COE*–трошкови.
- Спроведена је упоредна анализа утицаја коришћења различитих врста горива у *СНР* дизел генератору на емисију *GHG*.
- Извршена је анализа осетљивости укупних *NPC*–трошкова на улазне променљиве.
- Побољшан је постојећи рачунарски алат за моделирање, димензионисање и симулацију рада компоненти у ванмрежном хибридном енергетском систему за производњу електричне и топлотне енергије.

Ова дисертација је предложила опште примењив принцип за даље повећање доприноса било које компоненте у укупној годишњој производњи електричне и топлотне енергије из неког хибридног електроенергетског система. Коначно, рибуњаци и газдинства различитих врста, који ће се градити дуж чистих

планинских река и предела, увек ће бити добра места за примену предложеног принципа и добијеног оптималног решења.

Будућа истраживања би могла бити усмерена у следећа два правца за овде разматране сценарије:

- Сценарио I: Замена металне цеви у $\mu ХЕ$ са неком другом врстом цеви, као што је цев од: бетона (глатка и нова), челичног лима, армираног бетона, ливеног гвожђа или челика, поливинил хлорида или полиетилена, као и њено постављање под одређеним углом како би се максимално искористио капацитет воде и смањили губици услед трења. Тако би се додатно повећала производња електричне енергије из $\mu ХЕ$, као и њен утицај на цео хибридни систем.
- Сценарио II: Замена биогаса из отпадног дрвета у *СНР* дизел генератору са биогасом добијеним из неке друге врсте дрвета, пољопривредне биомасе или биомасе из животињског отпада, као и замена дизел горива у бојлеру са природним гасом, биодизелом, пропаном, метанолом или етанолом. На тај начин би се повећале ефикасности *СНР* дизел генератора и бојлера, као и утицај тог повећања на цео хибридни систем, првенствено са аспекта минимизације емисије *GHG*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Kabir, U. E. Habiba, W. Khan, A. Shah, S. Rahim, P. R. D. los Rios-Escalante, Z. U. R. Farooqi, L. Ali, M. Shafiq, Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review, *Journal of King Saud University - Science*, 2023, vol. 35, no. 5, 102693. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102693.
- [2] M. Filonchuk, M. P. Peterson, L. Zhang, V. Hurynovich, Y. He, Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O, *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 935, 173359. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173359.
- [3] Правно информациони систем, Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2040. године са пројекцијама до 2050. године, *Службени гласник РС*, 28. Новембар 2024, бр. 94/2024. <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/strategija/2024/94/1> (1. Август 2025.)
- [4] J. L. Holecek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, R. Valdez, A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050?, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 8, 4792. DOI: 10.3390/su14084792.
- [5] European Council, The EU and the Paris Agreement, 16. Oktober 2023. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/#EU> (15. Фебруар 2024.)
- [6] Министарство заштите животне средине Републике Србије, Стратегија нискоугљеничног развоја Републике Србије за период од 2023. до 2030. године са пројекцијама до 2050. године, *Службени гласник РС*, 7. Јун 2023, бр. 46/2023. <https://www.paragraf.rs/glasila/rs/sluzbeni-glasnik-republike-srbije-46-2023.html> (15. Фебруар 2024.)
- [7] Министарство рударства и енергетике Републике Србије, Мере подстицаја за повлашћене произвођаче електричне енергије – Фид-ин тарифа, *Службени гласник РС*, 1. Март 2014, бр. 24/14. <https://arhiva.mre.gov.rs/latinica/faq-energetska-efikasnost-obnovljivi-izvori.php> (15. Фебруар 2024.)
- [8] Balkan Green Energy News, Nacrt vodonične strategije: Srbija bi do 2025. trebalo da započne proizvodnju zelenog vodonika, 09. Jun 2022.

<https://balkangreenenergynews.com/rs/nacrt-vodonичne-strategije-srbija-bi-do-2025-trebalo-da-zapocne-proizvodnju-zelenog-vodonika/> (1. Август 2025.)

- [9] J. J. H. Williams, A. DeBenedictis, R. Ghanadan, A. Mahone, J. Moore, W. R. Morrow III, S. Price, M. S. Torn, The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: The pivotal role of electricity, *Science*, 2012, vol. 335, no. 6064, pp. 53–59. DOI: 10.1126/science.1208365.
- [10] R. Ramakumar, J. J. Bzura, J. Eyer, J. Gutierrez-Vera, T. E. Hoff, C. Herig, J. Iannucci, M. R. Milligan, Renewable technologies and distribution systems, *IEEE Power Engineering Review*, 1999, vol. 19, no. 11, pp. 5. DOI: 10.1109/MPER.1999.799631.
- [11] J. W. Kimball, B. T. Kuhn, R. S. Balog, A system design approach for unattended solar energy harvesting supply, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 952–962. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2009056.
- [12] M. R. Borges Neto, P. C. M. Carvalho, J. O. B. Carioca, F. J. F. Canafistula, Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas, *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 8, pp. 4497–4506. DOI:10.1016/j.enpol.2010.04.004.
- [13] F. Valenciaga, P. F. Puleston, Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 398–405. DOI: 10.1109/TEC.2005.845524.
- [14] S. A. Daniel, N. Ammasai Gounden, A novel hybrid isolated generating system based on PV fed inverter-assisted wind driven induction generators, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 416–422. DOI: 10.1109/TEC.2004.827031.
- [15] Факултет техничких наука Косовска Митровица, Технички извештај изведеног стања мале хидроелектране у оквиру пројекта под називом: Пастрмски рибњак „Јабланица“ Бољевац, *MRI - TECH d.o.o.*, Београд, 2015.
- [16] М. Јевтић, М. Томовић, М. Мишић, Р. Марковић, Енергетско-економска оправданост примене дрвне биомасе у хибридним системима напајања електричном енергијом, *17 Међународни научно-стручни симпозијум ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА*, Јахорина, 21-23 март, 2018, pp. 150–155.

- [17] M. Tomović, M. Jevtić, D. Klimenta, J. Radosavljević, Optimal design and techno-economic analysis of wood-based biogas/hydro/solar hybrid system for a remote pond, *The 4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy – CEEGE 2021*, Munich, Germany, June 10-13, 2021.
- [18] M. Tomović, M. Jevtić, An economic and environmental analysis of hybrid system for trout pond supply, *International Scientific Conference UNITECH*, Gabrovo, November 20-21, 2015, vol. 1, pp. 72–77.
- [19] М. Томовић, М. Јевтић, Одређивање оптималне конфигурације хибридног система са коришћењем биомасе, *Енергија Економија Екологија*, 22-25 март, 2016, вол. 18, бр. 3–4, пп. 120–127.
- [20] М. Томовић, М. Јевтић, Г. Миловановић, Оптимизација хибридног система за напајање рибњака, *Енергија Економија Екологија*, 25-28 март, 2014, вол. 16, бр. 1-2, пп. 170–177.
- [21] М. Томовић, М. Јевтић, Утицај климатских промена на оптимизацију хибридног система, *Трећа међународна конференција о обновљивим изворима електричне енергије, МКОИЕЕ'15*, Београд, 15-16 октобар, 2015, пп. 143–149. ИСБН 978-86-81505-78-6.
- [22] M. Jevtić, M. Tomović, D. Klimenta, Đ. Novković, Energy-economic analysis of hybrid system for remote pond supply, *III International Scientific and Technical Conference „Computer Modeling and Simulation (COMOD – 2014)“*, Saint Petersburg, July 2-4, 2014, pp. 118–122. ISBN 978-5-7422-4494-3.
- [23] Đ. Novković, N. Maričić, M. Jevtić, Z. Glavčić, Improving small bulb turbine performances using CFD, *Energija Ekonomija Ekologija*, 2013, no. 3–4, pp. 309–316.
- [24] M. Tomović, M. Gajić, D. Klimenta, M. Jevtić, Optimal design of a hybrid power system for a remote fishpond based on hydro-turbine performance parameters, *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 20, 4254. DOI: 10.3390/electronics12204254.
- [25] R. Ullah, T. A. Cheema, Experimental investigation of runner design parameters on the performance of vortex turbine, *Engineering Proceedings*, 2022, vol. 23, no. 14. DOI: 10.3390/engproc2022023014.
- [26] L. Duan, D. Wang, G. Wang, C. Han, W. Zhang, X. Liu, C. Wang, Z. Che, C. Chen, Piecewise causality study between power load and vibration in hydro-

- turbine generator unit for a low-carbon era, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 3, 1207. DOI: 10.3390/en15031207.
- [27] M. V. Kumar, T. S. Reddy, P. Sarala, P. S. Varma, O. C. Sekhar, A. Babqi, Y. Alharbi, B. Alamri, C. R. Reddy, Experimental investigation and performance characteristics of Francis turbine with different guide vane openings in hydro distributed generation power plants, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, 6798. DOI: 10.3390/en15186798.
- [28] K.-T. Wu, K.-H. Lo, R.-C. Kao, S.-J. Hwang, Numerical and experimental investigation of the effect of design parameters on Savonius-type hydrokinetic turbine performance, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 5, 1856. DOI: 10.3390/en15051856.
- [29] A. Kumar, R. P. Saini, Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades, *Renewable Energy*, 2017, vol. 108, pp. 502–522, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.03.006.
- [30] M. Tomović, D. Klimenta, M. Jevtić, Z. Bogićević, U. Jakšić, The effect of PV generation capacity on GHG emissions from hybrid systems for powering a fishpond remote from the distribution network, *11th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN)*, Niš, Serbia, 03-06 June, 2024, pp. 1–6, DOI: 10.1109/IcETRAN62308.2024.10645168.
- [31] M. V. Tomovic, D. O. Klimenta, M. J. Milovanovic, B. D. Perovic, N. L. Hinov, Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid system to supply a remote fishpond with electricity and heat, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 44–55. DOI: 10.5755/j02.eie.36123.
- [32] M. Jahangiri, F. K. Shahmarvandi, R. Alayi, Renewable energy-based systems for residential scale in southern coastal areas of Iran: Trigeneration of heat, power and hydrogen, *Journal of Renewable Energy and Environment*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 67-76. DOI:10.30501/jree.2021.261980.1170.
- [33] M. Mahalakshmi, S. Latha, An economic and environmental analysis of biomass-solar hybrid system for the textile industry in India, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2015, vol. 23, pp. 1735–1747. DOI: 10.3906/elk-1404–228.

- [34] S. Goel, R. Sharma, Optimal sizing of a biomass-biogas hybrid system for sustainable power supply to a commercial agricultural farm in northern Odisha, India, *Environment Development and Sustainability*, 2019, vol. 21, pp. 2297–2319. DOI: 10.1007/s10668-018-0135-x.
- [35] P. Anand, S. K. Bath, M. Rizwan, Feasibility analysis of solar-biomass based standalone hybrid system for remote area, *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, vol. 5, no. 6, pp. 99–108. DOI: 10.11648/j.epes.20160506.16.
- [36] M. K. Shahzad, A. Zahid, T. ur Rashid, M. A. Rehan, M. Ali, M. Ahmed, Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software, *Renewable Energy*, 2017, vol. 106, pp. 264–273. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.033.
- [37] J. Ahmad, M. Imran, A. Khalid, W. Iqbal, S. R. Ashraf, M. Adnan, S. F. Ali, K. S. Khokhar, Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar, *Energy*, 2018, vol. 148, pp. 208–234. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.133.
- [38] M. S. Islam, R. Akhter, M. A. Rahman, A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?, *Energy*, 2018, vol. 145, pp. 338–355. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.125.
- [39] Md. S. Hossain, Md. F. Rahman, Hybrid solar PV/biomass powered energy efficient remote cellular base stations, *International Journal of Renewable Energy*, 2020, vol. 10, no. 1, March.
- [40] M. Mahalakshmi, S. Latha, Simulation and optimization of biomass based hybrid generation system for rural electrification, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015, vol. 326, pp. 407–416. DOI: 10.1007/978-81-322-2119-7_41.
- [41] A. Bhatt, M. P. Sharma, R. P. Saini, Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 61, pp. 53–69. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.030.

- [42] M. M. Tehrani, M. Akhtari, A. Kasaeian, M. A. V. Rad, A. Toopshekan, M. S. Motlagh, Techno-economic investigation of a hybrid biomass renewable energy system to achieve the goals of SDG-17 in deprived areas of Iran, *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 291, 117319. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117319.
- [43] M. Das, R. Mandal, The effect of photovoltaic energy penetration on a photovoltaic-biomass-lithium-ion off-grid system and system optimization for the agro-climatic zones of West Bengal, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, part B, 102593. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102593.
- [44] A. A. Youssef, S. Barakat, E. Tag-Eldin, M. M. Samy, Islanded green energy system optimal analysis using PV, wind, biomass, and battery resources with various economic criteria, *Results in Engineering*, 2023, vol. 19, 101321. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101321.
- [45] Md. S. Hossain, A. Jahid, K. Z. Islam, Md. F. Rahman, Solar PV and biomass resources-based sustainable energy supply for off-grid cellular base stations, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 53817–53840. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978121.
- [46] N. Ennemiri, A. Berrada, A. Emrani, J. Abdelmajid, R. E. Mrabet, Optimization of an off-grid PV/biogas/battery hybrid energy system for electrification: A case study in a commercial platform in Morocco, *Energy Conversion and Management*, 2024, vol. 21, 100508. DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100508.
- [47] F. K. Abo-Elyousr, A. N. Nozhy, Bi-objective economic feasibility of hybrid micro-grid systems with multiple fuel options for islanded areas in Egypt, *Renewable Energy*, 2018, vol. 128, part A, pp. 37–56. DOI: 10.1016/j.renene.2018.05.066.
- [48] A. Cano, P. Arevalo, F. Jurado, Energy analysis and techno-economic assessment of a hybrid PV/HKT/ BAT system using biomass gasifier: Cuenca-Ecuador case study, *Energy*, 2020, vol. 202, 117727. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117727.
- [49] H. Al-Najjar, C. Pfeifer, R. A. Afif, H. J. El-Khozondar, Performance evaluation of a hybrid grid-connected photovoltaic biogas-generator power system, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, 3151. DOI: 10.3390/en15093151.
- [50] H. A. El-Sattar, S. Kamel, H. Sultan, M. Tostado-Véliz, A. M. Eltamaly, F. Jurado, Performance analysis of a stand-alone PV/WT/biomass/bat system in Alrashda

- village in Egypt, *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 21, 10191. DOI: 10.3390/app112110191.
- [51] K. V. Konneh, H. Masrur, M. L. Othman, H. Takahashi, N. Krishna, T. Senjyu, Multi-attribute decision-making approach for a cost-effective and sustainable energy system considering weight assignment analysis, *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 10, 5615. DOI: 10.3390/su13105615.
- [52] HOMER Energy. HOMER Pro Version 3.17.1 User Manual; HOMER Energy: Boulder, CO, USA, 2024.
- [53] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal, “Chapter 15: Micropower system modeling with HOMER”, in *Integration of Alternative Sources of Energy*, F. A. Farret and M. G. Simões, Eds.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2006, pp. 379–418.
- [54] Катастар малих хидроелектрана на територији Републике Србије ван САП, Енергопројект-Хидроинжењеринг и Институт Јарослав Черни, Београд, 1987.
- [55] NASA/SSE. surface meteorology and solar energy. <https://power.larc.nasa.gov/> (15. Април 2025.)
- [56] T. Janić, N. Tica, V. Zekić, Sečka od drveta kao biogorivo, *Savremena poljoprivredna tehnika*, Decembar 2014, vol. 40, no. 4, pp. 199–210.
- [57] Biomass resources in Monatana and Sofia regions (Bulgaria) and Nišava, Zaječar and Jablanica districts (Serbia), Bioergy, Bulgaria-Serbia IPA Cross-border Programme, Novembar, 2013.
- [58] Promotion of sustainable use of biomass for energy production in the cross-border area, *Bioergy*, Bulgaria-Serbia IPA Cross-border Programme, Februar, 2011.
- [59] D. Z. Djurdjevic, Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 5, pp. 2431–2446. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.025.
- [60] T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, L. Pantić, A. Radivojević, M. Pavlović, Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 20, pp. 201–218. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.070.
- [61] M. Panić, M. Urošev, A. M. Pešić, J. Brankov, Ž. Bjeljac, Small hydropower plants in Serbia: Hydropower potential, current state and perspectives, *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.016.
- [62] C. A. Nallolla, V. Perumal, Optimal design of a hybrid off-grid renewable energy system using techno-economic and sensitivity analysis for a rural remote location, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 22, 15393. DOI: 10.3390/su142215393.
- [63] J. Kenfack, F. P. Neirac, T. T. Tatietsse, D. Mayer, M. Fogue, A. Lejeune, Microhydro-PV hybrid system: Sizing a small hydro-PV-hybrid system for rural electrification in developing countries, *Renewable Energy*, 2009, vol. 34, no. 10, pp. 2259–2263. DOI: 10.1016/j.renene.2008.12.038.
- [64] N. V. Ogueke, I. I. Ikpamezie, E. E. Anyanwu, The potential of a small hydro/photovoltaic hybrid system for electricity generation in FUTO, Nigeria, *International Journal of Ambient Energy*, 2016, vol. 37. no. 3, pp. 256–265. DOI: 10.1080/01430750.2014.952841.
- [65] L. E. Teixeira, J. Caux, A. Beluco, I. Bertoldo, J. A. S. Louzada, R. C. Eifler, Feasibility study of a hydro PV hybrid system operating at a dam for water supply in Southern Brazil, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2015, vol. 3, no. 9, pp. 70–83. DOI: 10.4236/jpee.2015.39006.
- [66] A. Beluco, P. K. Souza, A. Krenzinger, PV hydro hybrid systems, *IEEE Latin America Transactions*, 2008, vol. 6, no. 7, pp. 626–631. DOI: 10.1109/TLA.2008.4917434.
- [67] A. S. Aziz, M. F. N. Tajuddin, M. R. Adzman, A. Azmi, M. A. M. Ramli, Optimization and sensitivity analysis of standalone hybrid energy systems for rural electrification: A case study of Iraq, *Renewable Energy*, 2019, vol. 138, pp. 775–792. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.004.
- [68] J. O. Oladigbolu, M. A. M. Ramli, Y. A. Al-Turki, Optimal design of a hybrid PV solar/micro-hydro/diesel/battery energy system for a remote rural village under tropical climate conditions, *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 9, 1941. DOI: 10.3390/electronics9091491.
- [69] B. Adebajji, G. A. Adepoju, J. O. Oni, P. K. Olulope, Optimal sizing of an off-grid small hydro-photovoltaic-diesel generator hybrid power system for a distant village, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2017, vol. 6, no. 8, pp. 208–213. ISSN 2277-8616.

- [70] T. Nigussie, W. Bogale, F. Bekele, E. Dribssa, Feasibility study for power generation using off-grid energy system from micro hydro-PV-diesel generator-battery for rural area of Ethiopia: The case of Melkey Hera village, Western Ethiopia, *AIMS Energy*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 667–690. DOI: 10.3934/energy.2017.4.667.
- [71] S. S. Al-Juboori, A. H. Mutlag, R. H. Abduljabbar, Evaluation of stand alone remote area hybrid power system, *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 61–68. ISSN(P): 2278-9944.
- [72] A. V. Anayochukwu, N. A. Ndubueze, Potentials of optimized hybrid system in powering off-grid macro base transmitter station site, *International Journal of Renewable Energy*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 861–871.
- [73] D. Akinyele, I. Okakwu, E. Olabode, R. Blanchard, T. Ajewole, C. Monyei, Integrated TEEP approach to microgrid design and planning with small hydro/solar/diesel resources for standalone application, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2022, vol. 2, 100091. DOI: 10.1016/j.prime.2022.100091.
- [74] L. N. Xing, H. L. Xu, A. K. Sani, Md. A. Hossain, S. M. Muyeen, Techno-economic and environmental assessment of the hybrid energy system considering electric and thermal loads, *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 24, p. 3136. DOI: 10.3390/electronics10243136.
- [75] M. R. Akhtari, M. Baneshi, Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer, *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 188, pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.03.067.
- [76] B. K. Das, M. Hasan, Optimal sizing of a stand-alone hybrid system for electric and thermal loads using excess energy and waste heat, *Energy*, 2021, vol. 214, p. 119036. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119036.
- [77] M. R. Elkadeem, K. M. Kotb, K. Elmaadawy, Z. Ullah, E. Elmolla, B. Liu, S. Wang, A. Dán, S. W. Sharshir, Feasibility analysis and optimization of an energy-water-heat nexus supplied by an autonomous hybrid renewable power generation

- system: An empirical study on airport facilities, *Desalination*, 2021, vol. 504, p. 114952. DOI: 10.1016/j.desal.2021.114952.
- [78] H. Elsaraf, M. Jamil, B. Pandey, Techno-economic design of a combined heat and power microgrid for a remote community in Newfoundland Canada, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 91548–91563. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091738.
- [79] R. Akhtari, I. Shayegh, N. Karimi, Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable earth - air heat exchanger coupled with electric boiler, hydrogen, wind and PV configurations, *Renewable Energy*, 2020, vol. 148, pp. 839–851. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.169.
- [80] R. Esfilar, M. Bagheri, B. Golestani, Technoeconomic feasibility review of hybrid waste to energy system in the campus: A case study for the University of Victoria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 146, 111190. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111190.
- [81] A. Baruah, M. Basu, D. Amuley, Modeling of an autonomous hybrid renewable energy system for electrification of a township: A case study for Sikkim, India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 135, 110158. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110158.
- [82] A. El-Maaroufi, M. Daoudi, A. R. Laamara, Techno-economic analysis of a PV/WT/biomass off-grid hybrid power system for rural electrification in northern Morocco using HOMER, *Renewable Energy*, 2024, vol. 231, 120904. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120904.
- [83] C. Ji, Design, techno-economic feasibility analysis, and sensitivity study of an off-grid hybrid microgrid for developing communities, *Renewable Energy*, 2025, vol. 239, 121956. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121956.
- [84] O. E. Diemuodeke, D. Vera, M. M. Ojapah, C. O. Nwachukwu, H. U. Nwosu, D. O. Aikhuele, J. C. Ofodu, B. S. Nuhu, Hybrid solar PV–agro-waste-driven combined heat and power energy system as feasible energy source for schools in Sub-Saharan Africa, *Biomass*, 2025, vol. 4, no. 4, pp. 1200–1218. DOI: 10.3390/biomass4040067.
- [85] N. Yimen, L. Monkam, D. Tcheukam-Toko, B. Musa, R. Abang, F. L. Fombe, S. Abbasoglu, M. Dagbasi, Optimal design and sensitivity analysis of distributed biomass-based hybrid renewable energy systems for rural electrification: Case

- study of different photovoltaic/wind/battery-integrated options in Babadam, northern Cameroon, *IET Renewable Power Generation*, 2022, vol. 16, pp. 2939–2956. DOI: 10.1049/rpg2.12266.
- [86] S. Shah, D. Mahajan, R. Varun, V. Jain, Y. Sawle, Optimal planning and design of an off-grid solar, wind, biomass, fuel cell hybrid energy system using HOMER Pro, *In book: Recent Advances in Power Systems*, 3rd ed.; O. H. Gupta, V. K. Sood, O. P. Malik; Springer: Singapore, 2022, vol. 812, pp. 255–275. DOI:10.1007/978-981-16-6970-5_20.
- [87] C. Li, L. Zhang, F. Qiu, R. Fu, Optimization and enviro-economic assessment of hybrid sustainable energy systems: The case study of a photovoltaic/biogas/diesel/battery system in Xuzhou, China, *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 41, no. 4, 100852. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100852.
- [88] S. Vendoti, M. Mahankali, R. Kiranmayi, Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software, *Environment, Development and Sustainability*, 2021, vol. 23, pp. 351–372. DOI: 10.1007/s10668-019-00583-2.
- [89] F. Rashid, M. E. Hoque, M. Aziz, T. N. Sakib, M. T. Islam, R. M. Robin, Investigation of optimal hybrid energy systems using available energy sources in a rural area of Bangladesh, *Energies*, 2021, vol. 14, 5794. DOI: 10.3390/en14185794.
- [90] P. Kumar, N. Pal, H. Sharma, Optimization and techno-economic analysis of a solar photovoltaic/biomass/diesel/battery hybrid off-grid power generation system for rural remote electrification in eastern India, *Energy*, 2022, vol. 247, 123560. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123560.
- [91] P. Malik, M. Awasthi, S. Sinha, Techno-economic and environmental analysis of biomass-based hybrid energy systems: A case study of a Western Himalayan state in India, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 45, 101189. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101189.
- [92] B. K. Das, N. Hoque, S. Mandal, T. K. Pal, M. A. Raihan, A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh, *Energy*, 2017, vol. 134, pp. 775–788. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.024.

- [93] J. G. Castellanos, M. Walker, D. Poggio, M. Pourkashanian, W. Nimmo, Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion, *Renewable Energy*, 2015, vol. 74, pp. 390–398. DOI: 10.1016/j.renene.2014.08.055.
- [94] Z. Benhachani, B. Azoui, R. Abdessemed, M. Chabane, Optimal sizing of a solar-wind hybrid system supplying a farm in a semi-arid region of Algeria, *47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398688.
- [95] M. A. Abbaszadeh, M. J. Ghourichaei, F. Mohammadkhani, Thermo-economic feasibility of a hybrid wind turbine/PV/gas generator energy system for application in a residential complex in Tehran, Iran, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2020, vol. 39, no. 4, e13396. DOI: 10.1002/ep.13396.
- [96] S. Chakraborty, D. Mukherjee, K. P. Guchhait, S. Bhattacharjee, Y. A. Abdelaziz, A. El-Shahat, Optimum design of a renewable-based integrated energy system in autonomous mode for a remote hilly location in Northeastern India, *Energies*, 2023, vol. 16, 1588. DOI: 10.3390/en16041588.
- [97] J. Li, P. Liu, Z. Li, Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: A case study of west China, *Energy*, 2020, vol. 208, 118387. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118387.
- [98] A. Allouhi, S. Rehman, M. Krarti, Role of energy efficiency measures and hybrid PV/biomass power generation in designing 100% electric rural houses: A case study in Morocco, *Energy and Buildings*, 2021, vol. 236, 110770. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110770.
- [99] L. Ji, X. Liang, Y. Xie, G. Huang, B. Wang, Optimal design and sensitivity analysis of the stand-alone hybrid energy system with PV and biomass-CHP for remote villages, *Energy*, 2021, vol. 225, 120323. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120323.
- [100] H. M. Jahangir, R. Cheraghi, Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, vol. 42, 100895. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100895.

- [101] J. Lata-García, N. Z. Cedeño, G. Ampuño, F. Jurado, M. L. Swarupa, W. Maliza, Optimization and evaluation of a stand-alone hybrid system consisting of solar panels, biomass, diesel generator, and battery bank for rural communities, *Sustainability*, 2024, vol. 16, 9012. DOI: 10.3390/su16209012.
- [102] C. K. Sanjay, M. Karthikeyan, M. K. Prasannakumaran, V. Kirubakaran, Techno commercial study of hybrid systems for the agriculture farm using homer software, *In Book Hybrid Renewable Energy Systems*, 1st ed.; Sahoo, U.; Wiley: New Jersey, USA, 2021, vol. 5, pp. 115–133. DOI: 10.1002/9781119555667.ch5.
- [103] S. Mukhtar, S. Muhammad, A. H. Alyousef, W. Khan, R. Shah, A. S. El-Tantawy, Enviro-economic and optimal hybrid energy system: Photovoltaic–biogas–hydro–battery system in rural areas of Pakistan, *Heliyon*, 2024, vol. 10, e35182. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35182.
- [104] Y. Sawle, S. Jain, S. Babu, R. A. Nair, B. Khan, Prefeasibility economic and sensitivity assessment of hybrid renewable energy system, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 28260–28271. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3058517.
- [105] F. Odoi-Yorke, S. Abaase, M. Zebilila, L. Atepor, Q. Ai, Feasibility analysis of solar PV/biogas hybrid energy system for rural electrification in Ghana, *Cogent Engineering*, 2022, vol. 9, 2034376. DOI: 10.1080/23311916.2022.2034376.
- [106] H. El-houari, A. Allouhi, S. Rehman, S. M. Buker, T. Kousksou, A. Jamil, B. E. Amrani, Feasibility evaluation of a hybrid renewable power generation system for sustainable electricity supply in a Moroccan remote site, *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 277, 123534. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123534.
- [107] M. Mohseni, F. S. Moosavian, A. Hajinezhad, Feasibility evaluation of an off-grid solar-biomass system for remote area electrification considering various economic factors, *Energy Science & Engineering*, 2022, vol. 10, pp. 3091–3107. DOI: 10.1002/ese3.1202.
- [108] K. B. Das, R. Hassan, P. P. Kumar, I. Hoque, S. S. R. Nuvvula, M. A. Maruf, A. Das, C. P. Okonkwo, B. Khan, Optimum design, socioenvironmental impact, and exergy analysis of a solar and rice husk-based off-grid hybrid renewable energy system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023, pp. 1–17. DOI: 10.1155/2023/3597840.

- [109] A. C. Nallolla, V. Perumal, Optimal design of a hybrid off-grid renewable energy system using techno-economic and sensitivity analysis for a rural remote location, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 15393. DOI: 10.3390/su142215393.
- [110] F. Aydın, D. Öztürk, Design and Techno-Economic Analysis of Hybrid Power Systems for Rural Areas: A Case Study of Bingöl, *Electricity*, vol. 5, no. 3, pp. 562–584, 2024. DOI: 10.3390/electricity5030028.
- [111] Z. Abdin, W. Mérida, Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis, *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 196, pp. 1068–1079. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.06.068.
- [112] B. Akarsu, M. S. Genç, Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems, *Fuel*, 2022, vol. 324, Part A, 124465. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124465.
- [113] P. T. Kapen, B. A. M. Nouadje, V. Chegnimonhan, G. Tchuen, R. Tchinda, Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the far north region of cameroon by using HOMER pro, *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, 100988. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100988.
- [114] F. Dawood, G. Shafiullah, M. Anda, Stand-Alone Microgrid with 100% Renewable Energy: A Case Study with Hybrid Solar PV-Battery-Hydrogen, *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 5, 2047. DOI: 10.3390/su12052047.
- [115] M. A. Köprü, D. Öztürk, B. Yildirim, Techno-economic analysis of a hybrid system for rural areas: Electricity and heat generation with hydrogen and battery storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, vol. 143, pp. 882–897. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.394.
- [116] L. Abdolmaleki, U. Berardi, Hybrid solar energy systems with hydrogen and electrical energy storage for a single house and a midrise apartment in North America, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 52, Part D, pp. 1381–1394. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.222.
- [117] R. Yasmin, M. N. Nabi, F. Rashid, M. A. Hossain, Solar, wind, hydrogen, and bioenergy-based hybrid system for off-grid remote locations: techno-economic

- and environmental analysis, *Clean Technologies*, 2025, vol. 7, no. 2, 36. DOI: 10.3390/cleantechnol7020036.
- [118] P. Nikolaidis, Pulsed-supplied water electrolysis via two-switch converter for PV capacity firming, *Electricity*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 131–144. DOI: 10.3390/electricity3010008.
- [119] S. Arif, A. E. Rabbi, S. U. Ahmed, M. S. H. Lipu, T. Jamal, T. Aziz, M. R. Sarker, A. Riaz, T. Alharbi, M. M. Hussain, Enhancement of solar PV hosting capacity in a remote industrial microgrid: A methodical techno-economic approach, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 14, 8921. DOI: 10.3390/su14148921.
- [120] S. Rashid, S. Rana, S. K. A. Shezan, S. A. B. Karim, S. Anower, Optimized design of a hybrid PV-wind-diesel energy system for sustainable development at coastal areas in Bangladesh, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 297–304. DOI: 10.1002/ep.12496.
- [121] S. K. A. Shezan, A. Al-Mamoon, H. W. Ping, Performance investigation of an advanced hybrid renewable energy system in Indonesia, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, vol. 37, no. 4, pp. 1424–1432. DOI: 10.1002/ep.12790.
- [122] I. Prasetyaningsari, A. Setiawan, A. A. Setiawan, Design optimization of solar powered aeration system for fish pond in Sleman Regency, Yogyakarta by HOMER software, *Energy Procedia*, 2013, vol. 32, pp. 90–98. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.012.
- [123] M. Hossain, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia, *Sustainable Cities and Society*, 2017, vol. 28, pp. 358–366. DOI: 10.1016/j.scs.2016.10.008.
- [124] M. J. Khan, A. K. Yadav, L. Mathew, Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-wind-diesel-battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, pp. 577–607. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.076.
- [125] J. D. D. Niyonteze, F. Zou, G. N. O. Asemota, S. Bimenyimana, G. Shyirambere, Key technology development needs and applicability analysis of renewable

- energy hybrid technologies in off-grid areas for the Rwanda power sector, *Heliyon*, 2020, vol. 6, e03300. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03300.
- [126] C.-T. Tsai, T. M. Beza, E. M. Molla, C. C. Kuo, Analysis and sizing of mini-grid hybrid renewable energy system for islands, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 70013–70029. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983172.
- [127] Md. F. Ishraque, S. Arefin, M. M. Rashid, B. A. Bhadra, Md. A. Hossain, K. R. Chakraborty, M. Ryan, R. S. Fahim, K. S. Sarker, K. S. Das, Techno-economic and power system optimization of a renewable rich islanded microgrid considering different dispatch strategies, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 77325–77340. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082538.
- [128] S. A. Goudarzi, F. Fazelpour, G. B. Gharehpetian, M. A. Rosen, Techno-economic assessment of hybrid renewable resources for a residential building in Tehran, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019, vol. 38, no. 5, p. 13209. DOI: 10.1002/ep.13209.
- [129] G. Zhang, C. Xiao, N. Razmjoo, Optimal operational strategy of hybrid PV/wind renewable energy system using Homer: A case study, *International Journal of Ambient Energy*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 3953–3966. DOI: 10.1080/01430750.2020.1861087.
- [130] C. Altin, Differential evolution algorithm based very fast renewable energy system optimisation tool design, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 44–53. DOI: 10.5755/j02.eie.33872.
- [131] H. S. Das, C. W. Tan, A. H. M. Yatim, K. Y. Lau, Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, pp. 1332–1347. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.174.
- [132] A. O. Salau, S. K. Maitra, A. Kumar, A. Mane, R. W. Dumicho, Design, modeling, and simulation of a PV/diesel/battery hybrid energy system for an off-grid hospital in Ethiopia, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, vol. 8, no. 15, 100607. DOI:10.1016/j.prime.2024.100607.
- [133] F. B. Silinto, C. van der L. Yamu, C. Zuidema, P. C. A. Faaij, Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on

- energy system models and spatial explicit modelling tools, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, vol. 207, 114916. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114916.
- [134] T. S. Costa, M. G. Villalva, Technical evaluation of a PV-diesel hybrid system with energy storage: Case study in the Tapajós-Arapiuns extractive reserve, Amazon, Brazil, *Energies*, 2020, vol. 13, 2969. DOI: 10.3390/en13112969.
- [135] L.-N. Xing, H.-L. Xu, A. K. Sani, Md. A. Hossain, S. M. Muyeen, Techno-economic and environmental assessment of the hybrid energy system considering electric and thermal loads, *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 24, 3136. DOI: 10.3390/electronics10243136.
- [136] M. R. Akhtari, I. Shayegh, N. Karimi, Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable earth – air heat exchanger coupled with electric boiler, hydrogen, wind and PV configurations, *Renewable Energy*, 2020, vol. 148, pp. 839–851. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.169.
- [137] H. K. Pujari, M. Rudramoorthy, Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid grid-independent renewable energy system for a rural community, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31, no. 7, e13007. DOI: 10.1002/2050-7038.13007.
- [138] S. Bahramara, M. P. Moghaddam, M. R. Haghifam, Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 62, pp. 609–620. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.039.
- [139] K. Murugaperumala, S. Srinivasnb, G. R. K. D. S. Prasad, Optimum design of hybrid renewable energy system through load forecasting and different operating strategies for rural electrification, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, vol. 37, 100613. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100613.
- [140] K. Murugaperumal, P. A. D. V. Raj, Feasibility design and techno-economic analysis of hybrid renewable energy system for rural electrification, *Solar Energy*, 2019, vol. 188, pp. 1068–1083. DOI: 10.1016/j.solener.2019.07.008.
- [141] T. O. Araoye, E. C. Ashigwuike, S. V. Egoigwe, F. U. Ilo, Adeyinka C. Adeyemi, R. S. Lawal, Modeling, simulation, and optimization of biogas-diesel hybrid microgrid renewable energy system for electrification in rural area, *IET*

- Renewable Power Generation*, 2021, vol. 15, no. 10, pp. 20302–2314. DOI: 10.1049/rpg2.12164.
- [142] Md. R. Islam, H. Akter, H. O. R. Howlader, T. Senjyu, Optimal sizing and techno-economic analysis of grid-independent hybrid energy system for sustained rural electrification in developing countries: A case study in Bangladesh, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 17, 6381. DOI: 10.3390/en15176381.
- [143] W. S. Aga, A. N. Legese, A. D. Tolche, N. T. Roba, S. A. Jabasingh, S. A. Mohammed, S. K. Kasaye, N. Jaya, J. A. Kumar, Rural electrification with hybrid renewable energy-based off-grid technology: a case study of Adem Tuleman, Ethiopia, *Energy, Ecology and Environment*, 2023, vol. 8, pp. 420–438. DOI: 10.1007/s40974-023-00290-9.
- [144] Y. Sawle, S. C. Gupta, A. K. Bohre, Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, pp. 2217–2235. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.033.
- [145] B. E. K. Nsafon, A. B. Owolabi, H. M. Butu, J. W. Roh, D. Suh, J-Soo Huh, Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation, *Energy Strategy Reviews*, 2020, vol. 32, 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570.
- [146] S. V. Shah, B. M. Jha, Rural electrification and optimization of biogas–solar–wind hybrid system for decentralized energy generation in India: a case study of Ringhim village, Sikkim, *Electrical Engineering*, 2023, vol. 106, pp. 857–867. DOI: 10.1007/s00202-023-02030-y.
- [147] A. K. Nag, S. Sarkar, Modeling of hybrid energy system for futuristic energy demand of an Indian rural area and their optimal and sensitivity analysis, *Renewable Energy*, 2018, vol. 118, pp. 477–488. DOI: 10.1016/j.renene.2017.11.047.
- [148] S. Y. Wong, C. Li, Techno-economic analysis of optimal hybrid renewable energy systems – A case study for a campus microgrid, *Energy Reports*, 2023, vol. 9, no. 12, pp. 134–138. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.09.153.
- [149] B. K. Das, M. Hasan, F. Rashid, Optimal sizing of a grid-independent PV/diesel/pump-hydro hybrid system: A case study in Bangladesh, *Sustainable*

- Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 44, 100977. DOI: 10.1016/j.seta.2021.100997.
- [150] Катастар малих хидроелектрана на територији Републике Србије ван САП, *Енергопројект-Хидроинжењеринг и Институт Јарослав Черни*, Београд, 1987.
- [151] Green Resource Center. <https://thebalkanforum.org/file/repository/NK60> (16. Август 2023)
- [152] ABiSolar. <https://abisolar.rs/proizvod/solarni-paneli-sharp/50> (16. Август 2023)
- [153] J. Sokolovic, J. Stojanovic, M. Zikic, D. Tanikic, R. Stanojlovic, Z. Markovic, A. Stojanovic, Biomass briquetting – potentials and perspectives in Zajecar region, Serbia, *Quaestus – Multidisciplinary Research Journal*, 2015, vol. 6, pp. 292–300.
- [154] Halooglasi. <https://www.halooglasi.com/masine-alati-oprema/elektromotori-i-agregati/agregat-besumni-dizel-yamaha-12kw/542563700922?kid=1> (16. Август 2023)
- [155] Retail Serbia. <https://retailserbia.com/info/cene-goriva-srbija> (16. Август 2023)
- [156] National bank of Serbia. https://www.nbs.rs/sr_RS/finansijsko_trziste/medjubankarsko-devizno-trziste/kursna-lista/zvanicni-srednji-kurs-dinara/index.html (16. Август 2023)
- [157] T. Janić, N. Tica, V. Zekić, Wood chips as biofuel, *Contemporary Agricultural Engineering*, 2014, vol. 40, pp. 199–210.
- [158] Bioenergypoint. <https://www.bioenergypoint.com/> (16. Август 2023)
- [159] T. Kosanić, Influence of process parameters on the pyrolysis of woody biomass. PhD thesis, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 2015.
- [160] V. Matijašević, Z. Beño, V. Tekáč, V. M. Duong, Characterization of beech wood pellets as low-emission solid biofuel for residential heating in Serbia, *Resources*, 2024, vol. 13, 104.
- [161] Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/small-wood-biomass-gasifier-generator-Household_1600539403472.html (28. Април 2025).
- [162] ABiSolar. <https://abisolar.rs/proizvod/invertori-ocren-nb-1000w-cist-sinus/110/> (16. Август 2023)

- [163] Andreja doo Temerin. <https://www.akumulator-shop.rs/akumulatori-za-brodove/trojan-27tmx-12v-105ah> (16. Август 2023)
- [164] Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/PEM-Hydrogen-Cell-Generator-Electrolysis-Water_1601503929959.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.575a13a0KFT75G&priceId=9e3d2f7257004c619b00fa182a09f169 (18. Септембар 2025)
- [165] Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/Low-Pressure-Metal-Hydride-Hydrogen-Storage_10000019871350.html (18. Септембар 2025)
- [166] T. V. Achirgbenda, A. Huhe, K. Okoli, Techno-economic feasibility assessment of a solar-biomass-diesel energy system for a remote rural health facility in Nigeria. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, vol. 46, 15567036. DOI: 10.1080/15567036.2020.1813848.
- [167] T. T. E. Vo, H. Ko, J.-H. Huh, N. Park, Overview of solar energy for aquaculture: The potential and future trends, *Energies*, 2021, vol. 14, 6923. DOI: 10.3390/en14216923.
- [168] A. Dedić, Analysis of use of biomass as a waste of forest logging and wood processing in Serbia, *In Proceedings of the International Conference on Renewable Electrical Power Sources – ICREPS*, 16 April 2018, Belgrade, Serbia, pp. 199–208.

ПРИЛОГ А. ТАБЕЛА НОВЧАНОГ ТОКА ЗА ОПТИМАЛНУ КОНФИГУРАЦИЈУ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА – СЦЕНАРИО I

Табела А.1 Номинални новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију постојећег хибридног система

| Година | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | |
|-----------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|
| <i>Претварач</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 940 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 313 | |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | 940 | | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 940 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 960 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 293 | |
| <i>Дизел генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 3710 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 935 | |
| Гориво | | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | |
| Укупно | 3710 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 486 | 449 | |
| <i>Микро хидроелектрана</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7650 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | |
| Укупно | 7650 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | |
| <i>PV генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 4488 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | |
| Укупно | 4488 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | |
| <i>Батерије</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 4230 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3796 | |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4230 | | | |
| Укупно | 4230 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 4320 | 90 | |
| Укупно | 21018 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 1893 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 953 | 5183 | 953 | 4092 |

Табела А.2 Дисконтовани новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију постојећег хибридног система

| Година | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
|-----------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------|
| <i>Претварач</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 940 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 11 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 75 |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | 399 | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 940 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 11 | 10 | 10 | 9 | 407 | 8 | 8 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 70 |
| <i>Дизел генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 3710 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 224 |
| Гориво | | 453 | 428 | 404 | 382 | 361 | 341 | 322 | 304 | 287 | 271 | 256 | 242 | 228 | 216 | 204 | 192 | 182 | 172 | 162 | 153 | 145 | 137 | 129 | 122 | 115 | |
| Укупно | 3710 | 459 | 433 | 409 | 386 | 365 | 345 | 326 | 307 | 290 | 274 | 259 | 245 | 231 | 218 | 206 | 195 | 184 | 174 | 164 | 155 | 146 | 138 | 130 | 123 | 108 | |
| <i>Микро хидроелектрана</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7650 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 181 | 171 | 162 | 153 | 144 | 136 | 129 | 122 | 115 | 108 | 102 | 97 | 91 | 86 | 81 | 77 | 73 | 69 | 65 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | |
| Укупно | 7650 | 181 | 171 | 162 | 153 | 144 | 136 | 129 | 122 | 115 | 108 | 102 | 97 | 91 | 86 | 81 | 77 | 73 | 69 | 65 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | |
| <i>PV генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 4488 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 156 | 147 | 139 | 131 | 124 | 117 | 111 | 104 | 99 | 93 | 88 | 83 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 42 | 40 | |
| Укупно | 4488 | 156 | 147 | 139 | 131 | 124 | 117 | 111 | 104 | 99 | 93 | 88 | 83 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 42 | 40 | |
| <i>Батерије</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 4230 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 85 | 80 | 76 | 72 | 68 | 64 | 60 | 57 | 54 | 51 | 48 | 45 | 43 | 40 | 38 | 36 | 34 | 32 | 30 | 29 | 27 | 26 | 24 | 23 | 22 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 909 |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1157 |
| Укупно | 4230 | 85 | 80 | 76 | 72 | 68 | 64 | 60 | 57 | 54 | 51 | 48 | 45 | 43 | 40 | 38 | 36 | 34 | 32 | 30 | 29 | 27 | 26 | 1182 | 23 | 888 | |
| Укупно | 21018 | 900 | 850 | 803 | 758 | 716 | 676 | 639 | 603 | 570 | 538 | 508 | 480 | 453 | 428 | 803 | 382 | 361 | 341 | 322 | 304 | 287 | 271 | 1413 | 242 | 980 | |

ПРИЛОГ Б. ТАБЕЛА НОВЧАНОГ ТОКА ЗА ОПТИМАЛНУ КОНФИГУРАЦИЈУ ХИБРИДНОГ СИСТЕМА – СЦЕНАРИО II

Табела Б.1 Номинални новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију предложеног хибридног система

| Година | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| <i>Претварач</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 3078 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1026 | |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | 3078 | | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 3078 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 3143 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 961 |
| <i>Когенеративни дизел генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 5110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | 287 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1281 | |
| Гориво | | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | 496 | |
| Замена | | | | 2900 | | | 2900 | | | 2900 | | | | 2900 | | | 2900 | | | | 2900 | | | | | 2900 | | |
| Укупно | 5110 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 3683 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 3683 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 3683 | 783 | 783 | 3683 | 783 | 783 | |
| <i>Бојлер</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гориво | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | |
| Укупно | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | 3313 | |
| <i>Микро хидроелектрана</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7650 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | |
| Укупно | 7650 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | |
| <i>PV генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 20860 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | |
| Укупно | 20860 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | 767 | |
| <i>Регулатор термичког оптерећења</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 11178 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8384 | |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 11178 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8384 | |
| <i>Батерије</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7755 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2319 | |
| Укупно | 7755 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 2154 | |
| Укупно | 55631 | 5286 | 5286 | 8186 | 5286 | 5286 | 8186 | 5286 | 8186 | 5286 | 5286 | 8186 | 5286 | 5286 | 8186 | 8364 | 8186 | 5286 | 5286 | 8186 | 16464 | 8186 | 5286 | 5286 | 8186 | 8186 | 7724 | |

Табела Б.2 Дисконтовани новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију предложеног хибридног система

| Година | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| <i>Претварач</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 3078 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 62 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | 44 | 41 | 39 | 37 | 35 | 33 | 31 | 29 | 28 | 26 | 25 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 246 |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | 1306 | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 3078 | 62 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | 44 | 41 | 39 | 37 | 35 | 33 | 31 | 29 | 1334 | 26 | 25 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 230 | |
| <i>Когенеративни дизел генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 5110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 271 | 256 | 242 | 228 | 215 | 203 | 192 | 182 | 171 | 162 | 153 | 144 | 136 | 129 | 122 | 115 | 109 | 102 | 97 | 91 | 86 | 82 | 77 | 73 | 69 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 307 |
| Гориво | | 469 | 443 | 418 | 395 | 373 | 352 | 333 | 314 | 297 | 280 | 265 | 250 | 236 | 223 | 211 | 199 | 188 | 177 | 168 | 158 | 149 | 141 | 133 | 126 | 119 | |
| Замена | | | | 2497 | | | 2151 | | 1852 | | | 1595 | | | 1373 | | 1183 | | | 1018 | | 877 | | | 755 | | |
| Укупно | 5110 | 740 | 699 | 3157 | 623 | 588 | 2706 | 525 | 2348 | 468 | 442 | 2012 | 394 | 372 | 1725 | 332 | 1496 | 296 | 280 | 1283 | 250 | 1113 | 223 | 210 | 954 | 119 | |
| <i>Бојлер</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гориво | | 3129 | 2955 | 2791 | 2636 | 2489 | 2351 | 2221 | 2097 | 1981 | 1871 | 1767 | 1669 | 1576 | 1488 | 1406 | 1328 | 1254 | 1184 | 1118 | 1056 | 998 | 942 | 890 | 840 | 794 | |
| Укупно | | 3129 | 2955 | 2791 | 2636 | 2489 | 2351 | 2221 | 2097 | 1981 | 1871 | 1767 | 1669 | 1576 | 1488 | 1406 | 1328 | 1254 | 1184 | 1118 | 1056 | 998 | 942 | 890 | 840 | 794 | |
| <i>Микро хидроелектрана</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7650 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 181 | 171 | 162 | 153 | 144 | 136 | 129 | 122 | 115 | 108 | 102 | 97 | 91 | 86 | 81 | 77 | 73 | 69 | 65 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | |
| Укупно | 7650 | 181 | 171 | 162 | 153 | 144 | 136 | 129 | 122 | 115 | 108 | 102 | 97 | 91 | 86 | 81 | 77 | 73 | 69 | 65 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | |
| <i>PV генератор</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 20860 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 724 | 684 | 646 | 610 | 576 | 544 | 514 | 485 | 458 | 433 | 409 | 386 | 365 | 345 | 325 | 307 | 290 | 274 | 259 | 244 | 231 | 218 | 206 | 195 | 184 | |
| Укупно | 20860 | 724 | 684 | 646 | 610 | 576 | 544 | 514 | 485 | 458 | 433 | 409 | 386 | 365 | 345 | 325 | 307 | 290 | 274 | 259 | 244 | 231 | 218 | 206 | 195 | 184 | |
| <i>Регулатор термичког оптерећења</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 11178 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2088 |
| Замена | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Укупно | 11178 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2088 |
| <i>Батерије</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инвестиција | 7755 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Погон и одржавање | | 156 | 147 | 139 | 131 | 124 | 117 | 111 | 104 | 99 | 93 | 88 | 83 | 78 | 74 | 77 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 42 | 40 | |
| Сачувана вредност | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 556 |
| Укупно | 7755 | 156 | 147 | 139 | 131 | 124 | 117 | 111 | 104 | 99 | 93 | 88 | 83 | 78 | 74 | 77 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 42 | 516 | |
| Укупно | 55631 | 4992 | 4715 | 6950 | 4205 | 3972 | 5902 | 3543 | 5198 | 3160 | 2984 | 4413 | 2662 | 2514 | 3748 | 3548 | 3301 | 2000 | 1889 | 2803 | 5249 | 2468 | 1503 | 1420 | 2096 | 1850 | |

**ПРИЛОГ В. СКРАЋЕНИЦЕ И ОСНОВНЕ ОЗНАКЕ, ПРЕМА
РЕДОСЛЕДУ ПОЈАВЉИВАЊА**

| | |
|----------------|---|
| <i>OIE</i> | – Обновљиви извори енергије (енг. <i>Renewable Energy Sources</i>) |
| <i>NPC</i> | – Нето садашњи трошак (енг. <i>Net Present Cost</i>) |
| <i>COE</i> | – Трошкови производње енергије (енг. <i>Cost of Energy</i>) |
| <i>GHG</i> | – Гасови стаклене баште (енг. <i>Green House Gases</i>) |
| <i>μHE</i> | – Микро хидроелектрана (енг. <i>Micro-Hydro Power Plant</i>) |
| <i>PV</i> | – Фотонапонски (енг. <i>Photovoltaic</i>) |
| <i>CHP</i> | – Комбинована производња топлотне и електричне енергије (енг. <i>Combined Heat and Power</i>) |
| <i>TLC</i> | – Регулатор термичког оптерећења (енг. <i>Thermal Load Controller</i>) |
| <i>HOMER</i> | – Хибридна оптимизација више обновљивих извора за генерисање електричне енергије (енг. <i>Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables</i>) |
| <i>EU</i> | – Европска Унија (енг. <i>European Union</i>) |
| <i>NASA</i> | – Национална авијацијска и свемирска администрација (енг. <i>National Aeronautics and Space Administration</i>) |
| <i>NREL</i> | – Америчка национална лабораторија за обновљиву енергију (енг. <i>National Renewable Energy Laboratory</i>) |
| <i>EE</i> | – Вишак електричне енергије (енг. <i>Excess Electricity</i>) |
| <i>RF</i> | – Удео обновљивих извора енергије (енг. <i>Renewable Fraction</i>) |
| <i>DS</i> | – Стратегија отпреме (енг. <i>Dispatch Strategy</i>) |
| <i>CC</i> | – Циклично пуњење (енг. <i>Cycle Charging</i>) |
| <i>LF</i> | – Праћење оптерећења (енг. <i>Load Following</i>) |
| <i>P&O</i> | – Погон и одржавање (енг. <i>Operation and Maintenance</i>) |
| <i>DV</i> | – Променљива одлучивања (енг. <i>Decision Variable</i>) |
| <i>AC</i> | – Наизменична струја (енг. <i>Alternating Current</i>) |
| <i>DC</i> | – Једносмерна струја (енг. <i>Direct Current</i>) |

| | |
|-----------------------|---|
| SV | – Променљива осетљивости (енг. <i>Sensitivity Variable</i>) |
| $P_{\mu XE, nom}$ | – Номинална снага μXE |
| η_{hyd} | – Коефицијент ефикасности хидротурбине |
| ρ_{water} | – Густина воде |
| g | – Убрзање Земљине теже |
| h | – Укупан пад |
| \dot{Q}_{design} | – Пројектовани проток воде кроз хидротурбину |
| h_{net} | – Нето пад |
| f_h | – Губици услед трења |
| h_l | – Апсолутни губитак пада услед трења |
| f_D | – Дарсијев фактор трења |
| L | – Дужина цеви |
| D | – Пречник цеви |
| V | – Брзина протока воде |
| Q | – Запремински проток |
| Re | – Рејнолдсов број |
| μ | – Динамичка вискозност |
| ε | – Коефицијент храпавости цеви |
| D_h | – Хидраулични пречник (унутрашњи пречник кружне цеви) |
| $P_{\mu XE}$ | – Излазна снага μXE |
| $\dot{Q}_{turbine}$ | – Проток воде кроз хидротурбину |
| $\dot{Q}_{available}$ | – Распоживи проток воде |
| \dot{Q}_{min} | – Минимални проток воде кроз хидротурбину |
| \dot{Q}_{max} | – Максимални проток воде кроз хидротурбину |
| \dot{Q}_{stream} | – Укупни проток воде |
| $\dot{Q}_{residual}$ | – Резидуални проток воде |
| w_{min} | – Минимална брзина протока воде кроз хидротурбину изражена као проценат пројектованог протока |

| | |
|------------------------|--|
| w_{max} | – Максимална брзина протока воде кроз хидротурбину изражена као проценат пројектованог протока |
| P_{PV} | – Излазна снага <i>PV</i> генератора |
| <i>STC</i> | – Стандардни услови тестирања (енг. <i>Standard Test Conditions</i>) |
| Y_{PV} | – Номинални капацитет <i>PV</i> модула добијен при <i>STC</i> |
| f_{PV} | – Коефицијент опадања називне снаге <i>PV</i> модула |
| \overline{G}_T | – Соларна ирадијанса у посматраном временском интервалу |
| $\overline{G}_{T,STC}$ | – Соларна ирадијанса при <i>STC</i> |
| α_p | – Температурни коефицијент снаге |
| T_c | – Температура <i>PV</i> ћелије у посматраном временском интервалу |
| $T_{c,STC}$ | – Температура <i>PV</i> ћелије при <i>STC</i> |
| <i>GHI</i> | – Глобална соларна ирадијанса (енг. <i>Global Horizontal Irradiance</i>) |
| n | – Број дана у години |
| ω | – Часовни угао |
| τ_s | – Соларно време |
| τ_c | – Локално стандардно време које одговара средњој вредности временског корака |
| λ | – Географска ширина |
| <i>GMT</i> | – Средње време по Гриничу (енг. <i>Greenwich Mean Time</i>) |
| Z_c | – Временска зона источно од <i>GMT</i> |
| E | – Параметар времена |
| θ | – Упадни угао |
| β | – Угао нагиба површине <i>PV</i> модула |
| γ | – Азимут |
| θ_Z | – Зенитни угао Сунца |
| G_o | – Хоризонтална компонента космичког зрачења |
| G_{on} | – Нормална компонента космичког зрачења |

| | |
|--------------|--|
| G_{sc} | – Константа соларног зрачења |
| ω_1 | – Часовни угао на почетку временског корака |
| ω_2 | – Часовни угао на крају временског корака |
| k_T | – Индекс прозрачности |
| \bar{G} | – Хоризонтална компонента глобалног зрачења на површини Земље у току временског корака |
| \bar{G}_o | – Хоризонтална компонента космичког зрачења у току временског корака |
| \bar{G}_b | – Директно зрачење |
| \bar{G}_d | – Дифузно зрачење |
| \bar{G}_T | – Глобално соларно зрачење које доспева на површину <i>PV</i> модула |
| ρ_g | – Коефицијент рефлексије за површину тла |
| R_b | – Однос угла директног зрачења на нагнуту површину и угла директног зрачења на хоризонталну површину |
| A_i | – Индекс анизотропије |
| f | – Коефицијент осветљења хоризонта |
| τ | – Соларна пропусност <i>PV</i> поклопца |
| α | – Коефицијент апсорбције топлоте соларног зрачења за <i>PV</i> модул |
| η_c | – Коефицијент електричне ефикасности <i>PV</i> модула |
| G_T | – Количина соларног зрачења која доспева на површину <i>PV</i> модула |
| U_L | – Коефицијент размене топлоте са околином |
| T_a | – Температура околине |
| $NOCT$ | – Номинална погонска температура ћелије (енг. <i>Nominal Operating Cell Temperature</i>) при $G_T = 0.8 \text{ kW/m}^2$, $T_a = 20^\circ\text{C}$ и $\eta_c = 0$ |
| $T_{C,NOCT}$ | – Номинална погонска температура <i>PV</i> ћелије у неком |

| | |
|-----------------|---|
| | временском интервалу |
| $T_{a,NOCT}$ | – Температура околине при којој је дефинисана <i>NOCT</i> |
| $G_{T,NOCT}$ | – Количина соларне енергије при којој је дефинисана <i>NOCT</i> |
| η_c | – Коефицијент ефикасности <i>PV</i> ћелије |
| η_{mp} | – Коефицијент ефикасности <i>PV</i> модула при максималној снази |
| $\eta_{mp,STC}$ | – Коефицијент ефикасности у тачки максималне снаге при <i>STC</i> |
| α_p | – Температурни коефицијент снаге |
| $T_{c,STC}$ | – Температура <i>PV</i> ћелије при <i>STC</i> |
| F | – Часовна потрошња горива у хибридном генератору |
| F_0 | – Коефицијент потрошње горива при максималној снази |
| F_1 | – Коефицијент нагиба криве потрошње горива при стварној снази |
| Y_{gen} | – Максимална (називна) снага хибридног генератора |
| m_{fuel} | – Количина горива у хибридном генератору |
| LHV_{fuel} | – Доња топлотна вредност горива |
| ρ_{fuel} | – Густина горива |
| $c_{om,gen}$ | – Трошкови <i>П&О</i> хибридног генератора |
| $c_{rep,gen}$ | – Трошкови замене хибридног генератора |
| R_{gen} | – Животни век хибридног генератора |
| $c_{fuel,eff}$ | – Цена горива са трошковима загађујућих честица |
| $R_{gen,h}$ | – Радни век хибридног генератора до генералне поправке |
| N_{gen} | – Време погона хибридног генератора у току године |
| $P_{inv,out}$ | – Излазна снага инвертора |
| $P_{rec,out}$ | – Излазна снага исправљача |
| η_{inv} | – Коефицијент ефикасности инвертора |
| η_{rec} | – Коефицијент ефикасности исправљача |

| | |
|---------------------|--|
| P_{DC} | – Наизменична улазна снага |
| P_{AC} | – Једносмерна улазна снага |
| R_{batt} | – Век трајања батерије |
| N_{batt} | – Број батерија у систему |
| $Q_{lifetime}$ | – Пропусна моћ једне батерије у току животног века |
| Q_{thrpt} | – Годишњи проток батерије (укупна количина енергије која кружи кроз батеријски систем у току једне године) |
| $R_{batt,f}$ | – Максимални животни век батерије без обзира на њену пропусност |
| Q_{max} | – Максимална количина ускладиштене енергије |
| Q | – Укупна количина енергије у батеријском резервоару |
| Q_1 | – Распожива енергија у батерији на почетку временског корака |
| Q_2 | – Ускладиштена енергија у батерији на почетку временског корака |
| $Q_{1,end}$ | – Распожива енергија у батерији на крају временског корака |
| $Q_{2,end}$ | – Ускладиштена енергија у батерији на крају временског корака |
| P | – Снага пуњења/пражњења складишта батерије |
| c | – Коефицијент односа капацитета |
| k | – Константа складиштења |
| Δt | – Временски корак |
| $P_{batt,c maxkbm}$ | – Максимална снага пуњења |
| α_c | – Коефицијент максималне брзине пуњења складишта |
| I_{max} | – Максимална јачина струје пуњења складишта |
| V_{nom} | – Номинални напон складишта |
| $\eta_{batt,c}$ | – Ефикасност батерије |
| $Q_{lifetime,i}$ | – Пропусна моћ батерије у току животног века |
| f_i | – Број циклуса |

| | |
|--|---|
| d_i | – Дубина пражњења |
| c_{bv} | – Трошкови трошења батерије |
| $C_{rep,batt}$ | – Трошкови замене батерије |
| TLC_t | – Излазна снага из TLC |
| η_{excess} | – Коефицијент ефикасности конверзије вишка електричне енергије |
| EE_{excess} | – Вишак електричне енергије произведене из OIE |
| $c_{boiler,mar}$ | – Маргинални трошкови бојлера |
| c_{fuel} | – Цена горива |
| $c_{boiler,emissions}$ | – Трошкови емисије загађујућих честица из бојлера |
| η_{boiler} | – Коефицијент ефикасности бојлера |
| $c_{CO_2}, c_{CO},$ $c_{UHC}, c_{PM},$ | – Казне за емисије CO_2 , CO , несагореле угљоводонике (УНС), атмосферске честице (PM), SO_2 и NO_x |
| c_{SO_2} и c_{NO_x} | |
| $\gamma_{CO_2}, \gamma_{CO},$ $\gamma_{UHC}, \gamma_{PM},$ γ_{SO_2} и γ_{NO_x} | – Количине емисија CO_2 , CO , УНС, PM, SO_2 и NO_x |
| $f_{c,fuel}$ | – Садржај угљеника у гориву |
| $f_{s,fuel}$ | – Садржај сумпора у гориву |
| x_{PM} | – Удео сумпора у гориву претвореном у честице |
| P_{ELYZ} | – Електрична снага електролизера |
| η_{ELYZ} | – Електрична ефикасност електролизера |
| A_{htank} | – Аутономија резервоара водоника |
| Y_{htank} | – Капацитет резервоара водоника |
| $L_{prim.ave}$ | – Просечно примарно оптерећење |
| $C_{NPC,tot}$ | – Укупни NPC–трошкови |
| $C_{ann,tot}$ | – Укупни годишњи трошкови система |

| | | |
|---------------|---|---|
| i | – | Реална дисконтна стопа |
| R_{proj} | – | Животни век система |
| $CRF()$ | – | Функција која дефинише фактор поврата капитала |
| i' | – | Номинална дисконтна стопа |
| f | – | Очекивана стопа инфлације |
| N | – | Број година |
| c_{boiler} | – | Маргинални трошкови бојлера |
| H_{served} | – | Укупно тоplotно оптерећење |
| $E_{prim,AC}$ | – | Укупна количина енергије утрошена за напајење примарног АС оптерећења |
| $E_{prim,DC}$ | – | Укупна количина енергије утрошена за напајење примарног ДС оптерећења |
| E_{def} | – | Укупна количина енергије утрошена за напајење одгодивог оптерећења |
| S | – | Сачувана вредност компоненте на крају животног века система |
| R_{rem} | – | Преостало време погона компоненте на крају животног века система |
| R_{rep} | – | Трајање трошкова замене |
| C_{rep} | – | Трошкови замене компоненте |
| R_{comp} | – | Животни век компоненте |
| $INT()$ | – | Функција која даје целобројни износ реалног броја |
| f_{excess} | – | Удео вишка електричне енергије |
| E_{excess} | – | Укупан вишак електричне енергије |
| E_{prod} | – | Укупна производња електричне енергије |
| E_{ren} | – | Електрична енергија произведена из ОИЕ |
| H_{prod} | – | Укупна производња тоplotне енергије |
| H_{ren} | – | Топлота произведена из ОИЕ (укупна количина тоplotне енергије коју производи генератор коришћењем горива из |

| | |
|-----------------|--|
| | ОИЕ) |
| $C_{om,other}$ | – Остали трошкови <i>П&О</i> |
| $C_{om,fixed}$ | – Фиксни трошкови <i>П&О</i> система |
| c_{cs} | – Казна за недостатак капацитета |
| E_{cs} | – Укупни недостатак капацитета |
| $C_{emissions}$ | – Казна за емисију <i>GHG</i> на годишњем нивоу |
| f_{cs} | – Део капацитета који недостаје |
| E_{demand} | – Укупна потражња за електричном енергијом примарног и одложеног оптерећења |
| $c_{be,n}$ | – Трошкови складиштења енергије у временском кораку n |
| $C_{cc,i}$ | – Трошкови циклчног пуњења батерије у временском кораку i |
| $E_{cc,i}$ | – Количина електричне енергије ускладиштене у батерији током временског корака i |
| <i>PEM</i> | – Мембрана за размену протона (енг. <i>Proton Exchange Membrane</i>) |

ПРИЛОГ Г. СПИСАК ТАБЕЛА

| Број табеле | Назив табеле | Број странице |
|----------------|---|------------------|
| Табела 3.1 | Простор претраге која обухвата 17507 конфигурација система ($1 \times 61 \times 1 \times 7 \times 41 = 17507$) | 47 |
| Табела 3.2 | Резултати оптимизације са укупним <i>NPC</i> -трошковима за сваку конфигурацију понаособ | 48 |
| Табела 3.3 | Резултати категоризоване оптимизације | 49 |
| Табела 3.4 | Резултати анализе осетљивости за оптималну конфигурацију система при промени цене дизел горива | 52 |
| Табела 3.5 | Резултати анализе осетљивости оптималне конфигурације за систем <i>PV</i> генератор-дизел генератор-претварач-батерија у случају када је цена дизел горива 1.19 USD/l | 53 |
| Табела 3.6 | Просечне вредности температурног коефицијента снаге за различите типове <i>PV</i> модула | 77 |
| Табела 3.7 | Просечне вредности ефикасности различитих типова <i>PV</i> модула при <i>STC</i> | 77 |
| Табела 3.8 | Животни век различитих типова хибридних генератора | 82 |
| Табела 4.1 | Потражња за електричном енергијом у постојећем систему пастрмског рибњака Јабланица | 103 |
| Табела 4.2 | Потражња за електричном енергијом у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица | 106 |
| Табела 4.3 | Техничке и економске перформансе μXE | 111 |
| Табела 4.4 | Техничке и економске перформансе <i>PV</i> генератора | 113 |
| Табела 4.5 | Перформансе дизел генератора | 116 |
| Табела 4.6 | Својства горива | 118 |
| Табела 4.7 | Перформансе претварача | 119 |
| Табела 4.8 | Перформансе батерије | 120 |
| Табела 4.9 | Перформансе <i>TLC</i> -регулатора | 121 |
| Табела 4.10 | Перформансе <i>PEM</i> електролизера | 122 |
| Табела 4.11 | Перформансе резервоара водоника | 124 |
| Табела 4.12 | Економски улазни подаци | 125 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Табела 4.13 | Могући исходи у вези са расположивошћу електричне и топлотне енергије у ванмрежном хибридном енергетском систему | 127 |
| Табела 5.1 | Снага, укупни <i>NPC</i> –трошкови и укупна годишња производња електричне енергије за појединачне компоненте разматраних конфигурација система у Случајевима 1, 2 и 3 | 135 |
| Табела 5.2 | Максимална излазна снага компоненти система добијена за Случајеве 1, 2 и 3 када је искључен <i>PV</i> генератор или μXE | 141 |
| Табела 5.3 | Емисија <i>GHG</i> | 142 |
| Табела 5.4 | Упоредни приказ добијених резултата и резултата других студија са сличним хибридном енергетским системима μXE - <i>PV</i> генератор-дизел генератор | 142 |
| Табела 6.1 | Конфигурације хибридног система оптимизиране према укупним <i>NPC</i> –трошковима | 145 |
| Табела 6.2 | Емисија <i>GHG</i> из различитих конфигурација хибридног система | 150 |
| Табела 7.1 | Приказ оптималних конфигурација система | 158 |
| Табела 7.2 | Опсег улазних променљивих коришћених у анализи осетљивости за оптималну конфигурацију хибридног система из Случаја 1 | 164 |
| Табела А.1 | Номинални новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију постојећег хибридног система | 197 |
| Табела А.2 | Дисконттовани новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију постојећег хибридног система | 198 |
| Табела Б.1 | Номинални новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију предложеног хибридног система | 199 |
| Табела Б.2 | Дисконттовани новчани ток (USD) за оптималну конфигурацију предложеног хибридног система | 200 |

ПРИЛОГ Д. СПИСАК СЛИКА

| Број слике | Назив слике | Број странице |
|---------------|---|------------------|
| Слика 1.1 | Пројекција промене структуре енергената у производњи: електричне енергије (а) и топлотне енергије (б) | 15 |
| Слика 1.2 | Процењени технички потенцијал <i>ОИЕ</i> у Републици Србији, за 2024. годину | 15 |
| Слика 3.1 | Веза између процеса симулације, оптимизације и анализе осетљивости | 42 |
| Слика 3.2 | Пример резултата часовне симулације | 44 |
| Слика 3.3 | Хибридни систем са $\mu\text{ХЕ}$, <i>PV</i> генератором и дизел генератором | 46 |
| Слика 3.4 | Резултати анализе осетљивости за три променљиве | 51 |
| Слика 3.5 | Соларна ирадијација у функцији од просечног електричног оптерећења за случај оптималне конфигурације система | 55 |
| Слика 3.6 | Концепт резервоара одгодивог оптерећења | 58 |
| Слика 3.7 | Проточна $\mu\text{ХЕ}$ и њени основни делови | 59 |
| Слика 3.8 | Генератор састављен од више <i>PV</i> модула (а) и основни делови (б) | 61 |
| Слика 3.9 | Биогасно постројење са основним деловима | 62 |
| Слика 3.10 | Дијаграм губитака услед трења у цеви кружног попречног пресека | 67 |
| Слика 3.11 | Зависност температуре <i>PV</i> ћелије од снаге, напона и струје | 78 |
| Слика 3.12 | Зависности напона и струје за различите вредности температуре <i>PV</i> ћелије | 78 |
| Слика 3.13 | Кинетички електрохемијски модел батерије за складиштење електричне енергије | 84 |
| Слика 3.14 | Зависност капацитета од струје пражњења за батерију са дубоким пражњењем | 87 |
| Слика 3.15 | Крива животног века трајања батерије | 88 |
| Слика 4.1 | Локација пастрмског рибака Јабланица: преко Google Maps (а) и из птичје перспективе (б) | 101 |
| Слика 4.2 | Базени за узгој и тов рибе (а) и мрестилишта (б) | 102 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Слика 4.3 | Типични дневни профили оптерећења за постојећи систем пастрмског рибњака Јабланица током: радних дана (а) и викенда (б) у месецу јануару | 104 |
| Слика 4.4 | Месечни дијаграми са просечним дневним оптерећењима за постојећи систем пастрмског рибњака Јабланица током радних дана | 105 |
| Слика 4.5 | Типичан дневни дијаграм потрошње електричне енергије у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица током: летњег периода (а) и зимског периода (б) | 107 |
| Слика 4.6 | Приказ годишњег дијаграма оптерећења у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица са дневним и часовним шумом за: електрично (а) и топлотно оптерећење (б) | 108 |
| Слика 4.7 | Типичан дневни дијаграм потрошње топлотне енергије у предложеном решењу за пастрмски рибњак Јабланица током: летњег периода (а) и зимског периода (б) | 109 |
| Слика 4.8 | Сабирни базен са испустом | 110 |
| Слика 4.9 | Цевовод и машинска кућица | 110 |
| Слика 4.10 | Хистограм средње месечних протицаја воде за Радованску реку | 110 |
| Слика 4.11 | Просечне месечне вредности соларног зрачења и индекса прозрачности за град Бољевац | 112 |
| Слика 4.12 | Просечне месечне вредности температуре ваздуха за град Бољевац | 112 |
| Слика 4.13 | Изглед поликристалног <i>PV</i> модула (а) и <i>PV</i> генератор са модулима инсталираним на површини Земље на разматраној локацији (б) | 113 |
| Слика 4.14 | Просечна месечна количина дрвне биомасе | 114 |
| Слика 4.15 | Изглед дизел генератора | 115 |
| Слика 4.16 | Крива потрошње горива дизел генератора (а) и криве ефикасности дизел генератора када се користи: дизел гориво (б); биогаз произведен из отпадног дрвета (в); биогаз произведен из комерцијалног буковог дрвета (г); и водоник (д) | 117 |
| Слика 4.17 | Изглед претварача | 119 |
| Слика 4.18 | Изглед батерије | 120 |
| Слика 4.19 | <i>PEM</i> електролизер (а) и његови основни делови (б) | 122 |
| Слика 4.20 | Резервоар за складиштење водоника | 124 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Слика 4.21 | Методолошки дијаграм тока | 126 |
| Слика 4.22 | LF -стратегија за покривање електричног и топлотног оптерећења | 129 |
| Слика 4.23 | CC -стратегија за покривање електричног и топлотног оптерећења | 130 |
| Слика 5.1 | Вертикални (а) и хоризонтални (б) попречни пресеци μXE на излазу воде из таложног базена (таложника) | 132 |
| Слика 5.2 | Карактеристичне криве перформанси генерисане за: оптимизирани модел пропелерне S-турбине са фиксним лопатицама пропелера и фиксним водећим лопатицама – први тип који одговара Случају 1 (а) и оптимизирани модел пропелерне S-турбине са фиксним лопатицама пропелера и подесивим водећим лопатицама – други тип који одговара Случајевима 2 и 3 (б) | 133 |
| Слика 5.3 | Преглед трошкова за појединачне компоненте у разматраним конфигурацијама система током њиховог животног века за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в) | 137 |
| Слика 5.4 | Просечна месечна производња електричне енергије из μXE , PV генератора и дизел генератора за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в) | 138 |
| Слика 5.5 | Часовне излазне снаге μXE , PV генератора и дизел генератора, и часовна улазна снага батерије за складиштење електричне енергије за: Случај 1 (а), Случај 2 (б) и Случај 3 (в) | 140 |
| Слика 6.1 | Предлог хибридног система за пастрмски рибњак Јабланица | 144 |
| Слика 6.2. | Преглед новчаног тока за оптималну конфигурацију хибридног система током његовог животног века | 147 |
| Слика 6.3 | Просечна месечна производња енергије за поједине компоненте оптималног хибридног система: производња електричне енергије (а) и производња топлотне енергије (б) | 148 |
| Слика 6.4 | Расподела снаге у периоду од 365 дана: токови електричне енергије (а) и токови топлотне енергије (б) | 149 |
| Слика 6.5 | Еколошке перформансе различитих конфигурација хибридног система | 151 |
| Слика 6.6 | Упоредни приказ утицаја OIE и TLC -регулатора на перформансе система | 152 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Слика 6.7 | Кумулативни дисконтовани новчани ток током животног века система | 152 |
| Слика 7.1 | Конфигурација предложеног хибридног система са: <i>CHP</i> дизел генератором на биогаз (а) и <i>CHP</i> дизел генератором на водоник (б) | 154 |
| Слика 7.2 | Приказ трошкова за поједине компоненте у разматраним конфигурацијама система током животног века система за: Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в) | 156 |
| Слика 7.3 | Просечна месечна производња електричне (горњи графикон) и топлотне енергије (доњи графикон) појединих компоненти у оптималном хибридном систему за: Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в) | 157 |
| Слика 7.4 | Излазна снага <i>CHP</i> дизел генератора за: Случај 1 (а); Случај 2 (б); и Случај 3 (в) | 162 |
| Слика 7.5 | Укупна емисија <i>GHG</i> и удео <i>OIE</i> за три разматрана случаја | 163 |
| Слика 7.6 | Утицај просечне количине дрвне биомасе (отпадно дрво) и цене дизел горива на укупне <i>NPC</i> –трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1 | 165 |
| Слика 7.7 | Утицаји цене и просечне количине дрвне биомасе (отпадно дрво) на укупне <i>NPC</i> –трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1 | 166 |
| Слика 7.8 | Утицаји просечне соларне ирадијансе и протока воде у реци на укупне <i>NPC</i> –трошкове за оптималну конфигурацију система из Случаја 1 | 167 |
| Слика 7.9 | Утицаји номиналне дисконтне стопе и очекиване стопе инфлације на укупне <i>NPC</i> –трошкове за оптималну конфигурацију система из Случаја 1 | 168 |
| Слика 7.10 | Утицаји просечног електричног и топлотног оптерећења на укупне <i>NPC</i> –трошкове за случај оптималне конфигурације система из Случаја 1 | 169 |

ПРИЛОГ Ђ. СПИСАК ЈЕДНАЧИНА

| Број једначине | Назив једначине | Број странице |
|-------------------|---|------------------|
| Једначина 3.1 | Номинална снага μXE | 65 |
| Једначина 3.2 | Нето пад | 65 |
| Једначина 3.3 | Процент губитка притиска у цевоводу | 65 |
| Једначина 3.4 | Дарси-Вајсбахова једначина | 66 |
| Једначина 3.5 | Дарсијев фактор трења | 66 |
| Једначина 3.6 | Колбрук-Вајтова формула | 66 |
| Једначина 3.7 | Излазна снага μXE | 67 |
| Једначина 3.8 | Проток воде кроз хидротурбину | 68 |
| Једначина 3.9 | Излазна снага PV генератора | 68 |
| Једначина 3.10 | Излазна снага PV генератора без уважавања температуре | 69 |
| Једначина 3.11 | Деклинација Сунца | 70 |
| Једначина 3.12 | Часовни угао | 70 |
| Једначина 3.13 | Соларно време из локалног времена | 70 |
| Једначина 3.14 | Параметар времена E | 70 |
| Једначина 3.15 | Константа B | 70 |
| Једначина 3.16 | Угао између соларног зрачења и нормале на површину | 71 |
| Једначина 3.17 | Зенитни угао | 71 |
| Једначина 3.18 | Хоризонтална компонента космичког зрачења | 71 |
| Једначина 3.19 | Нормална компонента космичког зрачења | 71 |
| Једначина 3.20 | Хоризонтална компонента космичког зрачења током временског корака | 72 |
| Једначина 3.21 | Индекс прозрачности | 72 |
| Једначина 3.22 | Глобално соларно зрачење | 73 |
| Једначина 3.23 | Хоризонтална компонента укупног глобалног зрачења које пада на PV модул | 73 |
| Једначина 3.24 | Соларно зрачење које пада на површину PV модула | 74 |
| Једначина 3.25 | Однос угла директног зрачења на нагнуту површину и угла директног зрачења на хоризонталну површину | 74 |
| Једначина 3.26 | Индекс анизотропије | 74 |

| | | |
|----------------|---|----|
| Једначина 3.27 | Коефицијент осветљења хоризонта | 74 |
| Једначина 3.28 | Енергетски баланс за <i>PV</i> модул | 74 |
| Једначина 3.29 | Температура <i>PV</i> ћелије добијена из једначине енергетског баланса за <i>PV</i> модул | 75 |
| Једначина 3.30 | Члан $\tau \cdot (\alpha / U_L)$ | 75 |
| Једначина 3.31 | Ефикасност <i>PV</i> ћелије при максималној снази | 75 |
| Једначина 3.32 | Температура <i>PV</i> ћелије | 76 |
| Једначина 3.33 | Линеарна промена ефикасности од температуре <i>PV</i> ћелије | 76 |
| Једначина 3.34 | Температура <i>PV</i> ћелије у неком временском интервалу | 76 |
| Једначина 3.35 | Потрошња горива у функцији од снаге хибридног генератора | 79 |
| Једначина 3.36 | Ефикасност хибридног генератора | 79 |
| Једначина 3.37 | Количина утрошеног горива у хибридном генератору | 80 |
| Једначина 3.38 | Количина утрошеног горива у хибридном генератору ако је јединица за гориво <i>l</i> | 80 |
| Једначина 3.39 | Коефицијент ефикасности хибридног генератора ако је јединица за гориво <i>l</i> | 80 |
| Једначина 3.40 | Коефицијент ефикасности хибридног генератора ако је јединица за гориво <i>l</i> уз уважавање симбола за релативни однос p_{gen} | 80 |
| Једначина 3.41 | Коефицијент ефикасности хибридног генератора ако је јединица за гориво <i>kg</i> | 80 |
| Једначина 3.42 | Прорачун трошкова за хибридни генератор | 81 |
| Једначина 3.43 | Животни век хибридног генератора | 81 |
| Једначина 3.44 | Излазна снага инвертора | 82 |
| Једначина 3.45 | Излазна снага исправљача | 82 |
| Једначина 3.46 | Животни век батерије | 83 |
| Једначина 3.47 | Укупна количина електричне енергије у батерији | 84 |
| Једначина 3.48 | Максимална снага пражњења батерије електричном енергијом у одређеном временском периоду | 85 |
| Једначина 3.49 | Максимална снага пуњења батерије електричном енергијом у одређеном временском периоду | 85 |
| Једначина 3.50 | Резултантна количина расположиве електричне енергије на крају временског корака | 85 |
| Једначина 3.51 | Резултантна количина ограничене електричне енергије на крају временског корака | 85 |

| | | |
|--------------------------|---|----|
| Једначина 3.52 | Ниво напуњености батерије | 86 |
| Једначина 3.53 | Вредност дефинисана једначином 3.49 | 86 |
| Једначина 3.54 | Снага пуњења складишта која одговара максималној брзини пуњења | 86 |
| Једначина 3.55 | Снага пуњења складишта која одговара максималној струји пуњења | 86 |
| Једначина 3.56 | Коефицијент ефикасности батерије | 87 |
| Једначина 3.57 | Пропусна моћ батерије у току животног века | 89 |
| Једначина 3.58 | Трошкови коришћења батерије у зависности од енергије која циркулише кроз њу | 89 |
| Једначина 3.59 | Коефицијент ефикасности <i>TLC</i> -а | 89 |
| Једначина 3.60 | Маргинални трошкови бојлера | 90 |
| Једначина 3.61 | Трошкови емисије загађујућих честица из бојлера | 90 |
| Једначина 3.62 | Коефицијент емисије CO ₂ | 91 |
| Једначина 3.63 | Коефицијент емисије SO ₂ | 91 |
| Једначине 3.64 | Хемијска формула реакције разлагања воде електролизом | 91 |
| Једначине 3.65 и 3.66 | Хемијска формула реакције разлагања воде у киселој средини ($pH = 0$) | 92 |
| Једначине 3.67 и 3.68 | Хемијска формула реакције разлагања воде у алкалној средини ($pH = 14$) | 92 |
| Једначина 3.69 | Производња водоника у електролизеру | 92 |
| Једначина 3.70 | Ниво водоника у резервоару на крају године | 93 |
| Једначина 3.71 | Коефицијент аутономности резервоара водоника | 93 |
| Једначина 3.72 | Укупни <i>NPC</i> -трошкови | 94 |
| Једначина 3.73 | Функција која дефинише фактор поврата капитала | 94 |
| Једначина 3.74 | Реална дисконтна стопа | 95 |
| Једначина 3.75 | Нивелисани <i>COE</i> -трошкови | 95 |
| Једначина 3.76 | Сачувана вредност компоненте на крају животног века система | 96 |
| Једначина 3.77 | Преостало време погона компоненте на крају животног века система | 96 |
| Једначина 3.78 | Трајање трошкова замене | 96 |
| Једначина 3.79 | Удео вишка електричне енергије | 98 |
| Једначина 3.80 | Удео обновљивих извора енергије | 98 |

| | | |
|----------------|--|----|
| Једначина 3.81 | Остали трошкови погона и одржавања | 98 |
| Једначина 3.82 | Удео недостатка капацитета | 99 |
| Једначина 3.83 | Трошкови складиштења електричне енергије | 99 |

Биографија кандидата

Милан (Витомир) Томовић рођен је 02.09.1985. године у Косовској Митровици. Основну школу „Јован Цвијић” и гимназију „Григорије Божовић” завршио је у Зубином Поточу. Основне академске студије Факултета техничких наука у Косовској Митровици, студијски програм Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Електроенергетика, уписао је 2004. године. На истом факултету је дипломирао 2011. године и стекао звање дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства-мастер. Докторске академске студије уписао је школске 2017/2018. године на Факултету техничких наука, Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, студијски програм Електротехничко и рачунарско инжењерство. Још током студирања је показао интересовање за науку и активно учествовао у научно-истраживачком раду. Учествовао је на научно-истраживачком пројекту „Развој модела мале хидроелектране за изоловано напајање рибњака и микромреже са различитим обновљивим изворима енергије” бр. ТР 33046, који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Од септембра 2017. до маја 2019. године, Милан Томовић је на Високој техничкој школи струковних студија Звечан радио као сарадник у настави, док је од маја 2019. до октобра 2021. године радио као асистент. На Академији струковних студија косовско метохијска Одсек Звечан, од октобра 2021. године до данас ради као асистент на групи предмета из уже стручне области Електроенергетика. Аутор је и коаутор већег броја радова објављених у научно-стручним часописима и презентованим на научним скуповима у земљи и иностранству, а коаутор је и једног помоћног уџбеника. Области интересовања Милана Томовића су: обновљиви извори енергије, хибридни системи, оптимизација и енергетска ефикасност.

Прилог 2

Изјава о ауторству

Потписани: Милан Томовић

Број индекса: 6/2017

Изјављујем

да је докторска дисертација под називом

**„Одређивање оптималних техно-економских параметара хибридни
енергетских система за напајање рибњака удаљених од
електродистрибутивне мреже”**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Косовској Митровици,
10.04.2026.

Потпис докторанда

Прилог 3

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора: Милан Томовић

Број индекса: 6/2017

Студијски програм ДАС: Електротехничко и рачунарско инжењерство

Наслов рада: „Одређивање оптималних техно-економских параметара хибридних енергетских система за напајање рибњака удаљених од електродистрибутивне мреже”

Ментор: др Дардан Климента, редовни професор

Потписани: Милан Томовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.

У Косовској Митровици,

10.04.2026.

Потпис докторанда

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици и Национални репозиторијум докторских дисертација унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Одређивање оптималних техно-економских параметара хибридних енергетских система за напајање рибњака удаљених од електродистрибутивне мреже”

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици и Национални репозиторијум докторских дисертација могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Косовској Митровици,
10.04.2026.

Потпис докторанда

1. Ауторство – Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.