



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Марко В. Манчић
МЕТОДОЛОГИЈА ТЕХНО-ЕКОНОМСКЕ
ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ
СИСТЕМА ЗАСНОВАНИХ НА
КОРИШЋЕЊУ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА
ЕНЕРГИЈЕ

Докторска дисертација

Ниш, 2018.

Ментор: Др Драгољуб Живковић, редовни професор, Машински факултет
Универзитета у Нишу

Чланови комисије:

- Др Милан Петровић, редовни професор, Машински факултет
Универзитета у Београду
- Др Мића Вукић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Машински
факултет
- Др Видоје Стефановић, редовни професор у пензији, Природно
математички факултет Универзитета у Нишу
- Др Дејан Митровић, ванредни професор, Машински факултет
Универзитета у Нишу

Датум одбране: ____ / ____ / ____

Наслов: Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије

Резиме: Полигенерациони системи трансформишу доступну примарну енергију у више облика финалне енергије. Велики број постојећих технологија за употребу фосилних и обновљивих извора енергије (ОИЕ) за децентрализовану производњу енергије намеће проблем избора оптималне полигенерационе технологије. На основу истраживања, у раду је представљена методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на употреби ОИЕ за избор технологије, конфигурације и снаге система. Методологија је тестирана применом за оптимизацију реалних објеката: затворених пливачких базена и сточарске фарме. Физички и математички модели динамичког понашања потрошње и производње одговарајућих облика финалне енергије реалних објеката и функција циља полигенерационог система формирану су за тестирање оптимизационих метода. Валидација је вршена мерењима на наведеним реалним објектима. Нумеричко решавање математичких и оптимизационих модела вршено је применом TRNSYS и GenOpt софтверских алата. У раду су тестирани GenOpt оптимизациони алгоритми и изабран је најбољи алгоритам за оптимизацију полигенерационих система.

Кључне речи: полигенерација, техно-економска оптимизација, методологија

Научна област: Машинско инжењерство

Ужа научна област: Термотехника, термоенергетика и процесна техника

УДК: 620.95/.97:502.171]:519.6(043.3)

Title: Methodology for techno-economic optimization of poligeneration systems based on utilization of renewable energy sources

Summary: Polygeneration systems transform available primary energy into different types of final energy. Many available technologies for utilization of fossil and renewable energy sources (RES) for decentralized energy production imply the problem of optimal polygeneration technology. In this paper, a methodology for techno-economic optimisation of configuration and capacity of polygeneration systems based on RES is presented, based on research results. The methodology is tested on two real objects: an indoor swimming pool building and a livestock farm. Physical and mathematical models of dynamic behaviour of demand and supply of final energy of real objects and cost function of polygeneration systems are created for testing optimization methods. Validation is done by real object measurements, while mathematical and optimization models are solved numerically using TRNSYS and Genopt software. GenOpt algorithms were tested during optimisation of real object problems, and the best algorithm for optimisation of polygeneration systems was determined. Based on research results, a general methodology for techno-economic optimization of polygeneration systems based on RES is defined for choosing technology, configuration and capacity of the system.

Key words: polygeneration, techno-economic optimisation, methodology

Scientific area: Mechanical Engineering

Scientific field: Thermoenergetics, thermotechnique and process engineering

UDK: 620.95/.97:502.171]:519.6(043.3)

САДРЖАЈ

1.	УВОД	11
2.	ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИ СИСТЕМИ ЗАСНОВАНИ НА ОИЕ	17
2.1.	Централизована и децентрализована полигенерација	18
2.2.	Полигенерационе технологије.....	21
2.2.1.	Когенерационе технологије	21
2.2.1.1.	Микро гасне турбине	21
2.2.1.2.	Мотори са унутрашњим сагоревањем	23
2.2.1.3.	Стирлинг мотори.....	26
2.2.1.4.	Гориве ћелије.....	27
2.2.2.	Сорпциони расхладни уређаји.....	28
2.2.2.1.	Абсорпциони чилери	29
2.2.2.2.	Адсорпциони чилери	30
2.2.3.	Соларни пријемници.....	31
2.2.3.1.	Равни соларни пријемници (FPC)	32
2.2.3.2.	Вакумски колектори (EPC)	33
2.2.3.3.	Фотонапонски колектори	34
2.3.	Поређење полигенерационих технологија.....	36
2.3.1.	Поређење когенерационих технологија.....	36
2.3.2.	Поређење адсорпционих и абсорпционих технологија	37
2.4.	Поређење главних својстава соларних топлотних пријемника	39
2.5.	Акумулатори топлоте.....	39
2.5.1.	Акумулатори топлоте без промене фазе.....	40
2.5.2.	Акумулатори са чврстим медијумом	40
2.6.	Компресорске топлотне пумпе (ваздух ваздух и земља (вода)- вода).....	422

3.	ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА.....	477
3.1.	Дефинисање проблема оптимизације полигенерационих система	488
3.1.1.	Критеријуми оптимизације	49
3.1.2.	Математички модел оптимизационог проблема.....	50
3.1.3.	Методе решавања проблема оптимизације полигенерационих система.....	52
3.2.	Математичко моделирање и нумеричка симулација полигенерационих система за проблеме оптимизације полигенерационих система	57
3.2.1.	Методе математичког моделирања и нумеричких симулација полигенерационих система.....	57
3.2.2.	Преглед софтвера за математичко моделирање и нумеричке симулације.....	62
3.2.2.1.	ENERGY PRO.....	62
3.2.2.2.	ENERGYPLUS.....	63
3.2.2.3.	HOMER	63
3.2.2.4.	HYBRID2	64
3.2.2.5.	TRNSYS	64
3.2.2.6.	Избор методе и алата за математичко моделирање и нумеричку симулацију и оптимизацију полигенерационих система.....	64
3.2.3.	Методе економске анализе полигенерационих система	66
3.2.3.1.	Економске величине за оцену полигенерационих система	67
3.2.3.1.1.	Трошкови производа полигенерационог система	67
3.2.3.1.2.	Временски период трајања пројекта	69
3.2.3.1.3.	Процена почетне капиталне инвестиције	70
3.2.3.1.4.	Оперативни трошкови полигенерационих система.....	71
3.2.3.1.5.	Извори финансирања.....	73
3.2.3.1.6.	Нето садашња вредност.....	74
3.2.3.1.7.	Трошак животног циклуса	75

3.2.3.1.8.	Период повратка инвестиције.....	76
3.2.3.1.9.	Интерна стопа рентабилности	76
3.2.3.2.	Поређење критеријума за економску оцену полигенерационих система	76
3.2.4.	Економска оцена утицаја на животну средину	77
4.	МЕТОДОЛОГИЈА ТЕХНО-ЕКОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА ЗАСНОВАНИХ НА КОРИШЋЕЊУ ОИЕ ...	80
4.1.	Прикупљање података, идентификација ресурса и одређивање пројектних услова	87
4.2.	Интеграција полигенерационих система	877
4.2.1.	Услови интеграције полигенерационих модула	889
4.3.	Примењена метода математичког моделирања и нумеричке симулације полигенерационих система заснованих на ОИЕ.....	977
4.3.1.	Математичко моделирање и нумеричке симулације применом софтвера TRNSYS....	1055
4.3.2.	Солвер	106
4.3.2.1.	Нумеричка релаксација	107
4.3.2.2.	Имплементација метода сукцесивне апроксимације.....	10909
4.3.3.	Решавање диференцијалних једначина.....	109
4.3.4.	Убрзавање конвергенције	110
4.4.	Математички модели коришћених компонената из библиотеке TRNSYS.....	110
4.4.1.	Туре 2. Диференцијални контролер са хистерезисом	111
4.4.2.	Туре 3: Румпа са променљивим протоком	1122
4.4.2.1.	Математички опис	112
4.4.3.	Туре 56: вишезонска зграда	113
4.4.3.1.	Математички опис	113
4.4.3.1.1.	Топлотна зона.....	113
4.4.3.1.2.	Упаривање	114

4.4.3.1.3.	Добици топлоте радијацијом (за зидове и прозоре)	115
4.4.3.1.4.	Интеграција зидова и прозора	116
4.4.3.1.5.	Метод преносне функције	117
4.4.3.1.6.	Високоталасна радијација	1188
4.4.3.1.7.	Спољашњи зидови	120
4.4.3.1.8.	Укупни добаци са површина у зони	121
4.4.3.1.9.	Инфилтрација, вентилација и конвективно упаривање	121
4.4.3.1.10.	Модел грејања и хлађења	122
4.4.4.	Туре 1. Плочаста соларни пријемник (FPC)	123
4.4.4.1.	Математички опис	124
4.4.5.	Туре 4. Акумулатор топлоте са стратификацијом	125
4.4.5.1.	Математички опис	126
4.4.5.2.	Топлотни губици	127
4.4.5.3.	Струје флуида	127
4.4.6.	Туре 907: Сет мотора са унутрашњим сагоревањем са генератором	130
4.4.7.	Туре 927: Топлотна пумпа вода-вода	133
4.4.8.	Туре 194: Систем фотонапонских колектора	135
4.4.9.	Туре 700: Котао	137
4.4.10.	Туре 909: Адсорпциони чилер	138
4.4.11.	Туре 655: Ваздухом хлађени чилер	140
4.5.	Валидација модела мерењем изабраних величина на реалном објекту	141
4.6.	Примењене методе оптимизације полигенерационих система	143
4.6.1.	Класификација GenOpt оптимизационих проблема	146
4.6.2.	Проблеми са непрекидним оптимизационим променљивим	146
4.6.3.	Проблеми са дискретизованим променљивим	146

4.6.4.	Проблеми са континуалном и дискретном променљивом.....	147
4.6.5.	Општа шаблонска претрага (GPS)	148
4.6.6.	Хук Џивс оптимизациони алгоритам (HJ).....	149
4.6.7.	Оптимизација алгоритмом ројева честица (Particle Swarm Optimization – PSO) ...	151
4.6.8.	PSO за оптимизационе са непрекидним променљивим	1511
4.6.9.	Хибридна метода- (GPS-PSO) Комбинована општа шаблонска претрага и оптимизација методом ројева честица.....	152
5.	ОПТИМИЗАЦИЈА КОНФИГУРАЦИЈЕ И КАПАЦИТЕТА ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ ИЗАБРАНИХ РЕАЛНИХ ОБЈЕКТА.....	154
5.1.	Оптимизација полигенерационог система за потребе јавног објекта затворених пливачких базена	154
5.1.1.	Интеграција суперструктуре полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена	156
5.1.2.	Математичко моделирање затворених пливачких базена	158
5.1.2.1.	Исхлапљивање воде са слободне површине базена	161
5.1.2.2.	Утицај употребе затворених пливачких базена на исхлапљивање	1655
5.1.2.3.	Одређивање коефицијента исхлапљивања реалног објекта	166
5.1.3.	Евалуација резултата	1700
5.1.4.	Нумеричка симулација затворених пливачких базена.....	1711
5.1.5.	Модел суперструктуре полигенерационог система.....	176
5.1.6.	Оптимизација полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена	178
5.1.6.1.	Примењени критеријуми оптимизације	178
5.1.7.	Резултати оптимизације полигенерационог система.....	181
5.2.	Оптимизација полигенерационог система за потребе сточарске фарме	184

5.2.1. Интеграција суперструктуре полигенерационог система за потребе сточарске фарме	187
5.2.2. Математичко моделирање и нумеричка симулација сточарске фарме	189
5.2.2.1. Математичко моделирање и нумеричка симулација енергетског конзума.....	189
5.2.2.1.1. Евалуација резултата.....	191
5.2.2.2. Математичко моделирање суперструктуре полигенерационог система.....	194
5.2.3. Оптимизација полигенерационог система за потребе сточарске фарме	197
5.2.4. Примењени критеријуми оптимизације	198
5.2.5. Резултати оптимизације полигенерационог система.....	200
6. ЗАКЉУЧАК	204
ПРИЛОГ 1 – РЕЗУЛТАТИ GENOPT ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНОГ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ ЗАТВОРЕНИХ ПЛИВАЧКИХ БАЗЕНА.....	226
ПРИЛОГ 2 – РЕЗУЛТАТИ GENOPT ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНОГ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ СТОЧАРСКЕ ФАРМЕ.....	239

1. УВОД

Савремени енергетски системи имају задатак да обезбеде поуздано снабдевање енергијом на енергетски ефикасан, конкурентан и еколошки прихватљив начин. Полигенерациони системи трансформишу енергију једног или више облика примарне енергије у више облика финалне енергије, најчешће топлотне, електричне и расхладне енергије или друге производе. Полигенерациони системи се користе за децентрализовану производњу енергије, ефикаснији су од традиционалних енергетских система за појединачну производњу појединих облика финалне енергије захваљујући интеграцији енергетских процеса и мањим губицима при дистрибуцији енергије. Полигенерациони системи користе фосилна горива или обновљиве изворе енергије (ОИЕ) и различите технологије за трансформацију примарне енергије у потребне облике финалне енергије. Како употреба ОИЕ доприноси одрживости и еколошкој прихватљивости, а технологије за употребу фосилних горива доприносе сигурности снабдевања енергијом и конкурентности, намеће се питање избора оптималне полигенерационе технологије, тј. најбоље конфигурације полигенерационог система за обезбеђивање локалних потреба за финалном енергијом.

Највећа ефикасност полигенерационог система постиже се прецизним уклапањем профила потрошње и производње потребних облика финалне енергије. Уштеда енергије и прихватљивији утицај на животну средину применом полигенерационих система заснованих на ОИЕ има економске импликације на тржишту. Употреба савремених технологија за експлоатацију ОИЕ подразумева веће почетне инвестиције, што намеће питање конкурентности употребе оваквих система. Оптимизација полигенерационих система представља дефинисање њихове конфигурације, пројектних и радних параметара система са циљем смањења трошкова система у граничним условима на минимум. Проблем избора најбоље конфигурације полигенерационог система потребно је вршити на основу техничко-технолошких и економских критеријума, а може се решавати употребом оптимизационих метода.

Резултати истраживања спроведених у оквиру пројекта «Истраживање и развој енергетски и еколошки високо ефективних система полигенерације заснованих на употреби обновљивих извора енергије (2010-2016)», и резултати пројекта «Sustainable development

and competitiveness through increase of the energy efficiency by use of solar energy and smart systems (2013-2014)», показали су да тренутно не постоји комплетна методологија која би омогућила избор најбоље конфигурације ефикасног, економичног и еколошки прихватљивог полигенерационог система. Одавде проистиче предмет истраживања и мотивација за израду овог рада.

Интеграција полигенерационих система врши се ради подмиривања потреба за датим облицима финалне енергије, на основу физичког и математичког модела интегралног енергетског система који чине систем производње и потрошње енергије (енергетски конзум). На основу физичког модела, математичким релацијама са одређеним степеном идеализације, формиран је математички модел енергетског система. Оптимизациони модел чине математички модел, почетни и гранични услови и функција циља. У другој половини прошлог века, коришћени су углавном модели стационарног понашања енергетских система. Данас се користе детаљнији математички модели за представљање динамичког понашања енергетских система, које је могуће решавати нумерички употребом софтверских алата.

Концептуална решења конфигурације сложених енергетских система најчешће су резултат промишљања и искуства, а овако формиране опције се даље испитују математичким моделирањем и симулацијама. Оптимизационе методе линеарног целобројног програмирања (Mixed integer linear programming – MILP), су коришћене у новијим истраживањима за избор оптималне конфигурације полигенерационих система на основу доступних извора енергије, али је ова метода показала низ ограничења. За оптимизацију конфигурације сложених енергетских система са већим бројем независно променљивих параметара користе се еволутивни алгоритми. Општи принципи за избор адекватне методе за интеграцију и оптимизацију полигенерационих система, помоћу које се ефективно и ефикасно долази до прихватљивог решења, до сада нису дефинисани.

Циљ овог рада је дефинисање методологије техно-економске оптимизације конфигурације, снаге и капацитета полигенерационих система заснованих на ОИЕ. Применом дефинисане методологије добија се решење којим се дефинише технологија и снага оптималног полигенерационог система на основу успостављених технолошких, економских и еколошких критеријума. У раду је представљена методологија са алгоритмом

техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на употреби ОИЕ уз одговарајуће претпоставке и ограничења.

У раду се разматра употреба ОИЕ погодних за децентрализовану производњу различитих облика финалне енергије. Утицај климатских прилика на потрошњу енергије и расположивост соларне и геотермалне енергије се разматра за дату локацију, за типичну метеоролошку годину. За потребе развоја и валидације методологије у овом раду коришћена су два реална објекта (објекат затворених пливачких базена и сточарска фарма), код којих постоје потребе примене више облика финалне енергије. На основу стања реалног објекта, формиран је физички и математички модел потрошње и производње одговарајућих облика финалне енергије као интегрални модел енергетског система, који описује динамичко понашање система у току типичне метеоролошке године. Решавање математичког модела интегралног система вршено је нумерички, употребом софтверског алата TRNSYS. Валидација модела потрошње финалне енергије је вршена на основу прикупљених и измерених података о потрошњи финалне енергије два одабрана реална објекта, Затворени пливачки базени Спортско рекреативног центра „Дубочица“ у Лесковцу и пољопривредна интегрисана фарма свиња „Халово“ код Зајечара. Валидација модела полигенерационих система, њихових компонената и њиховог понашања у току рада вршена је на основу података произвођача опреме и података из доступне стручне литературе. За наведене реалне објекте, формиран су физички и математички модели који дефинишу понашање ових објеката као енергетских конзума. За потребе овако дефинисаног конзума, извршено је моделирање полигенерационог система модуларне структуре. Симулацијом моделираног полигенерационог система у спрези са моделом конзума, врши се провера да ли и у којој мери анализирана конфигурација полигенерационог система може да задовољи моделиране потребе конзума. Моделирање и симулација годишњег понашања конзума и полигенерационог система вршена је применом софтвера TRNSYS.

За потребе оптимизације полигенерационог система, користе се резултати симулације понашања полигенерационог система у спрези са анализираним конзумом. Трагање за најбољом конфигурацијом вршено је на основу критеријума успостављених формираном функцијом циља, на основу вредности функције циља добијене за анализирани конфигурације полигенерационог система у задатом опсегу снага. Критеријуми коришћени

за дефинисање функције циља оптимизације су динамичка економска оцена полигенерационог система као инвестиционог пројекта, потрошња примарне енергије и смањење емисије CO₂. Оптимизационе променљиве су одабране тако да дефинишу конфигурацију и утичу на нумеричку вредност функције циља: технологију, капацитет, перформансе система. Почетни и гранични услови оптимизационог модела су одређени на основу локално расположивих енергетских ресурса, термодинамичких услова и услова расположивости. Решавање оптимизационог проблема вршено је применом GenOpt софтвера.

У раду је извршено поређење резултата техно-економске оптимизације полигенерационих система добијених применом изабраних GenOpt алгоритама. На основу резултата оптимизације применом различитих алгоритама изабрана је оптимизациона метода која обезбеђује глобално решење дефинисаног оптимизационог проблема.

У оквиру овог рада, извршен је преглед литературе о полигенерационим системима, проблемима интеграције њихове конфигурације, физичком и математичком моделирању и оптимизацији њихове конфигурације и производних капацитета. Преглед изабраних полигенерационих технологија и њихових карактеристика, предности и недостатака представљен је у поглављу 2. Методе техно-економске оптимизације, математичког моделирања и симулације полигенерационих система представљени су у поглављу 3. У оквиру овог поглавља посебна пажња посвећена је методама економске анализе полигенерационих система и проблемима интеграције технолошки могуће конфигурације полигенерационих система.

На основу прегледа и упоредне анализе могућности за математичко моделирање, симулацију и оптимизацију сложених енергетских система софтверски алат TRNSYS је одабран као најпогоднији за математичко моделирање и нумеричке симулације понашања полигенерационих система заснованих на ОИЕ, док се проблеми техно-економске оптимизације решавају спрегом овог софтвера са GenOpt оптимизационим алатом. GenOpt оптимизациони алат је изабран због поузданости и компатибилности са изабраним симулационим софтвером. Резултати упоредне анализе перформанси одабраних софтверских решења представљени су у поглављу 3. У поглављу 4 описана је методологија и приказан алгоритам техно-економске оптимизације полигенерационих система

заснованих на ОИЕ. Посебна пажња посвећена је дефинисању услова интеграције полигенерационих система, примењеним методама математичког моделирања и нумеричких симулација и дефинисања критеријума оптимизације и функције циља.

За наведене објекте, у раду су формиран физички и математички модели потрошње финалне енергије, чије су нумеричке симулације вршене употребом софтвера TRNSYS (поглавље 5). Ради валидације формираних симулационих модела, на одабраним објектима је извршено прикупљање података о потрошњи финалне енергије, као и мерења одабраних величина у складу са техничким могућностима на датој локацији. На тај начин је извршено повећање прецизности формираних модела. Применом описане методе математичког моделирања енергетских система, добијени су профили промене потрошње финалне енергије, промена понашања постојећих енергетских система у датим објектима, тренутна потрошња горива, емисија гасова са ефектом стаклене баште и трошкови снабдевања енергијом.

На основу дефинисаних локалних потреба и доступних ресурса, формиране су технички могуће опције различитих конфигурација полигенерационих система заснованих на употреби ОИЕ приказаних у поглављу 5. Затим је формиран и оптимизациони проблем за разматране објекте. За формиране моделе, одабране су независно променљиве које дефинишу конфигурацију, технологију, и производни капацитет моделираног полигенерационог система, као и зависно променљиве које утичу на радне перформансе наведеног система. Дефинисани оптимизациони проблем зависи посредно од термодинамичких и еколошких критеријума и директно од техничко-технолошких и економских критеријума рентабилности капиталне инвестиције полигенерационих система. Решавање формираног оптимизационог проблема извршено је применом GenOpt оптимизационог софтвера. За решавање проблема примењене су следеће оптимизационе методе:

- 1) Општа шаблонска претрага (General Pattern Search- GPS)
- 2) Хук-Џивс алгоритам (Hooke Jeeves Algorithm –HJ)
- 3) Оптимизација методом ројева честица (Particle Swarm Optimization – PSO)
- 4) Хибридна метода (GPS-PSO) - комбинована општа шаблонска претрага и оптимизација методом ројева честица

Извршена је упоредна анализа добијених резултата применом ових метода, на основу брзине конвергенције сваке од метода и разлика у добијеним решењима. На основу резултата, изабрана је најбоља метода чијом применом се долази до задовољавајућег решења проблема оптимизације конфигурације и капацитета полигенерационих система заснованих на употреби ОИЕ. Као критеријум за избор коришћена је брзина конвергенције оптимизационог алоритма и квалитет решења.

Мишљење аутора је да се метода може применити за решавање проблема техно-економске оптимизације конфигурације и капацитета полигенерационих система намењених за подмирење потреба финалне енергије и других објеката.

У оквиру истраживања чији су резултати приказани у овом раду коришћене су следеће методе:

1. Примена методе математичког моделирања енергетских система;
2. Математичко моделирање економских критеријума за евалуацију нивелисаних инвестиционих и експлоатационих перформанси енергетских система са алокацијом трошкова у току животног циклуса постројења;
3. Математичко моделирање техно-економских критеријума оптимизације;
4. Математичко моделирање функције циља техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на ОИЕ;
5. Валидација математичког модела применом мерења на реалном објекту;
6. Коришћење нумеричких метода за решавање формираних математичких модела употребом софтверских алата TRNSYS и GenOpt;
7. Примена и поређење GenOpt оптимизационих метода ради избора најбоље методе за проблеме оптимизације полигенерационих система.

Резултати спроведеног истраживања су искоришћени за развој алгоритма методологије техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на примени ОИЕ.

2. ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИ СИСТЕМИ ЗАСНОВАНИ НА ОИЕ

Полигенерациони систем се може дефинисати као систем за комбиновану производњу два или више енергетских производа или материјалних производа у оквиру јединственог интегрисаног процеса [1]. Енергетски производи полигенерационог система су најчешће топлотна, расхладна и електрична енергија (тригенерација), али, у зависности од локалних ресурса и примењених технологија и локалних потреба, то могу бити и материјални производи попут биогорива, воде, метанола и других једињења. Полигенерациони системи су способни да трансформишу енергију једног или више извора како би подмирили локалне потребе за финалном енергијом [2]. Појам „полигенерација“ у смислу система који треба да подмири више услуга се развио временом од иницијално прихваћеног израза „когенерација“ (комбинована производња топлотне и електричне енергије) и тригенерација (комбинована производња топлотне, расхладне и електричне енергије), које је првобитно предложио Џенерал Електрик (General Electric) [3]. Комбинована производња топлотне и електричне енергије представља првобитни приступ интеграцији енергетских процеса, при чему су интегрисани процеси производње топлотне и електричне енергије, тако да у режиму когенерације постоји употреба топлотне енергије која би иначе била неискоришћена предата околини. Даљом интеграцијом процеса, могу се подмирити и друге локалне потребе применом јединственог интегрисаног полигенерационог система.

На основу доступних резултата истраживања и анализе мноштва доступних енергетских технологија, у будућности би могли да буду од посебног значаја свемирски соларни системи за земаљску производњу електричне енергије, соларне технологије, гориве ћелије и нуклеарна енергија [4]. Ипак, неке од ових технологија су још увек у раним фазама развоја те је потребно доста времена и истраживања како би њихов потенцијал дошао до изражаја на светском енергетском тржишту. Ефективна решења огледају се у пажљивом планирању, анализи потребних облика и количина енергије на различитим локацијама и у правилној интеграцији процеса са употребом локалних производних капацитета путем паметних мрежа на либерализованом енергетском тржишту [4]. Ефективним и ефикасним решењем локалног подмиривања енергетских потреба може се сматрати управо примена полигенерационих система за истовремено грејање, хлађење и производњу електричне енергије или подмиривање других потреба [5, 6]. Применом интегрисаних система, постиже се исти ефекат као и применом конвенционалних технологија, на ефикаснији начин.

Интеграцијом процеса, применом „зрелих“ енергетских технологија, применом обновљивих извора енергије, пажљивим планирањем полигенерационих система, може се остварити ефикаснија употреба постојећих ресурса у ближој будућности. На овај начин се може постићи значајно побољшање укупне ефикасности и смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште са једне стране, а смањују се губици и трошкови дистрибуције енергије са друге стране. Полигенерациони системи подразумевају комбинацију конвенционалних и нових технологија за грејање и хлађење, производњу електричне енергије и других нуспроизвода.

Најједноставнији полигенерациони систем, заправо подразумева тригенерацију, тј. систем за комбиновану производњу електричне, топлотне и расхладне енергије. У погледу снабдевања енергијом, највећа потрошња енергије модерног друштва, а самим тим и највеће потребе су: енергија за грејање, хлађење и електрична енергија. Зато се може очекивати шире постојање могућности примене тригенерационих система, у односу на сложеније полигенерационе системе где постоји производња додатних, најчешће материјалних, производа.

Полигенерациони систем чине полигенерациони модули који применом одговарајуће технологије врше трансформацију енергије или материје. Рад већине полигенерационих модула је међусобно завистан, при чему је често излазни „производ“ једног полигенерационог модула или нуспроизвод рада неког од полигенерационих модула заправо неопходан за „погон“ наредног полигенерационог модула. Како се ради о сложеним енергетским системима, поменути „производи“ су најчешће енергетског карактера, при чему је у том случају квалитет производа дефинисан величинама стања радног медијума.

Полигенерациони системи могу се сматрати и тзв. дистрибуираним енергетским системима [7], изграђених ближе потрошачима, са могућношћу дистрибуције локално произведене енергије, при чему се услови дистрибуције најчешће дефинишу законским путем [8], а њиховом применом се могу избећи проблеми поузданости и дистрибуције енергије, што је обично значајно у периодима са максималним оптерећењем „мреже“.

2.1. Централизована и децентрализована полигенерација

Конфигурација полигенерационих система може бити централизована и децентрализована [9]. У овом раду се разматра примена децентрализованих

полигенерационих система за потребе једног објекта (потрошача), при чему су енергетске потребе дефинисане пре свега потрошњом топлотне, расхладне и електричне енергије.

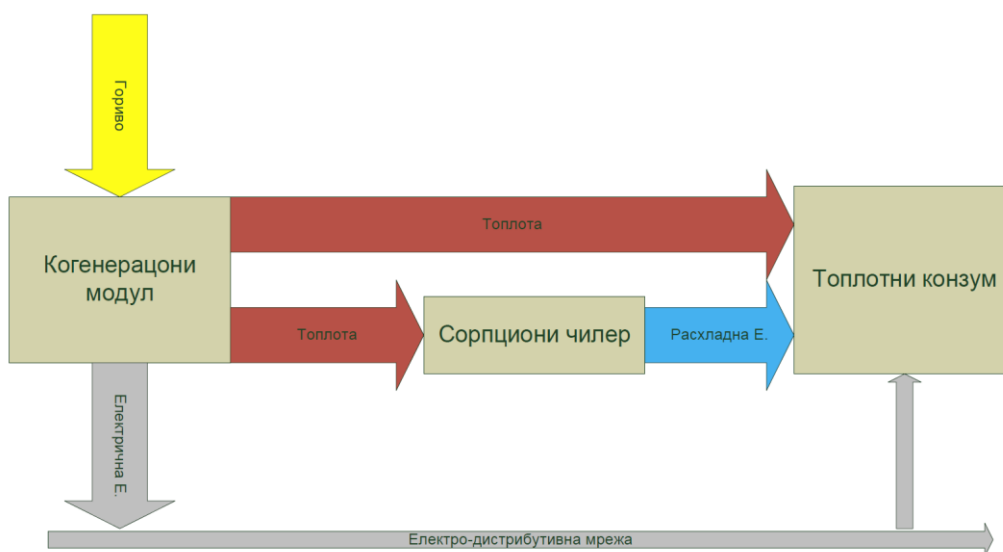
Постоје 3 могуће конфигурације система [9]:

(1) Децентрализован систем (слика 1), где се топлотна и расхладна енергија генеришу локално, док се електрична енергија користи локално или напаја мрежу;

(2) Централизована производња топлоте и електричне енергије (когенерација) са децентрализованим хлађењем (слика 2), где се топлота и електрична енергија производе централно и врши се њихова дистрибуција до крајњих корисника, а топлотом погоњени чилери обезбеђују хлађење локално; и

(3) Централизовани систем (слика 3) где се грејање, хлађење и електрична енергија производе централно одакле се врши дистрибуција до крајњих корисника.

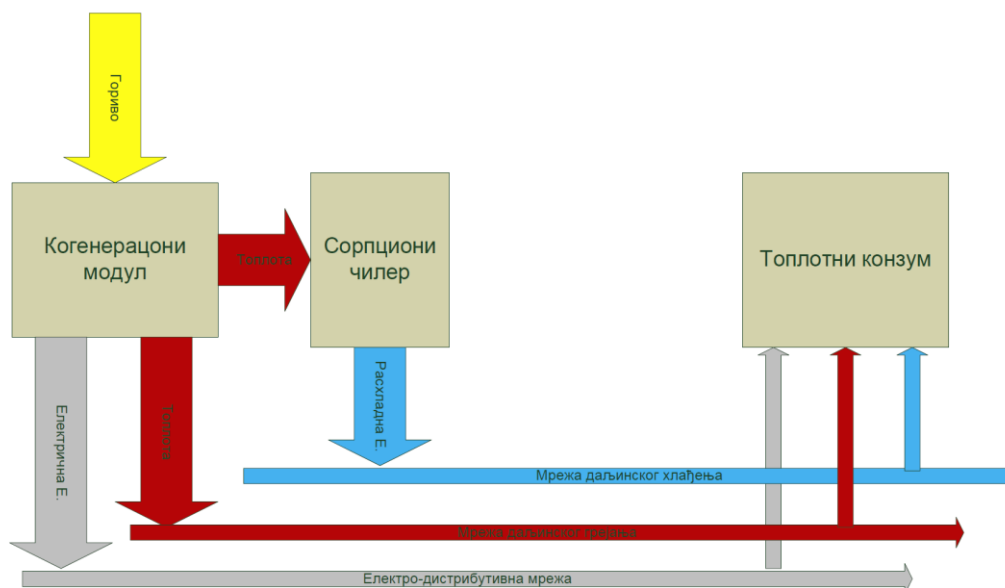
Главна предност децентрализоване конфигурације је у томе што топлоту за грејање и хлађење није потребно транспортовати, што значи смањење трошкова и губитака у дистрибуцији. Предност централизоване конфигурације је што побољшава ефикасност грејања, хлађења и производње електричне енергије, али истовремено захтева и велика почетна улагања, јер мреже за даљинско грејање и хлађење морају бити инсталиране како би се извршила њихова дистрибуција до крајњих корисника [9].



Слика 1. Децентрализована полигенерација



Слика 2. Централни систем са децентрализованим хлађењем



Слика 3. Централизовани систем

Предмет истраживања обухваћен овим радом ограничен је на анализу оптималне конфигурације и капацитета децентрализоване полигенерације са употребом обновљивих извора енергије и могућношћу размене електричне енергије са националном електродистрибутивном мрежом, у складу са важећим прописима [8, 10].

2.2. Полигенерационе технологије

У овом поглављу дат је краћи приказ главних карактеристика полигенерационих технологија и њихових специфичности, које дефинишу услове интеграције.

2.2.1. Когенерационе технологије

Когенерациони модул је уређај за продукцију електричне и топлотне енергије који користи примарни енергент, најчешће природни гас и течна или гасовита гориво добијено из биомасе. Модул се састоји од електро-генератора, мотора (гасно-турбински блок, мотор са унутрашњим сагоревањем, Стирлинг мотор, горива хелија) и система за регенерацију (рекуперацију) топлоте. Рекуперација топлоте се може спроводити коришћењем топлоте издувних гасова и топлоте добијене у систему хлађења мотора и генератора. Преглед когенерационих технологија за стамбене објекте може се пронаћи у литератури [11, 12, 13].

2.2.1.1. Микро гасне турбине

Микро гасне турбине су због својих малих димензија врло повољне за употребу у микротригенерацији [13]. Данашње конструкције микротурбина (гасно турбинског блока) праве се са излазном снагом у распону од 15 до 300 kW. Микротурбински модули за тригенерацију имају бројне предности у односу на остале технологије мале снаге. Пружају могућност поузданог напајања, коришћења на удаљеним локацијама и примене у периодима вршних оптерећења. Предности примене модула микротурбина у односу на клипне моторе са унутрашњим сагоревањем (СУС) су: величина, мала тежина, мањи број покретних делова и мањи ниво буке [9]. Гасне турбине у односу на моторе СУС имају бољи квалитет отпадне топлоте, мање потребе за одржавањем и мањи ниво буке и вибрација [9]. Ипак, код система мањих снага, мотори СУС имају бољу ефикасност [5, 11, 12]. Остале предности су једноставније одржавање, дужи радни век, већа ефикасност, мања емисија гасова који изазивају ефекат стаклене баште као и бржи старт. У свом раду не захтевају систем за хлађење. Недостаци ове технологије су високи инвестициони трошкови и ограничена могућност употребе отпадне топлоте ниже температуре. Висока температура излазних гасова из микротурбине може се користити у различитим ситуацијама, као што су директни процеси сушења и грејања, па све до система за хлађење укључујући апсорпциони

систем. Ултра микро гасне турбине су малих снага до 3 kW и степена корисности до 40 % [13, 14]. Карактеристике микро гасних турбина приказане су у табели 1.

Табела 1. Карактеристике микро гасних турбина [9]

Оспег снага [kWe]	0,003 - 300
Однос снаге и колич. топлоте	0,55
Електрична ефикасност [%]	15-35
Топлотна ефикасност [%]	40-60
Укупна ефикасност [%]	60-85
Тип горива	Природни гас, течна горива

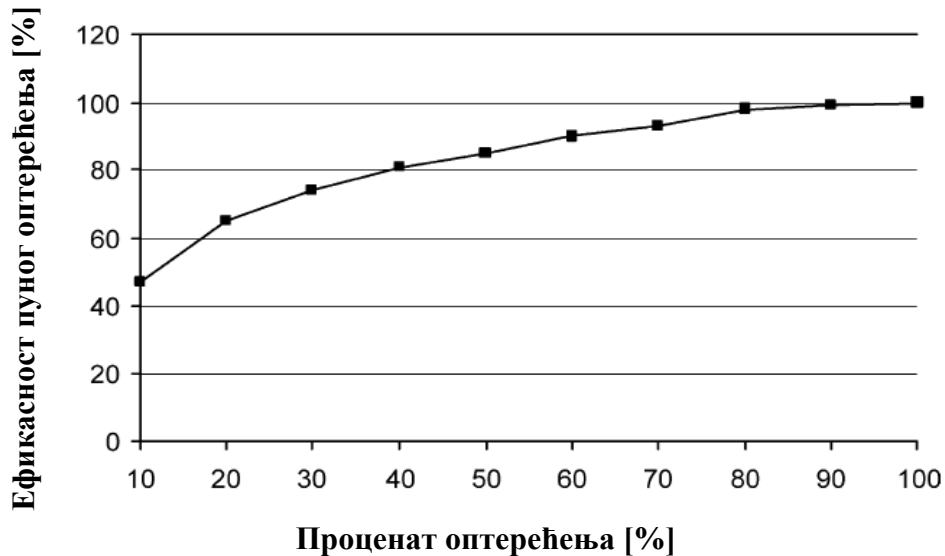
Микро гасне турбине имају ефикасност производње електричне енергије од око 30 %, могућност коришћења више врста горива, а ефикасност когенерационог система са микро гасном турбином иде и преко 80 % [11 - 14]. Распољивост микро гасних турбина се креће од 90 -95 %. Код микро гасних турбина се користи рекуператор топлоте који значајно доприноси бољој ефикасности уређаја. Рекуператори се израђују од нерђајућег челика (хром-никл) за радне температуре до 650 °С, и од специјалних керамичких материјала за температуре преко 850 °С [5, 11]. Перформансе неких комерцијално доступних микро гасних турбина дате су у табели 2 [13, 14].

Табела 2. Главне карактеристике когенерационих система са микротурбином [13, 14]

	Capstone 330	IR energy systems 70LM (два вратила)	Turbec T100
Номинална електрична снага [kW]	30	70	100
Електрична ефикасност [%]	23,4	25,2	27,0
Проток издувних гасова [kg/s]	0,32	0,46	0,74
Температура гасова на излазу из размењивача топлоте [°C]	150	130	131
Капацитет грејања [kW]	64	108	163
Укупна ефикасност [%]	73	64	71
Однос снаге и топлоте	0,47	0,65	0,62

Напомена: приказане ефикасности добијене су на основу горње топлотне моћи

Излазна снага турбине се контролише променом масеног протока на улазу (смањењем броја обртаја компресора) и променом температуре на улазу у турбину. Са смањењем снаге на излазу, смањује се и ефикасност [13, 14]. Крива промене ефикасности микро гасне турбине од 30 kW приказана је на слици 4.



Слика 4. Ефикасност микро гасне турбине у функцији оптерећења [14]

Издувни гасови микро гасне турбине су извор топлоте која се користи у когенерационом постројењу. Могућа је производња паре или топле воде, у зависности од локалних потреба. Иако употреба рекуператора топлоте повећава ефикасност производње електричне енергије, смањује се доступна количина топлоте за потребе грејања.

Употребом микро гасних турбина, могуће је постићи веома ниске емисије издувних гасова. Ипак, ниске емисије се јављају при раду у номиналном режиму, а повећавају се са смањењем оптерећења. Главни загађивачи су NO_x , CO , несагорели угљоводоници, и занемариво мале количине SO_2 .

2.2.1.2. Мотори са унутрашњим сагоревањем

Клипни мотори са унутрашњим сагоревањем (СУС) су погодни за мале системе за потребе стамбених објеката због своје компактности и зрелости технологије. Доступни су у широком опсегу снага од свега пар [kW] па до преко 10 MW [15]. Мотори са унутрашњим сагоревањем представљају технологију која је тренутно најраспрострањенија на тржишту. Ефикасност производње електричне енергије се креће од 27 % (за мале уређаје) па до преко

40 % (за средње и велике снаге). Њихова класификација је извршена према начину паљења гориве смеше на моторе са паљењем варницом и са самопаљењем.

Мотори са самопаљењем су засновани на Дизел циклусу. Генерално, мотори са самопаљењем имају бољу ефикасност од мотора код којих се паљење врши варницом (око 3 - 4 % више), нарочито за моторе малих димензија.

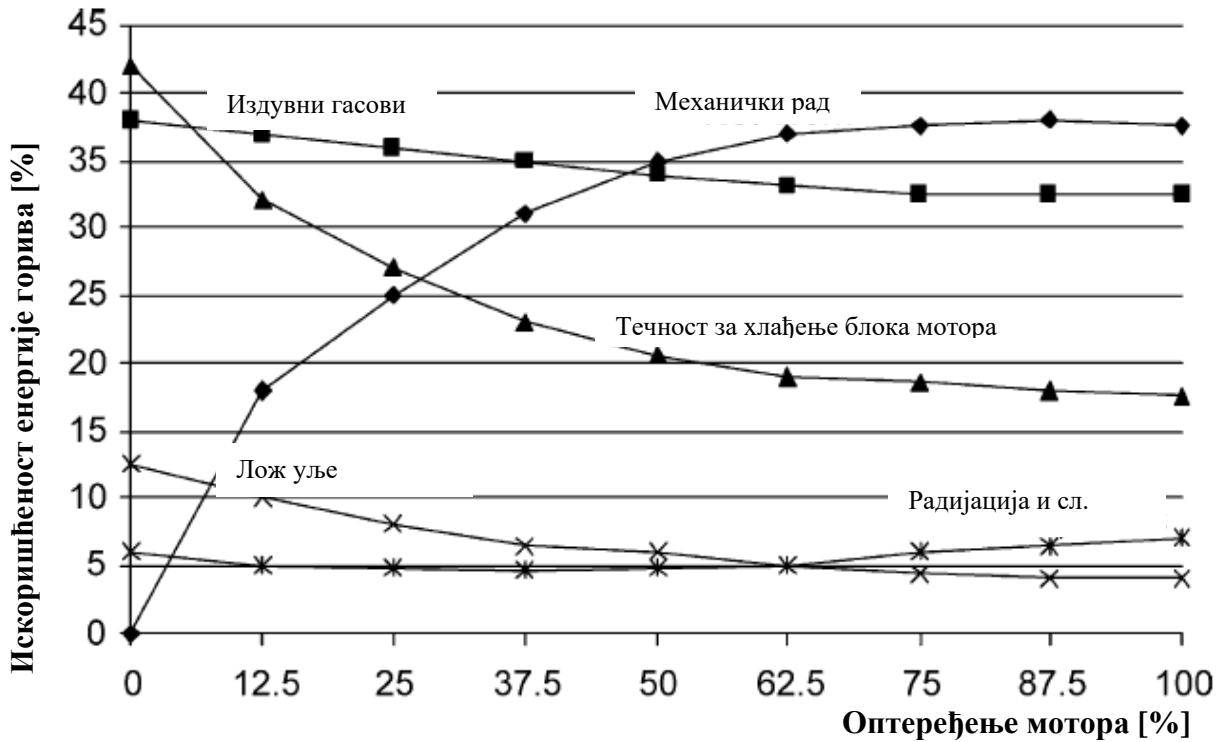
У опсегу малих снага (< 100 kW_e) користе се мотори превасходно дизајнирани за Отто циклус. Они имају ниску ефикасност и краћи радни век. Захваљујући нижим инвестиционим трошковима, они се користе за снаге мање од 30 kW те су погоднији за мање когенерационе (тригенерационе) системе. Отпадна топлота код оваквих уређаја може користити за добијање температуре радног медијума и до 160 °C и притиска паре до 20 bar [11, 15]. У системима когенерације, обично раде на природни гас, иако се може користити и пропан бутан (ТНГ), бензин, биогас или депонијски гас. Главни недостатак је неизоставна појава буке и вибрација која се донекле решава инсталацијом кућишта са заштитом од буке.

Од когенерационог система се очекује велики број радних сати у току године, ако је могуће и непрекидан рад како би њихов рад био исплатив. У табели 3 и 4 дате су главне карактеристике мотора са унутрашњим сагоревањем [9, 11].

Табела 3. Мотори са унутрашњим сагоревањем [9]

Оспег снага [MWe]	0,005 - 6
Однос топлоте и мех. енергије	0,75
Електрична ефикасност [%]	25-45
Топлотна ефикасност [%]	40-60
Укупна ефикасност [%]	70-95
Тип горива	Природни гас, течни нафтни гас и течна горива

Клипни мотори са унутрашњим сагоревањем у оквиру когенерационих постројења се обично користе у комбинацији са синхроним генератором [11], што подразумева производњу електричне енергије напона и фреквенције у дозвољеном опсегу, тј. са приближно истим параметрима које захтева електродистрибутивна мреже. На слици 5 приказане су перформансе мотора са паљењем помоћу варнице који показују криву потрошње горива у [g/kWh]. Количина топлоте доступне из расхладне воде блока мотора и издувних гасова се повећава са смањењем ефикасности производње електричне енергије [5, 11].



Слика 5. Топлотни биланс клипног мотора СУС [11]

Топлота доступна хлађењем течности за хлађење блока мотора представља око 30 % доведене енергије, док топлота издувних гасова чини 30 - 50 %. Температура воде за хлађење блока мотора је обично 85 - 90 °С, док је температура ваздуха за хлађење (или паре ниског притиска) 100 - 120 °С, што се може користити као топлота за потребе топоводног грејања, производњу паре ниског притиска, припрему санитарне топле воде или за хлађење применом сорпционих уређаја. [11].

Табела 4. Карактеристике мотора са унутрашњим сагоревањем у оквиру когенерационог система [11]

	Без искоришћења отпадне топлоте [%]	Са искоришћеном отпадном топлотом [%]
Механички рад	35	35
Неповратна топлота	65	21
Топлота доступна за коришћење	0	44
Укупна корисна енергија	35	79

Главни утицај мотора на животну средину огледа се у саставу издувних гасова, који се углавном односе на азотне оксиде (NO_x), уљенмоноксид (CO) и разна органска једињења и

волатиле, док оксиди сумпора и загађујуће аеросоли и чврсте честице зависе од врсте горива.

2.2.1.3. Стирлинг мотори

Иако није у питању нова технологија, Стирлинг мотори немају широку примену. Ипак, Стирлинг мотори имају добар потенцијал за употребу за различите потребе, захваљујући способности да постигну високу ефикасност, флексибилни су у погледу горива, имају ниске емисије, низак ниво буке и вибрација и добре перформансе при делимичним оптерећењима. За разлику од мотора са унутрашњим сагоревањем, топлота која се користи потиче од екстерног извора, што нуди могућност употребе великог броја извора енергије укључујући и фосилна горива и обновљиве изворе енергије попут соларне енергије или биомасе. Процес сагоревања се одвија ван самог мотора, а у питању је добро контролисани континуирани процес сагоревања, и продукти сагоревања не улазе у мотор [11]. Како имају мање покретних делова од мотора СУС имају мирнији рад и имају дуже интервале одржавања од мотора СУС [11].

Стирлинг мотор ради тако што користи екстерни извор топлоте и екстерни понор топлоте, од којих се сваки одржава у ограниченем температурном опсегу са довољном температурном разликом између њих [11]. Према концепту спољашњег сагоревања, стирлинг мотори имају мале захтеве у погледу квалитета горива. Ефикасност производње електричне енергије је око 10- 35 % (табела 5). Тренутно је мали број Стирлинг мотора у употреби и технологија није још увек потпуно развијена. Због тога постоји недостатак статистичких података везаних за поузданост и доступност. Ипак, технологија има потенцијал да ради са малим нивоима емисија, малим вибрацијама и нивоима буке и има мале захтеве у погледу одржавања [9].

Стирлинг мотори су двотактни, а сагоревање је константно. Ово доприноси њиховом мирном и „глатком“ раду. Стирлинг мотори имају потенцијал за достизање релативно високих ефикасности у поређењу са ефикасностима код уређаја чије се рад заснива на Карноовом циклусу и Џуловом циклусу [11]. Очекивана ефикасност производње електричне енергије је око 50 %, док се данас достиже вредност од око 40 % . Укупна ефикасност когенерационих система са Стирлинг мотором је 65-85 %, а однос снаге и доступне количине топлоте је 1,2 – 1,7. Стирлинг мотори имају одличне радне

карактеристике при раду са делимичним оптерећењима. Очекивана расположивост би требала да буде 80 - 90 % [11]. Температуре гаса на излазу из предгрејача гаса су између 200 и 300 °C пре уласка у размењивач топлоте за издувне гасове, да би на изласку из размењивача пала на 30 °C, што је изнад температуре воде за хлађење на улазу [9]. Емисије Стирлинг мотора су ниже и до 10 пута него код мотора СУС [9].

Табела 5. Стирлинг мотори [9]

Оспег снага [MWe]	0,003-0,1
Однос снаге и колич. топлоте	1,2-1,7
Електрична ефикасност [%]	10-35
Топлотна ефикасност [%]	40-80
Укупна ефикасност [%]	>90
Тип горива	Сва горива

2.2.1.4. Гориве ћелије

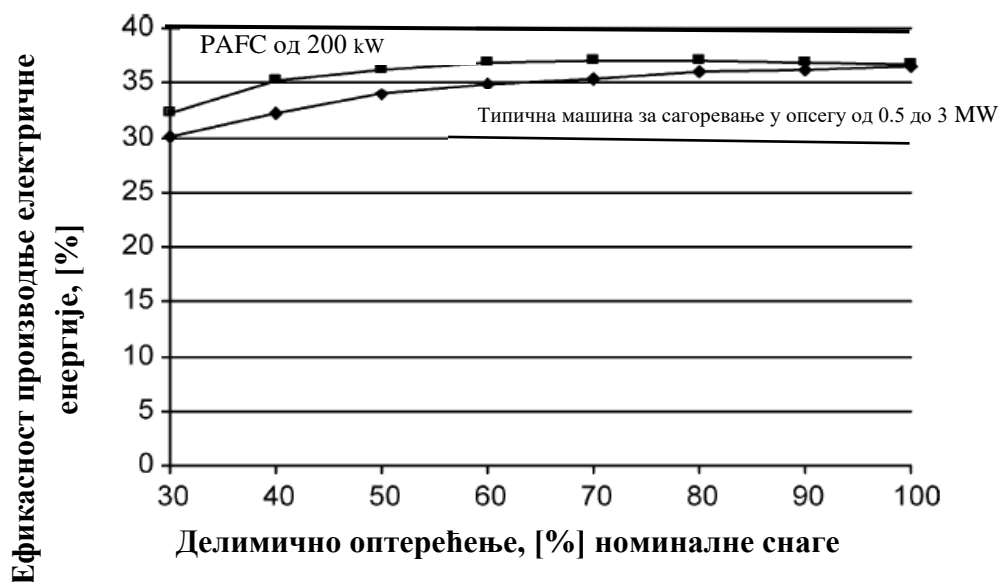
Гориве ћелије генеришу електричну енергију путем електрохемијског процеса у којем се енергија ускладиштена у горивој ћелији претвара директно у једносмерну струју [7]. С обзиром на то да се електрична енергија генерише без сагоревања горива, гориве ћелије су изузетно атрактивне с тачке гледишта заштите околине.

Гориве ћелије производе електричну енергију користећи спољашњи довод горива (са стране аноде) и оксиданса (са стране катоде). Они реагују у присуству електролита. Реактанти улазе а продукти реакције излазе док електролит остаје у горивој ћелији. Многе комбинације горива и оксиданса су могуће. Када је у питању њихова апликација у тригенерационим системима, углавном се користе гориве ћелије са мембраном са разменом протона (PEM – proton exchange membrane) и са чврстим оксидом (SO – solid oxide). Горивим ћелијама је могуће постићи ефикасност производње електричне енергије од 50[%], са ниском стопом емисије [9]. Недостатак горивих ћелија је њихова осетљивост на микро честице, тако да гориво често треба додатно припремити. Одлучујући фактор је висока цена инвестиција у поређењу са обичним моторима [11].

Главне предности су низак ниво буке, ниска стопа одржавања, одлично понашање са смањењем оптерећења, ниске емисије, и потенцијал за добијање укупне ефикасности у

режиму когенерације од 85-90 %, чак и са уређајима мањих снага, а највећи недостатак је висока цена и мали век трајања [11]. Принцип рада подразумева реакцију водоника и кисеоника у присуству електролита за добијање електричне енергије без сагоревања и производње механичког рада. Вода и топлота су нуспроизводи процеса. Водоник који се користи као гориво, може се добити из природног гаса, пропана, угља, или електролизом воде. Рад горивих ћелија је комбинација хемијских, електромеханичких и електроничких подсистема, што изискује посебне потешкоће у погледу оптимизације ефикасности рада [11, 15].

Ефикасност производње електричне енергије је прилично стабилна (слика 6). Отпадна топлота се добија из реформера и резервоара горива и лако се може користити за припрему топле воде.



Слика 6. Ефикасност горивих ћелија [15]

2.2.2. Сорпциони расхладни уређаји

За подизање температурног нивоа нискотемпературних извора, могу се користити топлотне пумпе које користе електричну енергију (механички рад) или топлотни извор. Сорпционе топлотне пумпе користе топлоту као погонску енергију и могу бити абсорпционе или адсорпционе. Топлотом погоњени сорпциони чилери обезбеђују хлађење за климатизацију простора у стамбеним зградама за шта је потребна температура радног медијума обично од 6-16 °C.

2.2.2.1. Абсорпциони чилери

Абсорпциони чилери раде по циклусу са генератором/апсорбером, уместо компресора [16]. Принцип рада и подела абсорпционих уређаја представљени су у литератури [16, 17]. Преглед начина рада, различитих врста циклуса са могућностима побољшања циклуса представљени су у литератури [16, 18, 19, 20]. Општи процес се одвија у две фазе: адсорпција/синтеза/продукција и десорпција/регенерација/декомпозиција [17], где је процес синтезе заправо фаза хлађења, након које долази фаза регенерације током које долази до декомпозиције.

Топлота се доводи цевима у генератор што узрокује кључање разређеног раствора апсорбента у њему. Пара расхладног флуида сада струји кроз елиминаторе до кондензатора. Овде се расхладни флуид кондензује на спољашњој страни цеви хлађених расхладном водом. Оба процеса се одвијају у посуди са заједничким простором паре на притиску од око 6 kPa. Овај кондензовани расхладни флуид се сада транспортује до испаривача. Течни расхладни флуид кључа додирујући спољашњу површину цеви које садрже воду која одаје топлоту потребну за кључање расхладног флуида. Расхладни флуид који није прокључао се скупља на дну испаривача, пумпа се и пропушта поново преко цеви испаривача. Разређени раствор апсорбента који улази у генератор повећава концентрацију док кључа и ослобађа водену пару. Овако добијени јаки раствор апсорбента тече кроз размењивач раствора где се хлади грејући разређени раствор апсорбента на свом путу ка генератору.

Табела 6. Абсорпциони уређаји

	Једностепени абсорпциони уређаји	Двостепени абсорпциони уређаји	
		Вода	Вода
Расхладни флуид	Вода	Вода	Вода
Апсорбент	Li- Br-	Li- Br-	Li- Br-
Температура расхладне воде [°C]	6-7	6-7	-60-0
Улазна температуре топлог флуида [°C]	80-90	150-200 [°C]	100-130[°C]
COP	0,6-0,7	1,1-1,2	0,5-0,7

Абсорпциони чилери вода – литијум бромид могу бити једностепени и двостепени уређаји. Једностепене машине захтевају топлотни извор ниже температуре, али су им истовремено ограничене перформансе (табела 6) [9]. Двоступне машине имају побољшани циклус са додатним размењивачима топлоте и секундарним генератором. Оне могу имати већи коефицијент учинка (COP), али се морају користити више температуре извора топлоте (табела 6) [9].

Абсорпциони чилери амонијак-вода раде по истом циклусу као и чилери вода-литијум бромид. У овом случају се као расхладни флуид користи амонијак, док је вода апсорбент (табела 6). Код абсорпционих уређаја циклус се одвија на већим притисцима. Машине амонијак-вода захтевају високе температуре топлотног извора и могу се користити за индустријско хлађење, производећи температуре испод 0 °C.

2.2.2.2. Адсорпциони чилери

Адсорпција је површински процес које се јавља на граничној површини између две фазе, где силе кохезије укључујући Ван дер Валсове силе и силе водоничне везе делују између молекула свих субстанци независно од њиховог агрегатног стања, где површинске или неуравнотежене силе на граничној површини фазне промене доводе до промена у концентрацији молекула на граничној површини између чврсте и течне фазе. Чврста фаза и флуид који је адсорбован се називају адсорбент и адсорбат [21].

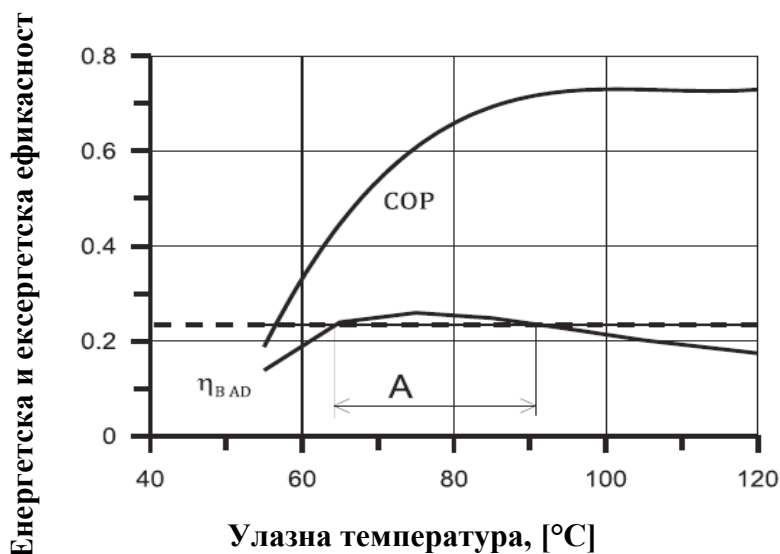
Адсорпција је увек праћена ослобађањем топлоте, а количина ослобођене топлоте зависи од реда величине Ван дер Валсових сила, промене фазе, електростатичке енергије и енергије хемијских веза [21].

Адсорпциони чилери вода-силиконски гел генеришу хлађење процесом адсорпције код порозних материјала као што су силиконски гел или зеолит. Адсорбент се суши помоћу доведене топлоте. Водена пара се ослобађа, струји кроз кондензатор и тамо се кондензује емитовањем топлоте. Када је материјал сув, улаз топлоте у адсорбер се зауставља и горњи контролни вентил се затвара. Након фазе хлађења почиње реакција у супротном смеру и долази до испаравања кондензата течности. Доњи контролни вентил према испаривачу се отвара и суви адсорбент усисава водену пару. У испаривачу, вода испарава преузимајући топлоту, чиме се може постићи ефекат хлађења. Током процеса адсорпције одбачена је топлота чија се дисипација мора извршити. На крају се кондензат враћа у испаривач и

циклус је затворен. Како би се постигло непрекидно хлађење, два адсорбера раде у пару. Један адсорбер је у фази десорпције, док у међувремену други врши ефекат хлађења у фази адсорпције. Адсорпциони чилери достижу коефицијенте учинка (COP) од 0,5-0,7 (слика 7) и захтевају топлоту ниже температуре за свој погон (табела 7).

Табела 7. Адсорпциони чилери [9]

Расхладни флуид	Вода
Апсорбент	Силикатни Гел
Температура расхладне воде [°C]	6-15
Улазна температура топлог флуида [°C]	60-90
COP	0,5-0,7



Слика 7. Ефикасност адсорпционог чилера [22]

2.2.3. Соларни пријемници

Соларни пријемници представљају посебну врсту размењивача топлоте који врше конверзију дозрачене сунчеве енергије у енергију радног медијума. Соларни колектор апсорбује дозрачену соларну енергију, врши конверзију ове енергије у топлотну и преноси је радном медијуму (води, ваздуху, уљу и сл.) који струји кроз колектор. Топлотна енергија добијена на овај начин се користи директно за припрему топле воде, или се врши акумулација ове енергије помоћу акумулатора топлоте [23].

Постоје две основне врсте соларних колектора: неконцентришући и концентришући. Неконцентришући соларни колектор има исту површину за пријем и апсорпцију соларне енергије, док концентришући обично имају систем за праћање сунца и конкавну рефлектујућу површину за усмеравање сунчевих зрака ка мањој пријемној површини, чиме се повећава топлотни радијациони соларни флуks. Друга подела се може направити према могућности кретања, на стационарне колекторе и колекторе са системом за праћање сунца у једној и две осе. Постоји подела и по опсегу радних температура на ниско, средње и високо температурне колекторе.

Стационарни колектори се постављају на одређеном месту и немају могућност праћања сунца. У овом раду разматрају се следећи типови стационарних соларних топлотних колектора:

- Равни соларни колектори (STC)
- Вакуумски соларни колектори (ETC)

2.2.3.1. Равни соларни колектори

Равни соларни колектор се састоји из три основна дела: апсорбера, топлотне изолације и застаклења.

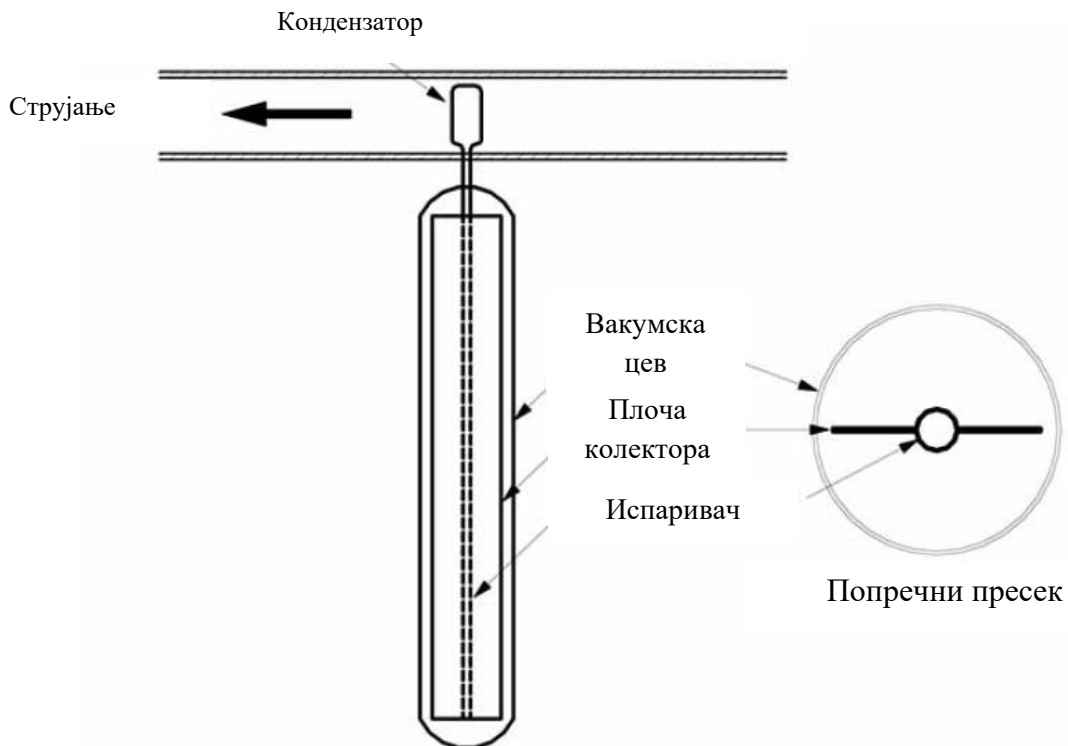
Соларна радијација пролази кроз застакљени прозирни слој и долази до површине апсорбера, где се врши апсорпција највећег дела соларне енергије и преноси радном медијуму који струји кроз металне цеви. Апсорбер је равна плоча од материјала који добро апсорбује соларно зрачење, премазана мат црном бојом, кроз коју струји радни медијум и одводи топлоту. Топлотна изолација спречава губљење топлоте из колектора на његовим бочним странама, а нарочито са доње стране. Застакљење може бити једноструко, двоструко или троструко. Застакљење има улогу образовања ефекта стаклене баште у колектору, као и заштите од спољних метеоролошких услова. Постоје различите врсте апсорбера у зависности од материјала од ког су направљени, начина наношења боје на његову површину, ефикасности предаје топлоте радном медијуму и начина уградње у соларни систем.

Равни соларни колектори се најмасовније користе. Обично се користе за нискотемпературне примене са температурама до 80 °C.

2.2.3.2. Вакуумски колектори (ЕТС)

Вакуумски колектори се састоје од цеви која се греје унутар заптивене цеви са вакуумом. Вакуумски омотач смањује губитке конвекције и кондукције, тако да ови колектори раде на вишим температурама (око 150 °С). Могу да користе и директно и дифузно зрачење.

Вакуумски колектори користе материје са променом парно-течне фазе чиме се постиже боља ефикасност. Ови колектори садрже „грејне“ цеви (високоефикасни топлотни кондуктор), које се налазе унутар заптивене цеви са вакуумом. „Грејна“ цев је обично од бакра, повезује се са црним бакарним ребром које испуњава спољну цев (абсорберску цев) [23]. Метални врх у виду испупчења је повезан са заптивеном цевком (кондензатором). „Грејна“ цев садржи малу количину флуида (нпр. метанола), који пролази кроз циклус испаравања и кондензовања. У овом циклусу течна фаза испарава захваљујући соларној енергији, а добијена парна фаза одлази до дела са топлотним понором, где се кондензује и где се у току процеса ослобађа латентна топлота. Кондензовани флуид се враћа назад до соларног колектора, а процес се понавља. При монтажи ових цеви, метални врх кондензатора упада у размењивачку грану, као што се види на слици 8 [23].

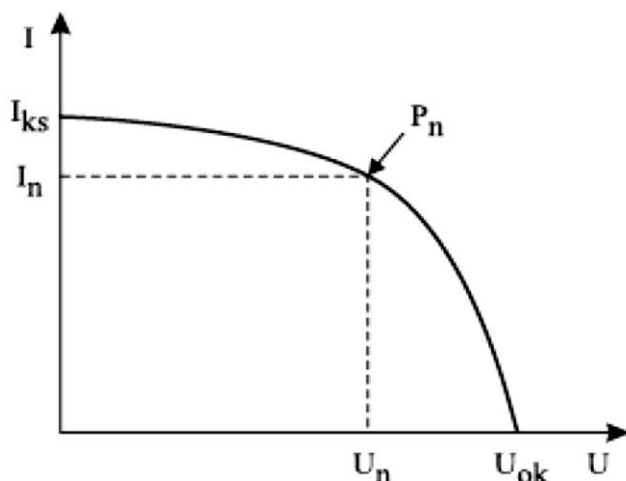


Слика 8. Вакуумски колектор [23]

2.2.3.3. Фотонапонски колектори

Фотонапонски колектори (PV) врше трансформацију сунчевог зрачења у електричну енергију. Фотонапонска конверзија сунчевог зрачења врши се на соларним ћелијама које се израђују од полупроводничких материјала, једноставне су грађе, немају покретне делове, не загађују околину и имају дуг век трајања [24]. Силицијум је најпознатији полупроводнички елемент, чији молекул садржи 14 атома, који у комбинацији са фосфором формира један електрон ван чврсте међуатомске везе, који се додавањем енергије, попут енергије фотона електромагнетног зрачења ослобађа и постаје слободан, што одговара механизму присутном код n -типа полупроводника [24, 25]. Силицијум у комбинацији са нпр. бором (B), формира везе између атома са местима непопуњеним електронима, чиме се добија p -тип полупроводника [24, 25]. Комбинацијом ова два типа полупроводника добија се електрично неутралан материјал, јер слободни електрони n -полупроводника налазе место на слободним местима p -полупроводника. Додавањем електрично неутралног материјала између n и p газдвајајућег слоја, јавља се разлика напона на спољним површинама описане комбинације полупроводника који формирају соларне ћелије [24, 25].

Директну трансформацију сунчевог зрачења у електричну енергију врше соларне ћелије. Соларна ћелија се састоји од p и n полупроводника, код кога се, услед апсорпције сунчевог зрачења, у p - n споју јављају парови електрон-шупљина [24]. Уколико су парови формирано далеко од p - n споја, брзо се рекомбинују и не доприносе претварању сунчевог зрачења у електричну енергију [24]. Међутим, приликом апсорпције сунчевог зрачења унутар или у близини p - n споја (прелазна област), унутрашње електрично поље раздваја електроне и шупљине, тако да се електрони крећу према n страни, а шупљине према p страни што доводи до смањења контактне разлике потенцијала p - n споја и до стварања напона на крајевима соларне ћелије [24]. Соларна ћелија у електричном колу представља извор једносмерне електричне струје [24]. У важне карактеристике соларне ћелије спадају напон отвореног кола ($U_{ок}$) и струја кратког споја ($I_{кс}$) (слика 9) [24]. Напон отвореног кола је максимални напон на крајевима соларне ћелије у отвореном електричном колу. Уколико је соларна ћелија кратко спојена, кроз коло ће протичати струја кратког споја $I_{кс}$ (слика 9), која је сразмерна интензитету упадног сунчевог зрачења [24].



Слика 9. Струјно-напонска карактеристика соларне ћелије [24]

Пошто је електрична снага P једнака производу напона и струје, у примени се радни отпор бира тако да овај производ достигне максималну вредност [24]. Ефикасност (степен корисног дејства, η) соларне ћелије представља однос искоришћене енергије и укупне енергије сунчевог зрачења које пада на соларну ћелију [24].

Под фотонапонским соларним системом подразумева се систем помоћу кога се сунчево зрачење претвара у електричну енергију и врши снабдевање потрошача једносмерном и/или наизменичном струјом [24]. Фотонапонски соларни систем може да ради независно од електродистрибутивне мреже или да буде прикључен на њу. Фотонапонски соларни системи прикључени на електродистрибутивну мрежу састоје се од соларних модула, инвертора, струјомера и прикључних водова за прикључење соларног система за електродистрибутивну мрежу. Код ових система се целокупан износ произведене електричне енергије предаје електродистрибутивној мрежи [24].

Код соларних електрана се најчешће користе соларни модули од монокристалног и поликристалног силицијума, а ређе од танкослојних материјала, као што су аморфни силицијум и CdTe [24]. Соларни модули од монокристалног и поликристалног силицијума су погоднији за подручја са претежно директним сунчевим зрачењем, док су соларни модули са соларним ћелијама од танкослојних материјала погоднији за подручја са претежно дифузним сунчевим зрачењем [24].

Под инвертором се подразумева уређај који претвара једносмерни напон који се добија помоћу соларне електране од 12 V или 24 V у трофазни наизменични напон од 220 V [24]. Под ефикасношћу инвертора се подразумева однос једносмерног електричног сигнала на улазу и наизменичног електричног сигнала на излазу из инвертора. У зависности од конструкције ефикасност инвертора се креће до 97 % [24].

2.3. Поређење полигенерационих технологија

2.3.1. Поређење когенерационих технологија

Поређење технологија на којима свој рад може да заснива когенерациони модул дат је у табели 8. Ова табела обухвата гориве ћелије са чврстим оксидима као електролитом, горива ћелија са полимерном мембраном као електролитом, мотор са унутрашњим сагоревањем [26], Стирлинг мотор и микро гасне турбине [15]. Извршено је поређење ефикасности, потенцијалних уштеда у поређењу са конвенционалним системима за производњу електричне енергије. Види се да Стирлинг мотори имају највећу ефикасност, а не заостају ни клипни мотори СУС. Индикатори емисија гасова стаклене баште и процена релевантних емисија тригенерационих система са поређењем са конвенционалним системима [11], показује да смањење емисија највише зависи од технологија усвојених за интеграцију тригенерационог система. Когенерационе технологије са погоном на природни гас могу да обезбеде значајно смањење емисија гасова стаклене баште, до 20 % код система са микро гасном турбином, и до 35 % код система са моторима СУС и горивим ћелијама.

Табела 8. Карактеристике когенерационих модула [7, 15]

Когенерациона технологија	Просечна електрична ефикасност [%]	Укупна ефикасност у режиму когенерације [%]	NO _x [kg/MWh]	CO ₂ [g/MWh]	CO [g/MWh]	Цена капиталне инвестиције [\$/ kW]
SOFC	30-36	56-70	0,0226	413-430	0,018	3500-5000
PEMFC	30-36	68-81	0,0136-0,07	514-617	0,023-0,032	3600-5500
Стирлинг мотор	22-24	78-90	0,107-0,16	-	0,05-0,08	13000
Мотор СУС	28 -35	75-85	0,7-2,5	-	1,005-51,7	1080-2800
Микро гасна турбина	25-30	70-90	0,225-0,365	771-875	0,13-0,665	1561-2516

Микро гасне турбине као једна од могућности малих и микро тригенерационих система нуде доста предности у поређењу са другим технологијама [14]. Компактна конструкција,

мала тежина по јединици запремине, мали број покретних делова, мањи ниво буке (нарочито у поређењу са моторима СУС), флексибилност у погледу горива, мање емисије у оквиру когенерационих постројења, високо квалитетна отпадна топлота, мањи трошкови одржавања, ниске вибрације [14]. Ипак, микро гасне турбине су мање ефикасне нарочито код малих снага у поређењу са моторима СУС, нарочито у режимима рада са делимичним оптерећењем, и осетљивије су на квалитет горива. Такође су окарактерисане и већим инвестиционим трошковима у поређењу са моторима СУС. За постизање већих ефикасности код когенерационих система, користи се отпадна топлота издувних гасова и постиже се укупна ефикасност до 80 %. Најбоље перформансе имају гориве ћелије, међутим, ово је и даље релативно нова и мало заступљена технологија.

Према табели 8 најбољи однос цене и перформанси нуде мотори са унутрашњим сагоревањем. Они имају нешто мању ефикасност у режиму когенерације али врло добре карактеристике у погледу смањења емисија и уштеде примарне енергије [17], а представљају зрелу, доступну и широко заступљену технологију. Доступни су у великом распону снага (3 kW до 20MW), а ефикасност производње електричне енергије се креће од 35 до 45 %. Отпадна топлота се може искористити пре свега од издувних гасова чије температуре достижу 300 до 400 °C, и из расхладног система мотора, где су температуре расхладног флуида до 90 °C. Мотори СУС нуде и флексибилност у погледу горива, а укупна ефикасност се креће од 65 до 92 % у когенерационом режиму [7]. Специфична цена когенерационих система мање снаге према литератури [27] је нижа од цене наведене у табели 8 и износи 600-800 €/kWe.

2.3.2. Поређење адсорпционих и абсорпционих технологија

Данас постоји више радних сорпционих расхладних технологија. Преглед могућих апликација појединих технологија дат је у табели 9. Када су у питању индустријски процеси, постоји више процеса попут сушења, дестилације, испаривања, кондензације где долази до великих промена енталпије те се овакви уређаји могу применити. Могућности примене се могу класификовати на: хлађење, грејање (топлотна пумпа), комбиновано грејање и хлађење, подизање температурног нивоа топлотног извора, акумулација топлотне/расхладне енергије, и интеграција соларних топлотних колектора за потребе грејања и хлађења [17]. На основу поређења могућности примене, потребних температура топлотног извора за погон сорпционог уређаја и коефицијента COP (табела 10)

адсорпционе топлотне пумпе могу се сматрати уређајима најпогоднијим за интеграцију у полигенерационим системима. Могуће их је користити за климатизацију објеката, док су потребне температуре погонске топлоте ниже у односу на адсорпционе уређаје. Двостепени адсорпциони уређаји могу остварити већи COP коефицијент, али за свој рад захтевају високе температуре топлотног извора преко 150 °C.

Адсорпциони уређаји могу да функционишу са топлотним извором на нижем температурном нивоу, што их чини незнатно флексибилнијим за интеграцију са другим системима у односу на једностепене адсорпционе уређаје, при чему су вредности COP коефицијента врло сличне.

Табела 9. Перформансе и могућности примене сорпционих уређаја у зависности од примењених радних парова [17]

Радни пар	Примена	Температурни опсег (нижи/виши температуни извор)	COP
АЦ-метанол	Производња леда	-25[°C]/130[°C], -10[°C]/110[°C]	0,15 (нето COP)
АЦ- метанол	Производња леда	-6[°C]/28[°C], -24[°C] /87[°C]	0,08-0,12 (COP са соларним системом)
АЦ- метанол	Производња леда	-5[°C]/25[°C], 25[°C]/110[°C]	0,12 (са соларним системом)
АЦ – Метанол	Климатизација	5[°C]/20[°C], 30[°C]/80[°C]	0,35
Зеолит NaX/Voda	Климатизација	25[°C]/35[°C], 105[°C]/220[°C]	1,06
Зеолит NaX/Voda	Производња леда	-5[°C]/25[°C], 25 [°C]/110[°C]	0,3
Зеолит NaX/Voda	Производња леда	-10[°C]/170[°C], +10[°C]/170[°C]	0,44/0,21 0,48/0,11
Зеолит NaX/Voda	Акумулација расхладне енергије	-10[°C]/170[°C], +10[°C]/170[°C]	0,1 (COP са соларним системом)
Зеолит NaX/Voda	Климатизација	22[°C]/42[°C], 60[°C]/200[°C]	0,75
CaCl ₂ + NH ₃	Производња леда		0,10 (COP са соларним системом)

Табела 10. Поређење адсорпционих и апсорпционих чилера

	Једностепени адсорпциони уређаји	Двостепени адсорпциони уређаји		Адсорпциони уређаји
	Вода	Вода	Вода	Вода
Расхладни флуид	Вода	Вода	Вода	Вода
Апсорбент	Li- Br-	Li- Br-	Li- Br-	Сил. Гел.
Температура расхладне воде	6-7°C	6-7°C	-60-0°C	6-15°C
Улазна температуре топлог флуида	80-90°C	150-200°C	100-130°C	60-90°C
COP	0,6-0,7	1,1-1,2	0,5-0,7	0,5-0,7

2.4. Поређење главних својстава соларних топлотних пријемника

Поређење главних својстава соларних топлотних пријемника на основу типа апсорбера, степена концентрације и излазне температуре радног медијума према [23] приказано је у табели 11. На основу очекиваног температурног опсега на излазу из соларног колектора, види се да вакуумски соларни колектори могу да обезбеде више излазне температуре, што нуди већу флексибилност у погледу интеграције. Недостатак вакуумских соларних колектора у поређењу са равним колекторима су виши инвестициони трошкови. Равни соларни колектори могу да обезбеде излазне температуре радног медијума на довољном нивоу за потребе припреме потрошне топле воде, па чак и погон адсорпционих уређаја, те се с обзиром на ниже инвестиционе трошкове могу сматрати погоднијим за топловодне системе, када нема потребе за овако високим температурама радног медијума.

Табела 11. Преглед соларних колектора са главним карактеристикама

Тип	Тип апсорбера	Индикативни температурни опсег [°C]
Равни плочасти колектори (STC)	Равни	30-80
Вакуумски колектори (ETC)	Равни	50-200

2.5. Акумулатори топлоте

Акумулатори топлоте добијају све већи значај у многим енергетским апликацијама. Основна функција акумулатора топлоте је повећање расположивости енергетског система, тако што на ефективан начин врше акумулацију вишка енергије када је она доступна, како би се ова складиштена енергија могла користити у неком другом периоду када је то потребно. Акумулатори топлоте су од посебног значаја у соларним системима и системима који користе неки вид отпадне топлоте, те могу играти значајну улогу у оквиру полигенерационих система.

Постоје два основна типа акумулатора топлоте: акумулатори осетне (сензибилне) топлоте, где се повећава температура материјала акумулатора са повећањем акумулиране енергије, и акумулатори који користе латентну топлоту промене фазе неке материје (нпр. прелаз воде из чврсте у течну фазу).

2.5.1. Акумулатори топлоте без промене фазе

Код ових акумулатора топлоте мења се температура медијума за акумулацију. Из тог разлога је пожељно да радни медијум има што већи топлотни капацитет, да нуди дугорочно стабилан цикличан рад, да је погодан за складиштење и да има приступачну цену. Ови акумулатори топлоте се могу поделити на акумулаторе са течним медијумом (вода, уља, разне врсте расола и сл.) и акумулаторе са чврстим медијумом (камен, метал и др).

Вода је један од најбољих медијума који се може користити за акумулацију топлоте, јер има релативно велики топлотни капацитет, свуда је доступна па је и економски конкурентна. Најпогоднија је за нискотемпературну акумулацију у опсегу од 25 °C до 90 °C [28]. Може се користити и за више температуре, али је у том случају потребно испунити додатне услове.

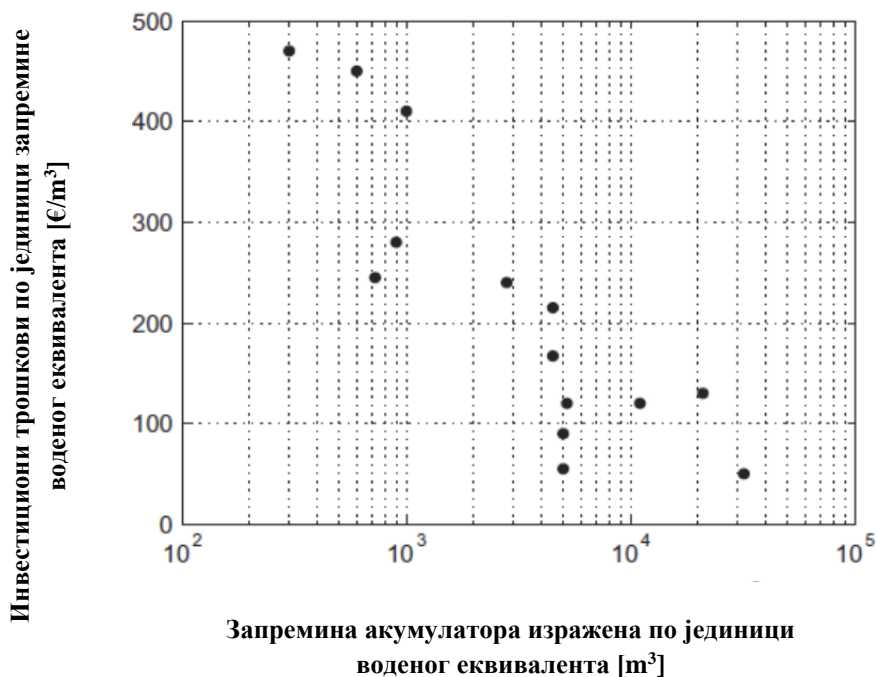
Код акумулатора топлоте соларних система, може се постићи топлотна стратификација захваљујући силама потиска у резервоару у случају да не постоји мешање у резервоару. У том случају је највиша температура при врху резервоара, а најнижа на дну. Ово нуди следеће предности: повећање ефикасности коришћења акумулиране енергије тиме што се користи енергија на температурном нивоу на ком се испоручује акумулатору уместо на нижој температури са мешањем, и количина топлоте коју испоручује колектор се може повећати уколико је улазна температура колектора нижа од температуре акумулације са мешањем.

Ефикасност акумулатора топлоте са водом може се повећати употребом слане (или морске) воде. У овом случају, формира се градијент промене густине воде, употребом слане воде, код које се концентрација соли повећава са дубином. Најчешће се користе соли попут натријум хлорида (NaCl) и магнезијум хлорида (MgCl₂). На овај начин је доступна и топлота на нешто вишем температурном нивоу тј. до 95 °C [28].

2.5.2 Акумулатори са чврстим медијумом

За нискотемпературно али и високотемпературно складиштење енергије, могу се користити и материјали попут камена, метала, бетона, песка, цигле и сл. Применом чврстих материјала избегавају се посебни захтеви у погледу отпорности на високе притиске и цурења. Акумулатори са каменом садрже камење које је распоређено тако да постоји довољно међупростора за струјање неког флуида кроз акумулатор. Акумулација енергије

се врши опструјавањем камена топлијим ваздухом, а коришћење акумулиране енергије опструјавањем хладног ваздуха (нпр. ваздух из просторије која се греје). Количина акумулиране енергије зависи од термофизичких својстава коришћеног материјала, али и од величине, облика камена, распореда тј. густине камена у акумулатору, од радног флуида и др. Поред овога, акумулација топлоте се може вршити и у маси зграде, што је карактеристика искоришћена код пасивних кућа. Специфични инвестициони трошкови акумулатора топлоте приказани су на слици 10.



Слика 10. Специфична цена акумулатора топлоте на основу водене запремине [29]

За више температуре (120 °C - 1400 °C) користе се метали (алуминијум, магнезијум, цинк) и неорганске соли. Метали се користе у случају да је од посебног значаја велика кондуктивност, па је оправдана велика цена ових акумулатора. За акумулацију се може користити и метални отпад (опиљци бакра, гвожђа, алуминијума и сл.).

Поређење различитих медијума за складиштење топлоте дато је у табели 12 [28].

Табела 12. Поређење различитих материја за акумулацију енергије (акумулирана енергија 106 kJ=300 kWh, $\Delta T=15K$) [28]

Својство	Медијум за акумулацију топлоте			
	Без промене фазе		Латентни	
	Камен	Вода	Органски	Неоргански
Латентна топлота [kJ/kg]	/	/	190	230
Специфична топлота [kJ/kg]	1,0	4,2	2,0	2,0
Густина [kg/m ³]	2240	1000	800	1600
Маса за акумулацију 106 kJ [kg]	67000	16000	5300	4350
Релативна маса**	15	4	1,25	1,0
Запремина за акумулацију 106 kJ [m ³]	30	16	6,6	2,7
Релативна запремина**	11	6	2,5	1,0

*Латентна топлота није од значаја за акумулаторе без промене фазе.

** Релативна маса и запремина на основу “складиштења” латентне топлоте у неорганским материјама са променом фазе.

2.6. Компресорске топлотне пумпе земља (вода)- вода

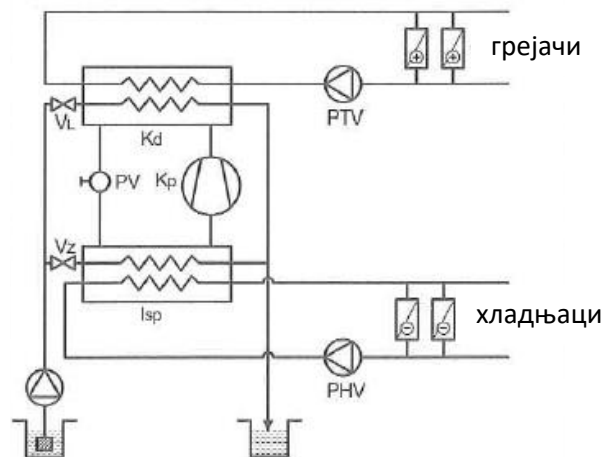
У оквиру овог рада разматрају се топлотне пумпе компресорског типа, које су најчешће у примени. Термодинамички аспекти рада овог типа топлотних пумпи обрађени су у литератури [30]. Иако погон компресора може да буде мотор са унутрашњим сагоревањем или турбина, у оквиру овог рада разматрају се топлотне пумпе погоњене електромотором, што је најчешћи случај код уређаја доступних на тржишту. Код топлотних пумпи, може да се разликује тип компресора који може бити клипни, вијчани, ротациони или турбокомпресорски. Према спреси топлотног извора и понора, могуће су разне комбинације [30], али се у оквиру овог рада разматрају топлотне пумпе вода-вода тј. земља вода. Ове топлотне пумпе за погон компресора користе електромоторни погон, при чему укупни ефекат добијене топлоте може бити већа од количине употребљене примарне енергије [30]. Топлотне пумпе средњег капацитета (електрична снага око 100 kW) обично имају клипне компресоре, док се за веће снаге користе обично центрифугални компресори [30]. Топлотне пумпе могу да раде у моновалентном режиму, где се топлота за грејање објекта добија искључиво применом топлотне пумпе, што захтева уградњу топлотних пумпи знатно већег топлотног учинка и у бивалентном режиму, где се топлотна пумпа користи у комбинацији са допунским системом за добијање топлотне енергије који се најчешће користи за вршна оптерећења [30]. Рад у бивалентном режиму могуће је извести на два начина [30]:

(1) топлотна пумпа се користи само у одређеном опсегу температура, док се ван тог опсега користи искључиво допунски систем;

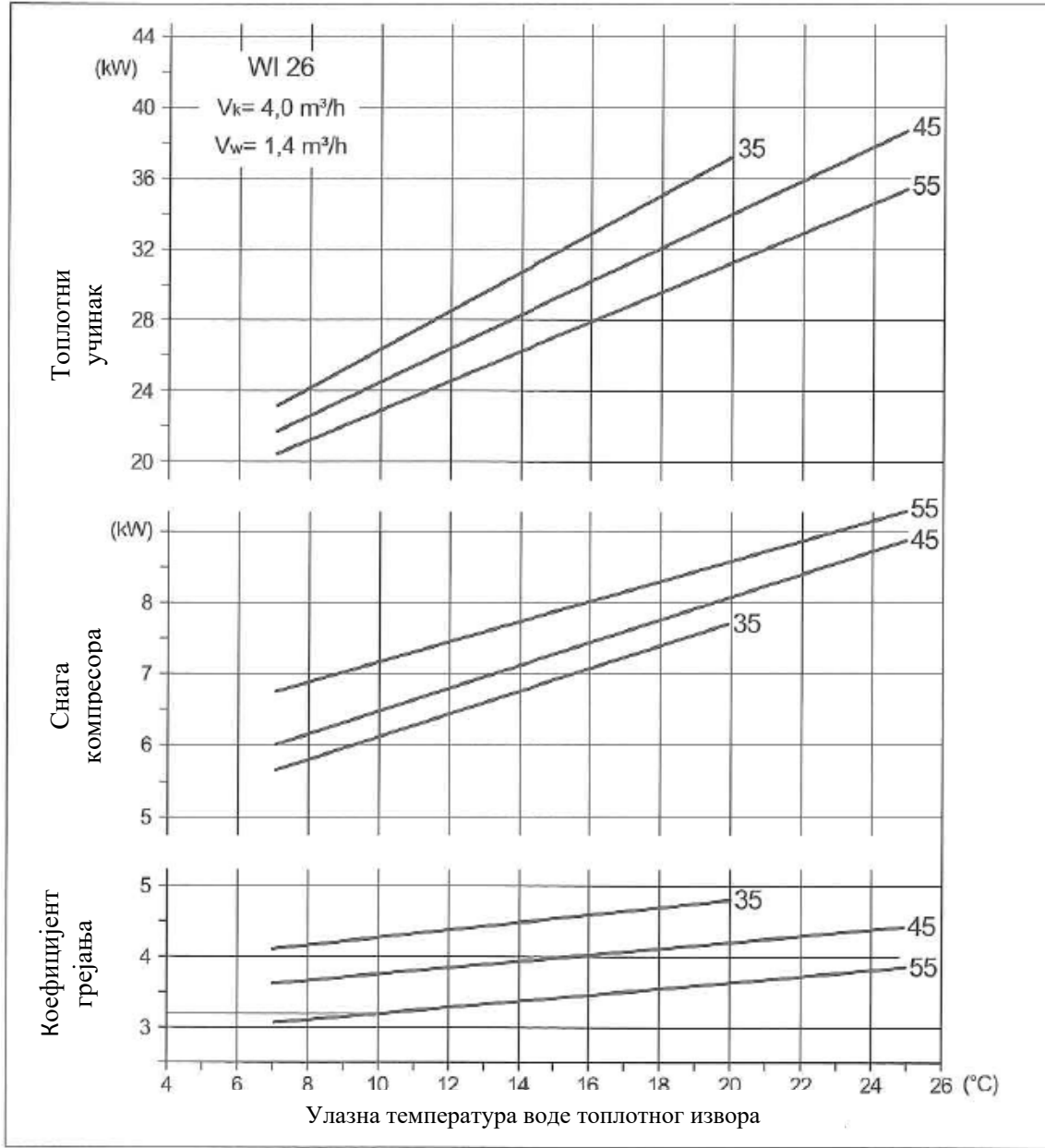
(2) топлотна пумпа се користи истовремено са допунским извором који се укључује само при одређеној спољној температури.

У случају коришћења топлотне пумпе за грејање и хлађење, економичност примене топлотне пумпе се поспешује. Постоје два начина коришћења топлотне пумпе за грејање и хлађење [30].

У првом случају се регулацијом уређаја замењују улоге испаривача и кондензатора (у току лета испаривач је са стране корисника и расхладна енергија се корисно употребљава, док у току зиме кондензатор испоручује корисну топлотну енергију потрошачу – слика 11). Зими расхладни флуид циркулише од компресора преко кондензатора (где топлоту кондензације предаје потрошачу топлотне енергије) и једносмерног вентила до пригушног вентила испред испаривача, где се топлота одузима од извора (подземне воде/земље) а расхладни флуид испарава на рачун одузете топлоте и преко регулационог вентила долази до компресора. У летњем режиму, компресор потискује пару расхладног флуида у кондензатор, одакле преко једносмерног вентила на страни кондензатора и пригушног вентила расхладни флуид доспева у испаривач у течном стању, где се на рачун транспорта топлоте од расхладног конзума врши испаравање, након чега пару радног медијума усисава компресор.



Слика 11. Топлотна пумпа за грејање и хлађење са измењивим улогама топлотног извора и понора [30]



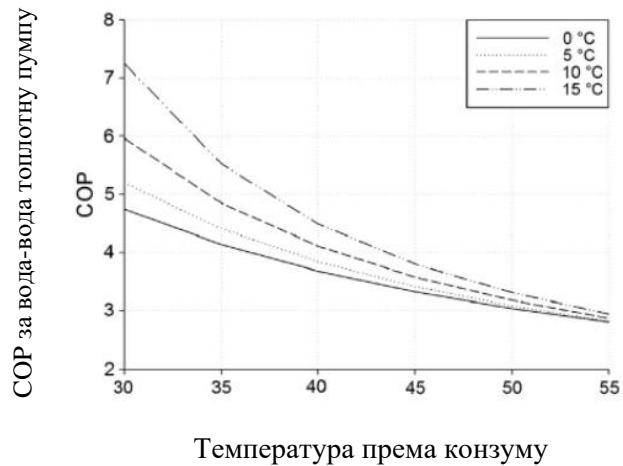
Слика 12. Дијаграм учинка топлотне пумпе за протоке радних медијума V_k и V_w [30]

Друго решење обично користе веће инсталације, базира се на принципу промене тока радног медијума при чему испаривач и кондензатор не мењају улоге. У зимском режиму рада, топлотна енергија топлотног извора (подземна вода) доводи се испаривачу кроз циркулациону пумпу и вентил и предаје се преко компресора конензатору кроз који циркулише радни медијум система за грејање. У летњем режиму рада, кроз испаривач циркулише вода која се користи за хлађење расхладног конзума, при чему се топлота

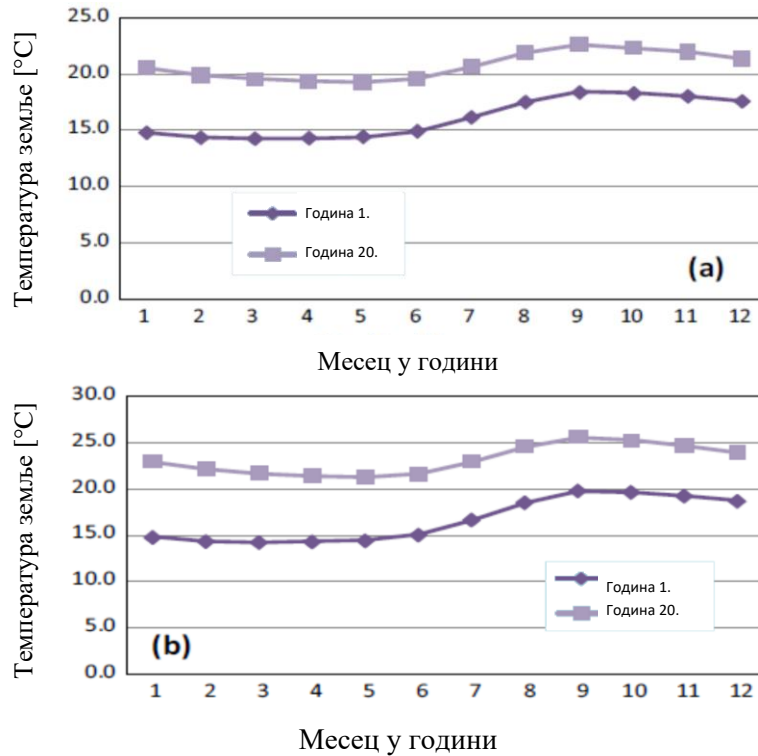
расхладног конзума преко комресора предаје кондензатору, кроз који циркулише вода тоplotног понора (подземна вода).

Са термодинамичке тачке гледишта, тоplotне пумпе вода-вода имају најбоље особине и највеће коефицијенте грејања [30], међутим, проблем примене оваквих тоplotних пумпи може да буде обезбеђивање извора воде тоplotног извора.

Промена температуре земље за моделирање тоplotне пумпе вода-вода код које се вода као радни медијум са стране тоplotног извора загрева помоћу размењивача топлоте земља-вода може се наћи у литератури [31, 32, 33]. Промена тоplotног учинка тоplotне пумпе са променом температуре воде извора дата је на слици 12. Зависност коефицијента COP од температуре са стране конзума тоplotне пумпе дата је на слици 13.



Слика 13. Зависност коефицијента COP од температуре са стране конзума тоplotне пумпе [34]



Слика 14. Промена температуре земље у току године [33]; а) снага топлотне пумпе $P_{el}=8kW$; б) снага топлотне пумпе $P_{el}=14kW$

У литератури [33] су доступни подаци о месечној промени температуре радног медијума са стране извора (земље) на улазу у топлотне пумпе снаге 8 и 14 kW (слика 14). У раду [33] су приказане средње месечне вредности за годишњи и двадесетогодишњи период (слика 14).

3. ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА

Појам оптимизација представља дефинисање структуре (конфигурације) и радних параметара система ради минимизовања тоталних јединичних трошкова производа система под задатим граничним условима који се доводе у везу са доступним ресурсима, материјалима, изворима финансирања, заштите животне средине, правне регулативе, безбедности, поузданости и расположивости система [35]. Термодинамичка оптимизација има за циљ минимизовање термодинамичких неефикасности. Код техноекономске оптимизације, циљ је свођење трошкова система, који су често последица термодинамичких неефикасности на минимум [35].

Идеје за оптимизацијом сложених енергетских система потичу од инжењерске тежње да се на најбољи могући начин задовоље пројектни захтеви, који имају супротстављене тенденције у односу на пројектно решење [36]. Супротстављене тенденције се огледају у повећању инвестиционог улагања са повећањем перформанси, ефикасности система или употребом ОИЕ. Оптимизација енергетских система може се вршити за системе великих снага регионалног значаја [37], за енергетске системе за потребе насеља [38] и за мање системе за потребе зграда или предузећа [39]. Процес оптимизације сложених енергетских система треба да укључи услове експлоатације и понашање система у овим условима. Циљ оптимизације полигенерационих система је избор најбољег решења из скупа могућих решења која задовољавају услове функције, капацитета, утицаја на животну средину и расположивости у претпостављеним условима и задатим границама. Планирање и пројектовање полигенерационих система се може сматрати изазовним оптимизационим проблемом, који би се могао посматрати са термодинамичког, еколошког и економског аспекта. Оптимизација различитих полигенерационих система представљена је у литератури релативно новијег датума [1, 2, 3, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49] где је предмет оптимизације најчешће оптимизација радних параметара, радне стратегије или конфигурације система.

Инжењери се у фази планирања и формирања идејног решења енергетских система суочавају са изазовима избора опреме, начина њиховог међусобног повезивања и

интеракције и димензионисања система тј. одређивања снага и капацитета појединих компонената система. Предмет оптимизације може да буде и одређивање оптималних радних параметара система, попут температура, протока, извора енергије и сл. За решавање оваквих оптимизационих проблема потребно је дефинисање адекватног оптимизационог проблема. Формирање оптимизационог модела је најзначајнији корак у оптимизационом процесу јер директно утиче на резултат оптимизације.

3.1. Дефинисање проблема оптимизације полигенерационих система

Код оптимизације сложених енергетских система, попут полигенерационих система, могу се разматрати следећи оптимизациони проблеми [27, 38]:

- **Проблем конфигурације**, при чему се оптимизационе методе користе за избор полигенерационих модула (компонената) који улазе у састав оптималног полигенерационог система. Овакав проблем захтева формирање суперструктуре полигенерационог система, која обично садржи већи број модула у међусобној интеракцији. У овом случају, модули представљају потенцијалне кандидате за узимање учешћа у оптималној конфигурацији, при чему сваки од модула-кандидата може да се користи за подмиривање једне или више енергетских потреба;
- **Оптимизација пројектних параметара**, која подразумева оптимизацију стандардних компонената полигенерационог система у оквиру унапред дефинисане конфигурације, чије се понашање у оквиру система моделира за потребе оптимизације;
- **Оптимизација радних параметара**, која представља сложени проблем јер обично постоји више модула у међусобној интеракцији који се могу користити за подмиривање исте потребе од којих понашање сваке може да утиче на радне параметре.

Први корак оптимизације представља дефинисање граничних услова, граница или домена оптимизационог модела. Код оптимизације полигенерационих система, у овој фази, у оптимизациони модел треба укључити све технички могуће подсистеме, добијене као резултат интеграције суперструктуре система који могу имати значајни утицај на понашање и производност система. Код оптимизације полигенерационих система понекад је потребно извршити декомпозицију система на мање подсистеме, чија оптимизација може да се врши

независно. У овом случају, од посебног значаја је формирање граничних услова за сваки од подсистема који се оптимизују, јер резултат оптимизације наведених подсистема може значајно да утиче на резултат оптимизације комплетног система.

3.1.1. Критеријуми оптимизације

Избор критеријума на основу којих се врши оцена понашања и оптимизација датог система је од кључног значаја у процесу формирања оптимизационог проблема. Критеријуми оптимизације могу бити технолошки, економски, еколошки, и сл. Економски критеријуми су обично тотална капитална инвестиција, тотални годишњи нивелисани трошкови, годишњи нивелисани профит, стопа рентабилности инвестиционог пројекта, нето садашња вредност пројекта или било који од параметара економске рентабилности инвестиционог пројекта. Технолошки критеријуми могу бити термодинамичка ефикасност система, производност, поузданост, расположивост и тд. Еколошки критеријуми обично подразумевају ниво емисије загађујућих супстанци, гасова са ефектом стаклене баште и сл. Квантификавањем резултата анализе оптимизационог проблема по задатим критеријумима, могуће је поредити својства предмета оптимизације. Својство оптималног решења оптимизационог проблема је екстремна вредност, минимална или максимална вредност, одабраних оптимизационих критеријума у дефинисаном домену.

У пракси се обично формирају оптимизациони модели који непосредно или посредно узимају у обзир више критеријума оптимизације, што представља вишекритеријумску оптимизацију. У том случају, најбоље, тј. оптимално решење је оно решење чије су карактеристичне вредности по свим задатим критеријумима најбоље. Код вишекритеријумске оптимизације чест је случај међусобне искључивости (конкурентности) критеријума, што додатно отежава решавање оваквих проблема. Типичан пример наведене конкурентности су већи трошкови полигенерационих модула за примену ОИЕ насупрот јефтинијим модулима за сагоревање фосилних горива. Врло често економски критеријуми рентабилности зависе од технолошких или еколошких критеријума оптимизације, те се могу посредно довести у функцију наведених критеријума. Из тог разлога, избор критеријума оптимизације је од посебног значаја.

Још један од кључних елемената за формирање оптимизационих проблема је избор параметара оптимизације, тј. независно променљивих величина које описују могућа решења оптимизационог проблема. Оптимизационе променљиве треба да имају следећа својства:

- значајно утичу на перформансе система (технолошке, производне, термодинамичке) или на ефикасност трошкова система, тј. на квалитативну вредност задатих критеријума оптимизационог проблема;
- не укључују превише детаља тј. треба свести број променљивих на разумну меру задржавајући притом променљиве са најзначајнијим утицајем на одабране критеријуме оптимизације,
- узимају нумеричке вредности подложне промени у симулационом моделу, како би била могућа квалитативна оцена по задатим критеријумима за различите вредности оптимизационих променљивих.

При формирању оптимизационог проблема врши се избор оптимизационих променљивих тако да њихове вредности указују на квалитативну оцену анализираног система по изабраним критеријумима. На основу вредности изабраних оптимизационих променљивих се одређује оптимално решење. Код пројектовања сложених енергетских система, у фази планирања и израде идејног решења, обично се не узимају у обзир сви детаљи сваке од компонената система. Детаљније анализе са више параметара и детаља се обично врше накнадно кроз оптимизацију подсистема.

3.1.2. Математички модел оптимизационог проблема

Математички модел представља опис физичког модела система употребом математичких релација, што подразумева делимичну идеализацију система и његових функција. Математички модел описује на који начин су променљиве система у вези као и начин на који независно променљиве утичу на промену зависно променљивих и критеријума оптимизације.

Математички модел оптимизационог проблема се састоји од [35]:

- Функције циља - функције за чијим екстремним вредностима се трага у процесу оптимизације;
- Критеријума једнакости;
- Критеријума неједнакости.

Функција циља представља математичку релацију која описује одабране критеријуме оптимизације као функцију зависно и независно променљивих. Вредност функције циља зависи од вредности зависно и независно променљивих, тако да се решавањем оптимизационог проблема добија решење у смислу оптималних вредности независно променљивих у задатим граничним условима оптимизације.

Критеријуми једнакости и неједнакости су део термодинамичких модела, модела трошкова система и одговарајућих граничних услова. Ови модели укључују билансне једначине компонената, релације које описују температурне нивое, перформансе и трошкове који се доводе у везу са појединим компонентама или модулима, као и физичка и друга својства радних медијума. Ови модели такође садрже једначине једнакости и неједнакости, којима се дефинишу граничне вредности, дозвољени радни режими, максимални и минимални капацитет и перформансе као и границе и доступност ресурса. Развој математичког модела захтева добро разумевање система и генерално је временски врло захтеван процес [35].

Парцијална оптимизација, тј. оптимизација одабраних подсистема добијених декомпозицијом суперструктуре система на мање – подсистеме, је од посебног значаја код сложених енергетских система, када оптимизација комплетног система постаје врло сложена [35]. Код сложених енергетских система могуће је вршити оптимизацију једног подсистема или једног дела проблема, при чему се занемарује утицај одређених променљивих које утичу на вредност функције циља или интеракција са другим подсистемима. Оптимизација свих подсистема једног сложеног система, не гарантује проналажење оптималног решења оптимизације комплетног система – суперструктуре.

У литератури је могуће пронаћи више различитих приступа оптимизацији сложених интегрисаних енергетских система, попут полигенерационих система. Најчешће примењиване методе оптимизације подразумевају анализу понашања изабраних модела

система у оквиру различитих сценарија [50, 51], или енергетског билансирања [39], међутим резултати оваквих метода су доста ограничени јер се занемарује одређени број могућих варијација система. Поред тога, неки аутори користе и графичке методе [46].

3.1.3. Методе решавања проблема оптимизације полигенерационих система

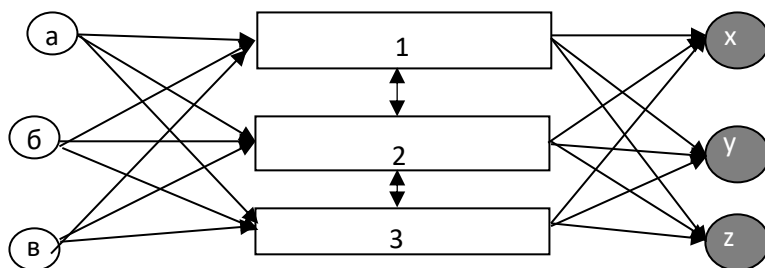
Понашање полигенерационих система као високо интегрисаних енергетских система, у току године је у општем случају нелинеарни проблем који зависи од временске доступности одређених ресурса, промене енергетских оптерећења конзума у току времена и расположивости система тј. модула система и њиховог капацитета за подмиривање ових оптерећења. Проблем доступности ресурса је од посебног значаја код хибридних система са високим уделом примене ОИЕ, попут соларних топлотних система [52, 53], фотонапонских (PV) [54] и система са акумулаторима топлоте [55].

С обзиром на сложеност полигенерационих система и њихових физичких и математичког модела, техно-економска оптимизација полигенерационих система може да подразумева математичко моделирање и нумеричко решавање проблема применом одговарајућег софтвера. У том случају билансне једначине (билансне једначине компонената, математичке релације које описују интеракцију компонената, температурне нивое, перформансе и трошкове који се доводе у везу са појединим компонентама или модулима, као и термодинамичка и друга својства радних медијума) треба прилагодити нумеричком решавању солвера примењеног софтвера. За предвиђање (процену) понашања полигенерационих система често се користе софтверски алати [2, 41, 43, 44, 50, 56, 57, 58] где се врши симулација система ради испитивања понашања система у одређеном сценарију или утицаја одређених параметара на понашање система. Преглед софтверских алата за симулацију понашања енергетских система [59] показао је могућности моделирања и симулације различитих проблема из области симулирања и оптимизације сложених енергетских система.

Методе линеарног програмирања се користе за оптимизацију система чији је математички модел линеарна функција, или је могуће извршити трансформацију математичког модела у линеарни облик [60, 61]. Методе мешовитог целобројног линеарног програмирања (Mixed Integer Linear Programming - MILP) се најчешће користе за

проналажење оптималне конфигурације система [27, 46, 48, 49, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71], при чему оптимизационе променљиве могу узимати вредности 0 или 1, чиме се означава активност или учешће модула или компоненте у систему. Литература о оптимизацији полигенерационих система указује на предности примене генетских алгоритама (GA) и еволутивних алгоритама (EA), које описује Ghaeby [72]. Оптимизација применом генетских алгоритама је успешно коришћена за оптимизацију различитих интегрисаних енергетских система [54, 70, 73, 74, 75].

За оптимизацију полигенерационих система представљених математичким моделом, Liu и др., користе Мешовито целобројно линеарно програмирање (Mixed Integer Linear Programing- MILP) [6, 71, 76, 77]. Овакви модели формиран су за систематско доношење одлука са циљем одређивања најбоље конфигурације међу могућим алтернативама система. У ову сврху, модел се шири до модела суперструктуре (слика 15) који садржи доступност ресурса (технологија/компонената), процес производње са производима, укључујући на тај начин интеракције између различитих производних компонената.



Слика 15. Шематска репрезентација модела суперструктуре за одређивање конфигурације полигенерационог система (где су: а,б,в -ресурси; 1,2,3 – полигенерациони модули, x,у,z – производи система)

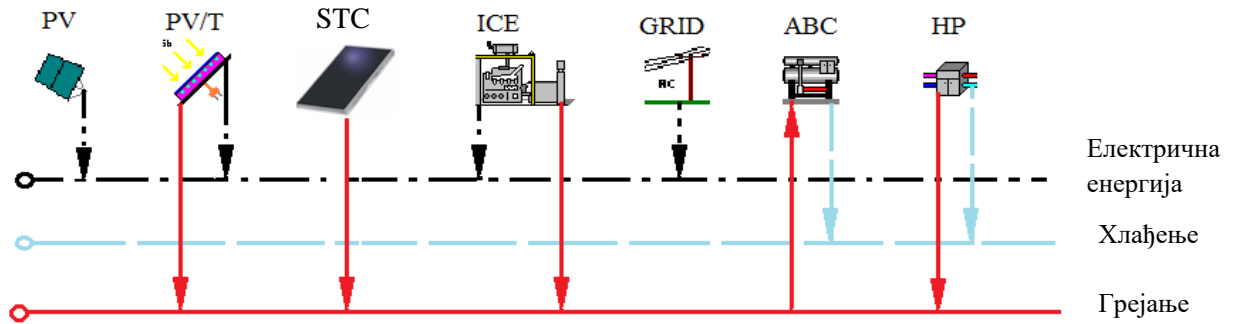
Овај модел се обично користи са МИЛП методом за оптимизацију конфигурације система, и пружа могућност одређивања најбоље комбинације елиминацијом постојања блокова и њихових међусобних веза. Суперструктура почиње комбинацијом ресурса (тј. извора примарне енергије), технологија и производа, а користи се за стратешко планирање (избор примарних извора, технологија конверзије енергије, додела ресурса одговарајућој технологији), планирање проширења капацитета, планирања производње [6, 71, 76, 77]. Представљена метода и модел за одређивање конфигурације полигенерационог система МИЛП методом на основу модела суперструктуре (слика 16), иако се може користити за

одређивање могуће конфигурације полигенерационог система има недостатке у погледу прецизности предвиђања понашања полигенерационих модула који раде са делимичним оптерећењем у експлоатационим условима дефинисаним моделом конзума, као и у погледу предвиђања промене понашања конзума у току времена, и пружања информација о оптималном капацитету система.

Услед сложености полигенерационих система (слика 16) у поређењу са конвенционалним системима (тј. системима за појединачно пружање неке од анализираних производа или услуга: грејање, хлађење, производњу електричне енергије или материјалних производа), од изузетног је значаја извршити прецизну техно-економску анализу полигенерационих система [60]. Одлуке о интеграцији, конфигурацији, снази или капацитету полигенерационог система, најчешће се врше на основу економских или финансијских параметара, који у процесу оптимизације представљају оптимизационе променљиве. Економски параметри који се користе као оптимизационе променљиве су обично годишњи трошкови рада постројења [56, 60, 65, 69, 78, 79], ануитетни годишњи капитални трошкови са трошковима горива, рада и одржавања постројења [52, 80, 81], трошкови животног циклуса система (Life Cycle Costs – LCC) [54], нето садашња вредности [69, 74] и стопа трошкова (тј. специфични јединични трошкови) производа [72].

Поред споменутих економских критеријума, еколошки или енергетски критеријуми се такође користе за оптимизацију интегрисаних система. Редукција емисије гасова са ефектом стаклене баште, која се обично за потребе оваквих проблема узима преко емисије CO₂ се често користи као оптимизациона променљива у литератури [54, 65, 66, 79]. Неки аутори врше процену перформанси рада полигенерационих система на основу остварене уштеде примарне енергије у поређењу са употребом примарне енергије конвенционалних система исте намене [27, 56, 60, 74, 82].

У раду [83] извршено је поређење понашања различитих конфигурација тригенерационих система за потребе истог конзума, без варијације капацитета система, поређењем резултата симулације, што се може сматрати једном од најједноставнијих метода оптимизације енергетских система. За производњу електричне енергије се предвиђа могућност употребе гасног мотора са унутрашњим сагоревањем или гасне турбине (микро гасне турбине). Мотор и турбина могу користити природни гас за свој погон, биогаз добијен из биомасе или њихову мешавину.



Слика 16. Обједињена шема симулираних конфигурација микро тригенерационих система [83]: PV- фото напонски колектори; PV/T- фото напонски/топлотни колектори, STC – соларни тополотни колектори, ICE - мотор са унутрашњим сагоревањем са погоном на природни гас, GRID – национална мрежа електродистрибуције, ABC- абсорпциони чилер, HP- топлотна пумпа вода-вода

Ипак, иако примењена метода пружа информације о понашању поређених конфигурација система за задовољавање потреба анализираног конзума, проблем капацитета система није третиран, нити су сагледане све могуће алтернативне конфигурације система које би могле да задовоље локалне потребе.

На основу резултата истраживања [84], где је извршена оптимизација когенерационог система применом методе MILP, наводи се да се оптимизација радних параметара система може вршити тек када постоје фиксиране вредности променљивих као резултат оптимизације конфигурације система. На основу истраживања проблема оптимизације когенерационог система А. Piacentino [84] закључује да је примена еволутивних алгоритама претраге, употребом генетских алгоритама за оптимизацију енергетских система није најбоље решење, због неадекватног третирања проблема са јаким ограничењем, иако се ови алгоритми често користе за оптимизацију енергетских система.

Генетски алгоритми се могу прилагодити за оптимизацију рада постројења, као интерни поступак у оквиру итеративног поступка оптимизације синтезе и дизајна (конфигурација + капацитет) еволутивних алгоритама претраге. Употреба генетских алгоритама за оптимизацију енергетских система није најбоље решење, због неадекватног третирања проблема са јаким ограничењем, иако се ови алгоритми често користе за оптимизацију енергетских система.

Код оптимизације полигенерационих система, функција циља садржи економске и еколошке критеријуме, те њена вредност непосредно зависи од оцене система по овим критеријумима. Како термодинамичке неефикасности система утичу на економске и еколошке неефикасности, оне посредно утичу и на квантификацију система по еколошким и економским критеријумима и на вредност функције циља. Рад и перформансе полигенерационог система утичу на инвестиционе трошкове, трошкове рада и одржавања, тако да се функција циља формира на основу параметара рентабилности (зависно променљивих). Оптимизација конфигурације полигенерационог система представља трагање за конфигурацијом састављеном од одговарајућих модула чиниоца полигенерационог система са најбољим вредностима критеријума оптимизације. Оптимизација капацитета полигенерационог система представља трагање за оптималним снагама или капацитетом модула који чине полигенерациони систем са најбољим вредностима критеријума оптимизације. Сходно томе, оптимизација конфигурације и капацитета полигенерационог система представља трагање за конфигурацијом састављеном од одговарајућих модула одговарајућих снага/капацитета, са највишом квантитативном вредношћу по критеријума оптимизације, попут параметара рентабилности и емисије CO₂.

Оптимизационе методе обично не узимају у обзир могућности интеграције енергетских процеса, занемарују енергетске потребе и дају предност производњи електричне енергије. Интеграција процеса код полигенерационих система комбинује све енергетске и/или материјалне потребе конзума (попут грејања, хлађења, електричне енергије, потрошње неке материја и сл.) са употребом локално доступних ресурса и/или применом обновљивих извора енергије. Последица високог нивоа интеграције је већа сложеност система у поређењу са конвенционалним системима као и велика зависност међу локално произведеним услугама. Поред тога, полигенерациони системи могу да се састоје из већег броја полигенерационих модула (два или више):

- Когенерациони блок (гасна тубина или мотор са унутрашњим сагоревањем са генератором), који се најчешће користи за производњу топлотне и електричне енергије;
- Сорпциони расхладни уређаји (адсорпциони или апсорпциони) чија примена даје могућност употребе топлотне енергије ради постизања расхладног ефекта;

- Био-рафинерије, чија примена даје могућност конверзије биомасе или отпада у биогорива (биогаз), електричну енергију и/или друга једињења,
- Компресорски чилери, који се користе за постизање расхладног ефекта, који могу користити локално произведену електричну енергију, или електричну енергију из електродистрибутивне мреже,
- Технологије за употребу обновљивих извора енергије, које технички могу бити интегрисане са остатком полигенерационог система, и
- Акумулаторе енергије (најчешће акумулатори топле или хладне воде).

3.2. Математичко моделирање и нумеричка симулација полигенерационих система за проблеме оптимизације полигенерационих система

Избор најбоље конфигурације полигенерационог система врши се на основу утврђених критеријума у квалитативном и квантитативном смислу, што је могуће извршити применом оптимизационих метода. У овом раду се разматра методологија техно-економске оптимизације конфигурације и снаге полигенерационих система са применом ОИЕ на основу техничких, економских и еколошких критеријума, те су примењене методе представљене у овом раду изабране за решавање овог специфичног проблема.

3.2.1. Методе математичког моделирања и нумеричких симулација полигенерационих система

Моделирање полигенерационог система за потребе оптимизације конфигурације система врши се модуларним приступом. Конфигурација полигенерационог система одређена је полигенерационим модулима који чине суперструктуру полигенерационог система. Модел полигенерационог система се може представити комбинацијом и спајањем његових модула или блокова. Везе се формално могу направити на контролним границама подструктуре или у чворним тачкама које представљају границе тј. пресек контролних граница [85]. Да би се понашање полигенерационих система сагледало на најбољи начин, потребно је извршити декомпозицију система на функционалне целине (модуле). На тај начин може да се сачува природа основних функција система и сагледају разлике у понашању различитих интегрисаних функционално могућих конфигурација. Модел суперструктуре полигенерационог система преставља сложени динамички систем чија је

конфигурација подложна променама, што је одређено статусом појединих модула (активни, неактивни, искључени) у датом режиму рада. Суперструктуру полигенерационог система чине полигенерациони модули који потенцијално могу да чине оптималну конфигурацију полигенерационог система, при чему је међусобна интеракција полигенерационих модула дефинисана на основу техничко-технолошких услова интеграције полигенерационих система. Модел суперструктуре полигенерационог система спрегнут је са моделом потрошње енергије одабраног објекта чије енергетске потребе треба да задовољи. На тај начин, могуће је вршити симулацију понашања анализираних конфигурација полигенерационог система у току рада за моделиране профиле потрошње енергије, одређене моделом конзума.

Моделирање енергетских система се може сматрати првом фазом процеса симулације система, вишефазне итеративне процедуре која почиње са одређивањем циља, истраживањем физичких феномена који се јављају у датом процесу и коначно развојем и решавањем математичког модела [85]. Моделирање суперструктуре полигенерационог система се врши са циљем одређивања оптималне конфигурације и капацитета тог система, те се номиналне снаге и/или капацитети полигенерационих модула који чине суперструктуру полигенерационог система дефинишу као независно променљиве у фази оптимизације. GenOpt оптимизациони алгоритми се користе за решавање проблема оптималне конфигурације и капацитета сваког од полигенерационих модула који чине систем. Решење оптимизационог проблема дефинише оптималну конфигурацију полигенерационог система за спрегнути конзум одређујући полигенерационе модуле снаге и/или капацитета већим од 0.

За потребе моделирања енергетских система, најпре се врши декомпозиција структуре система на подсистеме или функционалне целине, чиме се добија физички модел система. Подсистеми добијени декомпозицијом најчешће одговарају компонентама или модулима који чине само постројење. Модел компонентата (подсистеми или подструктуре—функционалне целине) чине библиотеку општих модела компонентата који могу ући у састав модела полигенерационог система. Понашање сваког од подсистема или модула који чини физички модел полигенерационог система описује се одговарајућим математичким моделом. Повезивањем и интеграцијом ових модела могуће је формирати модел

полигенерационог постројења који се касније може користити за нумеричку симулацију понашања и оптимизацију система. Груписањем математичких модела компонената, добија се систем једначина који одговара моделу система. Овај систем једначина је најчешће неопходно допунити додатним условима како би био затворен. Применом ове методологије могуће је створити библиотеке модела подсистема који одговарају физичким, хемијским и информатичким компонентама. Процедура опонаша инжењерски приступ код кога се систем гради од подсистема који су и сами састављени од мањих компонената. Компоненте и њихове међуповршине се могу стандардизовати и на тај начин сакупљати како би се створила библиотека модела. Оваква библиотека може имати широку примену.

Посебан изазов код моделирања инжењерских система представља чињеница да је често неопходно радити са хетерогеним системима из различитих области, попут хемијских, електричних, механичких и информационих система. Сваки од система се моделира или билансним једначинама масе, енергије, количине кретања, или адекватним описом обраде информација у подсистему. Понашање на контролној граници се добија описивањем понашања променљивих величина повезаних подсистема. Контролне границе често условљавају једнакост променљивих појединих подсистема (попут биланса масе, енергије или количине кретања).

Ипак, треба нагласити да не постоји универзална методологија нити модел независан од контекста конкретног проблема. Па и библиотека модела мора бити повезана са контекстом конкретног проблема, и може се сматрати неупотребивом уколико не постоји имплицитно слагање са генеричким контекстом неког проблема, таквим да се неки од генерисаних подмодела могу сачувати за каснију употребу.

Моделирање је процес који је неопходно обавити пре било које симулације. Ово је вишефазни итеративни процес, који треба да садржи следеће фазе [85]:

1. Одређивање циља;
2. Опис физикалности процеса;
3. Одређивање физичких феномена који ће бити обухваћени математичким моделом;
4. Развој математичког модела;

5. Имплементација математичког модела помоћу нумеричког „солвера“ – развој нумеричког модела;
6. Тестирање нумеричког модела;
7. Верификација усклађености резултата нумеричког модела и физичког модела;
8. Верификација резултата према резултатима експеримента;
9. Спровођење додатних релевантних симулација;
10. Закључак.

Тестирање нумеричког модела треба да верификује добијене резултате поређењем са измереним резултатима физичког модела. У супротном потребно је вратити се на неку од претходних фаза и извршити корекције модела како би се добили квалитетнији резултати.

Циљ моделирања једног система је добијање математичког описа понашања система као функцију изабраних физички значајних променљивих. Са променом природе система, мењају се и променљиве система. Лако је уочити да је за симулацију једног процеса неопходно потпуно познавање физикалности процеса, направити математички модел физичких феномена који се јављају и пронаћи адекватну нумеричку методу за решавање математичког модела [85].

Поред класичних метода моделирања, попут мрежне методе [85, 86, 87, 88, 89] која се још увек најчешће користи у техници, у литератури је могуће пронаћи и нове методе моделирања понашања система, које се често описују као “интелигентне”, “адаптивне”, обично су базиране на “фази (fuzzy)” логици и могу се користити за нелинеарне и стохастичке проблеме. Истраживања понашања модела „неуронских мрежа“ [90, 91, 92, 93] предвиђају понашање система на основу података унетих у модел у такозваној фази „учења“, при чему улазни подаци углавном захтевају богате базе података које се добијају мерењем одговарајући параметара које дефинишу понашање реалних система. Примена оваквих метода за предвиђање понашања полигенерационих система захтевала би детаљно испитивање понашања различитих конфигурација полигенерационих система и мерења на реалном постројењу са великим бројем различитих модула. Овакви модели могу да се користе за велике и сложене системе са доста међусобно зависних параметара, сложено „мапирање“ система и идентификацију система [90]. Осетљивост на грешке је занемарљиво мала тј. могу да користе некомплетне податке, погодни су за нелинеарне проблеме, дају

предикције и генерализације врло брзо, након што су једном „истренирани“ [90]. Приступ моделирању са неуронским мрежама је коришћен за моделирање система за грејање, хлађење, моделирање размењивача топлоте, котлова и др. [90, 91, 92, 93]. Такође, један од новијих приступа је и моделирање “агената” или извршиоца (Agent based modeling) [94]. Овај метод је погодан за симулирање динамике комплексних система и комплексних адаптивних система и даје могућност урачунавања интеракције разнородних система, нпр. интеракције техничког система и људског фактора или друштва. Код овог приступа моделирају се аутономни извршиоци (агенти) и њихове интеракције. Систем се гради додавањем “агената” и његових веза, при чему може доћи до само-организације система и понашања, облика и структуре модела који нису експлицитно програмирани. Овакви модели имају способност да “уче” из међусобних интеракција “агената” и да према томе ускладе своје понашање. С обзиром на потребне детаљне базе података о понашању различитих конфигурација реалних система, и проблеме са доступношћу већег броја полигенерационих модула на једном месту, ове методе неће даље бити разматране у раду.

У погледу конфигурације, може се сматрати да се полигенерациони систем састоји од низа комбинација подструктура структура (блокова) тј. модула који могу међусобно да ступе у интеракцију. Моделирање полигенерационих система може да подразумева интеграцију процеса према њиховим сличностима тј. компатибилностима са когенерационим циклусом што отвара могућности за комбиновану производњу електричне енергије, грејање, хлађење, али и истовремену синтезу течних биогорива, биогаса, или других производа одређених потребама процеса, што заједно има за последицу повећање опште енергетске ефикасности. Такође, у оваквим системима своју примену налазе и различите врсте размењивача топлоте.

Са аспекта решавања математичког модела могући су различити приступи. Уколико већ постоји развијени софтвер за симулацију, који користи одређени нумерички метод – „солвер“, математички модел треба формирати у складу са захтевима коришћеног нумеричког модела. Такође, могуће је формирати математички модел и за његово решавање користити већ постојећи, стандардни софтвер, што изискује имплементацију модела заједно са нумеричким „солвером“ у одговарајућем програмском језику и формату у зависности од коришћеног софтвера [59]. Наравно, могуће је формирати и нову нумеричку

методу – нови солвер, на основу захтева формираног математичког модела. У овом случају постоји слобода избора формата и програмског језика приликом имплементације математичког и нумеричког модела.

3.2.2. Преглед софтвера за математичко моделирање и нумеричке симулације

За математичко моделирање, нумеричке симулације и оптимизацију енергетских система данас постоји више различитих софтвера, те се код оваквих проблема јавља проблем избора најбољег софтвера. Могућности софтвера, библиотеке математичких модела компонената и солвер се разликују код данас доступних софтвера. Elmegaard је анализирао софтвере за симулирање процеса у термоелектранама, при чему је закључио да су анализирани софтвери врло специфични и намењени решавању специфичних проблема, релативно тешки за учење и врло скупи [87]. Поређење софтвера за симулацију процеса у когенерационим системима са различитим приступом и секвенцијалним или симултаним солвером представљени су у литератури [95]. Поређење резултата симулације реалног когенерационог система применом три различита софтвера представљени су у литератури [96]. Поређење софтвера за симулацију зграда извршили су Crawley и др. [97]. У овом раду извршен је преглед изабраних софтвера погодних за математичко моделирање и нумеричке симулације полигенерационих система са применом ОИЕ. Анализа је обухватила поређење могућности софтвера, врсту солвера, њихових алата и библиотеке математичких модела. На основу резултата анализе, извршен је избор софтвера за симулацију и оптимизацију полигенерационих система.

Анализа је обухватила следеће софтвере:

- ENERGY PRO;
- EnergyPlus;
- HOMER (Hybrid Optimization software tools of hybrid systems);
- HYBRID2;
- TRNSYS.

3.2.2.1. ENERGY PRO

ENERGY PRO је комерцијални софтвер за моделирање, симулацију и техно-економску анализу и оптимизацију сложених енергетских пројеката. Софтвер може да се користи за

симулацију дистрибуције електричне и топлотне енергије, енергетских потреба, и сл. [98]. Софтвер може да се користи за симулацију когенерационих модула, гасних мотора, котлова, акумулатора топлоте, индустријских когенерационих система, апсорпционих и електричних чилера, али и ветрогенератора, соларних топлотних и фотонапонских колектора. Симулације су квазистатичке, са могућношћу избора временског корака. Поред техничких система, софтвер може да врши прорачуне економских параметара, цена, тарифа, пореза и сл. Софтвер се може користити за решавање проблема националне или регионалне енергетике.

3.2.2.2. ENERGYPLUS

ENERGYPLUS је софтвер за симулацију понашања зграда, израђен на основи програма BLAST и DOE-2. BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) и DOE-2 су развијени касних 70. и раних 80. као алати за процену енергетских потреба зграда. EnergyPlus је софтвер за анализу термичких потреба зграда, развијен од стране америчког департмана за енергију (US Department for Energy). О софтверу је доступна богата документација. У основи овај симулациони програм је базиран на енергетском билансирању. Софтвер представља интегрисано софтверско решење које се састоји од делова за симулацију зграде, система снабдевања и система за производњу енергије. У току симулације решавање система једначина које представљају математички модел система је симултано. Симулације су квазистатичке, при чему је могуће изабрати трајање временског корака симулације. Софтвер сам по себи није предвиђен за економске анализе, али се економска анализа и оптимизација могу вршити у комбинацији са другим софтверима [97, 99, 100] .

3.2.2.3. HOMER

HOMER (Hybrid Optimization software tools of hybrid systems) је софтвер развијен од стране NREL (National Renewable Energy laboratory, USA) [101]. Овај софтвер се користи за оптимизацију хибридних система, који садрже фотонапонске колекторе, батерије, ветрогенераторе, гориве ћелије, котлове и сл. Симулације су квазистатичке са временским кораком од једног сата. Вредности свих параметара симулације су константни у току сваког временског корака. Софтвер се може користити и за прорачун трошкова у току животног

циклуса анализираног система. Може се користити за симулацију, оптимизацију и анализу осетљивости [101].

3.2.2.4. HYBRID2

HYBRID2 је развијен од стране Renewable Energy Research Laboratory (RERL) универзитета у Масачусетсу, и представља хибридни софтвер за симулацију система који чине електро-оптерећења, дизел генератори, батерије, ветрогенератори, фотонапонски колектори и сл. Временски корак симулације се може мењати у границама од 1 минута до 1 сата. NREL предлаже оптимизацију система применом HOMER софтвера и побољшање оптималне конфигурације применом HYBRID2 софтвера [102].

3.2.2.5. TRNSYS

TRNSYS је софтвер за динамичку симулацију и оптимизацију енергетских система, развијен на Универзитету у Висконсину, САД [103, 104, 105]. Софтвер представља прошириво софтверско окружење и може се користити за квазистатичке (динамичке) симулације енергетских система и зграда. Може се користити за испитивање енергетских концепата, од једноставних система преко зграда и њихове опреме, као и за одређивање радних стратегија појединих система, примену обновљивих извора енергије и сл. Софтвер поседује библиотеку климатских података за велики број локација са просечним часовним вредностима климатских параметара. Софтвер пружа могућност додавања једначина и/или математичких модела нових модула од стране корисника. Могуће је упаривање софтвера са другим програмима ради предпроцесирања, постпроцесирања или за вршење интегрисане симулације применом више софтвера [106]. Може се користити за оптимизацију упаривањем са GenOpt оптимизационим софтвером.

3.2.2.6. Избор методе и алата за математичко моделирање и нумеричку симулацију и оптимизацију полигенерационих система

На основу прегледа литературе и поређења карактеристика и могућности одабраних софтвера за симулацију и оптимизацију полигенерационих система (табела 13, табела 14), може се закључити да су ENERGY PRO, ENERGYPLUS и TRNSYS најкомплетнија софтверска решења. ENERGYPLUS и TRNSYS више одговарају врсти проблема

анализираног у овом раду. Оптимизацију система и трошкова применом ова два софтвера могуће је вршити упаривањем са додатним оптимизационим софтвером. TRNSYS [103] има најбогатију библиотеку математичких модела полигенерационих модула, и може да врши симулације њиховог понашања са више детаља у односу на остала разматрана решења. Могуће је упаривање софтвера са GenOpt оптимизационим софтвером за решавање оптимизационих проблема. На основу ових разматрања, комбинација TRNSYS/ GenOpt [103] ће бити коришћена за потребе математичког моделирања, нумеричке симулације и оптимизације полигенерационих система.

Табела 13. Поређење изабраних софтвера за симулацију и/или оптимизацију енергетских система

Назив/својство	Општи солвер	Симулација зграде	Симулација система дистрибуције енергије	Симулација производње енергије	Оптимизација система	Оптимизација трошкова	Анализа животног циклуса система	Грејање/хлађење	Потребна/произведена електрична енергија	Квазистатичка симулација	Стационарна симулација
ENERGY PRO		x	x		x	x		x	x	x	
ENERGYPLUS		x	x	x	x*	x*		x	x	x	
HOMER			x		x	x	x	x	x		x
HYBRID2			x		x	x			x	x	
TRNSYS	x	x	x	x	x*	x*		x	x	x	x

*уз примену додатног софтверског алата

Табела 14. Библиотеке софтвера за симулацију појединих уређаја

Назив/модул	Климатски параметри	Системи грејања, хлађења, вентил.	Когенерација	Обновљиви извори енергије	Ветар	Соларни топлотни системи	Фотонапонски системи	Чилери	Топлотне пумпе	Гориве ћелије	Мале хидро електране	Колтови	Осветљење	Засенчење, соларно зрачење	Природна вентилација	Цевоводи, канали	Термичке зоне	Емисије гасова са ефектом стаклене баште	Термодинамичка својства радних медијума	Мотори са унутрашњим сагоревањем	Акумулација енергије	
ENERGY PRO	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x			x	x	
ENERGYPLUS	x	x	x	x		x	x	x	x			x	x	x	x	x	x				x	
HOMER				x	x		x			x	x	x									x	x
HYBRID2					x		x														x	x
TRNSYS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	

3.2.3. Методе економске анализе полигенерационих система

Планирање и израда полигенерационих система се у финансијском смислу може сматрати инвестиционим пројектом. За оцену рентабилности инвестиционих пројеката могу се користити типичне методе попут методологије светске банке или UNIDO (Организација уједињених нација за индустријски развој) методологије [107], али се у литератури могу пронаћи и сличне методологије прилагођене условима одређеног тржишта или одређеној врсти инвестиционих пројеката попут пројеката енергетске ефикасности или примене обновљивих извора енергије [108], пројеката енергетске ефикасности локалних самоуправа [109], енергетске ефикасности зграда [110], пројеката примене когенерационих система [111]. За потребе анализе рентабилности инвестиционих пројеката, обично се користе сталне цене, исказане у валути (€) која временом губи своју вредност.

Основни циљеви примене метода економске анализе инвестиционих пројеката израде полигенерационих система су:

- квалитативна или квантитативна оцена финансијске исплативости и економске оправданости полигенерационог система;

- упоређивање алтернативних решења инвестиционог улагања у полигенерациони систем, уколико постоје;
- оцена прихватљивости полигенерационог система за финансирање на основу упоредивих информација које проистичу из примене изабране методологије.

Постоји више економских критеријума који се могу користити као величине од значаја за оптимизацију полигенерационих система, али не постоји универзални договор коју од њих треба користити за проблеме техно-економске оптимизације. Како се ради о сложеним енергетским системима са обновљивим изворима енергије који могу допринети унапређењу енергетске ефикасности и повољнијем утицају на животну средину, за потребе оптимизације могу се применити у већој или мањој мери наведене методе из литературе [107, 108, 109, 110, 111].

3.2.3.1. Економске величине за оцену полигенерационих система

Годишње уштеде представљају нето уштеде у текућим трошковима за сваку годину, које су настале као резултат примене полигенерационог система након успешне имплементације инвестиционог пројекта [109]. Годишње уштеде могу бити резултат смањених трошкова накнаде за употребу електричне енергије, горива или текућих експлоатационих трошкова. Поред тога, примена полигенерационих система може довести до остваривања профита који се остварују продајом производа система.

3.2.3.1.1. Трошкови производа полигенерационог система

Трошкови производа полигенерационог система (енергетски или материјални) могу се сматрати разумним параметром оптимизације. Трошкове производа полигенерационог система чине трошкови доступних извора енергије, попут трошкова горива, трошкови других ресурса или других материја чија се трансформација врши применом полигенерационог система, али и трошкове самог система који врши трансформацију ресурса у локално потребне енергетске или материјалне производе. Прираштај најмањих трошкова система се може дефинисати као минимални трошак поседовања система и трошак рада у току животног циклуса полигенерационог система. Оптимизација по овом критеријуму за системе где се комбинује употреба соларне енергије са другим изворима

није препоручљива [112], због релативно високе цене поседовања соларног система који најчешће није у могућности да самостално подмири све потребе.

Инвестициони пројекат почиње улагањем у периоду инвестирања и извођења радова, што, нарочито код сложених система, може да траје дуже од годину дана. Након овог периода, почиње период експлоатације, када може доћи до прихода од уштеде и продаје енергије или других производа. Поред прихода, период експлоатације карактеришу и оперативни трошкови попут трошкова горива, одржавања и сл.

По међународним стандардима финансијског пословања и закону о рачуноводству и ревизији „Приходи се дефинишу као бруто прилив економских користи у одређеном периоду које се остварују из редовних активности предузећа, када ови приливи доводе до повећања сопственог капитала, осим оних повећања која се односе на уносе власника капитала“ [107]. Приходи код инвестиционих пројеката полигенерационих система су:

- Приходи од смањених трошкова енергената;
- Приходи од продаје произведене енергије.

Расходи се дефинишу као смањење економских користи током обрачунског периода које се одржава кроз одлив, смањење средстава или повећање обавеза, што за последицу има смањење висине капитала, осим смањења капитала која настају по основу повлачења из пословања дела капитала од стране власника и расподеле добитка власницима [107].

Код пројеката полигенерационих система јављају се следећи расходи:

- Трошкови опреме;
- Амортизација;
- Трошкови енергената;
- Трошкови инвестиционог одржавања.

Амортизација је трошак који се у стручној литератури превасходно повезује са улагањима у основна средства, а односи се на смањење вредности средстава (опреме) услед трошења и хабања [107]. Амортизација се урачунава чак и за нову опрему, јер она указује на замену опреме након одређеног периода, чак и ако до тог тренутка опрема не захтева никаква улагања [107].

Трошкове енергената полигенерационог система чине трошкови горива и других енергената и ресурса који се користе, а могу се поделити на варијабилни и фиксни део.

Варијабилни део се одређује на основу потрошње, док фиксни део не мора да постоји (накнада за ангажовану снагу, транспорт горива до локације, административне таксе и сл).

Трошкови инвестиционог одржавања се одређују као процентуални удео стварних улагања у основна средства са процентима који осликавају годишње трошкове њиховог одржавања [107].

Сваки од наведених трошкова има своје специфичности по својој природи и у погледу информација неопходних да би се ти трошкови могли предвидети за потребе економске анализе полигенерационих система.

3.2.3.1.2. Временски период трајања пројекта

Временски период трајања пројекта, век трајања пројекта, може се одредити на основу више критеријума. Временски период за који се врши пројекција новчаних токова експлоатације полигенерационог система назива се и техно-економски век трајања пројекта. Краћи временски период се пројектује за неизвесне пројекте, али узрокује погрешно исказане параметре ефикасности инвестиционог улагања, јер се у нереалном року пројектује наплата резидуалне вредности [107]. Дужи временски период може бити физички, технолошки или економски [107]:

- Физички живот пројекта представља период у току кога фиксно средство може да се користи;
- Технолошки живот пројекта представља време које ће протећи пре него што се појави нова продуктивнија технологија;
- Економски век пројекта представља време после кога се користи који се очекују од пројекта (нето новчани ток и резидуална вредност) не могу предвидети са прихватљивом поузданошћу.

Технички економски век трајања пројекта израде и експлоатације полигенерационог система утврђује се на основу физичког критеријума и представља очекивани физички период трајања опреме тј. полигенерационих модула. У случају значајне разлике у физичком периоду трајања полигенерационих модула, након истека радног века модула претпоставља се инвестиционо улагање које одговара трошку набавке датог модула.

Економски век трајања пројекта представља период у коме инвестициони пројекат израде и експлоатације полигенерационог система доноси профит од уштеде или продаје

енергије или других материјалних производа. Економски век пројекта се користи за оцену финансијске исплативости и економске оправданости пројекта енергетске ефикасности [109], применљив је у анализи финансијске исплативости и економске оправданости примене полигенерационих система.

3.2.3.1.3. Процена почетне капиталне инвестиције

Иницијално капитално улагање (инвестиција) је трошак једнак нето новчаном издатку готовине које ће настати прихватањем инвестиционог пројекта (тј. на располагању је ако се пројекат не прихвати), а чине га издаци у фиксна средства (земљиште, грађевински објекти, машине, уређаји, трошкови пуштања у рад, пробног рада и сл.) тј. сви новчани издаци неопходни за довођење пројекта у стање нормалне експлоатације [113]. Ако пројекат подразумева употребу фиксних средстава која се већ налазе у власништву предузећа, а не користе се и могу да буду продата као таква, онда се продајна вредност ових средстава третира као капитално улагање [113].

Процена капиталних инвестиција може да се класификује у 3 групе [114]:

1. Прелиминарна (оријентациона) процена, тачности +/-30 %, која се користи у почетној студији оправданости, при којој се бира најповољније технолошко решење. Базира се на ограниченој количини доступних цена и детаља.

2. Процене при одобравању потребних буџета (ауторизације), се обично крећу са тачношћу +/-10 % са искуством и када компанија располаже ценама сличних пројеката, процене са прихватљивом тачношћу могу се направити и у почетним фазама пројектовања. У овој фази су потребни дијаграми који дају грубу везу између цене и величине главних елемената опреме.

3. Детаљне процене, тачности +/- 5-10 %. Користе се при контроли цене пројекта и при одређивању фиксне вредности уговора.

Почетно капитално улагање укључује трошкове:

- Пројектовања и инжењерског и грађевинског надзора;
- Позиција опреме, полигенерационих модула и трошкова уградње;
- Цевовода, мерних инструмената и система управљања.

Процена цена материјала и цена радне снаге су подложни инфлацији, те се њихова процена врши на основу историјских података [114]. На основу историјских података врши

се ажурирање старих цена за процену инвестиционих трошкова помоћу индикатора цена [35, 114].

Препорука је употреба заједничких индикатора за поједине гране индустрије. Величина укупног почетног капиталног улагања полигенерационих система може се одредити према методи процената од инвестиционе вредности [114], док је такође на основу познате величине почетног капиталног улагања, могуће извршити апроксимацију величине почетног капиталног улагања сличног постројења мање или веће снаге.

На основу табеларних података из литературе за машинске пројекте енергетских, термотехничких, процесних и хидрауличних објеката и постројења [114], за потребе овог рада извршена је линеарна апроксимација почетног капиталног улагања, што је погодније од табеларног приступа за потребе економске анализе оптимизационих проблема. Једначина апроксимације удела цене пројектовања у трошковима почетног капиталног улагања $R(p.o.)$ за машинске пројекте енергетских, термотехничких, процесних и хидрауличних објеката и постројења је:

$$R(p.o.)[\%] = -0,0002028I + 16,7876 \quad (1)$$

где је I вредност инвестиционог улагања.

Слично, вредности цене пројектовања као проценат почетног капиталног улагања у сложеније топлане, термоелектране и хидроелектране, топлотне и расхладне уређаје за хлађење и технолошке процесе те за полигенерациона постројења, може се представити линеарном апроксимацијом:

$$R(p.o.)[\%] = -0,00022I + 20,13617 \quad (2)$$

где је I вредност инвестиционог улагања.

За добијање функције апроксимације коришћена је метода најмањих квадрата [115].

3.2.3.1.4. Оперативни трошкови полигенерационих система

Стандардни оперативни трошкови улазних ресурса полигенерационог система проистичу из количина горива и других материјала који се морају утрошити у току рада полигенерационог система чија се трансформација врши до енергетских или материјалних производа жељених карактеристика. У зависности од производа и конфигурације полигенерационог система, на цену стандардних трошкова може да утиче цена горива, електричне енергије, других извора енергије као и цена других материја и ресурса. У

литератури [107], уводе се нормални тошкови производног процеса, који могу бити стандардни утросци за одређени тип производне делатности што се користи као мерило оптималне организације производног процеса тј. максимално рационалног трошења елемената производње, што је оправдано за стандардне производне процесе. Овај параметар се такође намеће као логична вредност за оцену ефикасности коришћења ресурса полигенерационог система у тржишним условима. Ипак, с обзиром на мали број полигенерационих система у функцији, вредности нормалних трошкова полигенерационог процеса су недовољно доступни, и могу се разликовати у зависности од конфигурације система и врсте производње.

Јединични трошкови енергије могу представљати параметар за евалуацију производње енергије, што укључује све повратне и неповратне трошкове који се јављају у току техно-економског циклуса. Јединични трошкови енергије C_e могу се одредити као:

$$C_e = \{I \cdot d / [1 - (1 + d)^{-t}] + C_{o\&m}\} / Pa \quad (3)$$

где је: C_e - јединични трошак одговарајућег енергента, I – тотални капитални трошак, d – дисконтна стопа, t – век трајања, $C_{o\&m}$ – годишњи трошак одржавања и рада уређаја или система, Pa – производња полигенерационог система.

Нето годишња уштеда остварива применом полигенерационог система може се изразити као [109]:

$$B = \sum B_t P_e - \Delta C_e \quad (4)$$

где су: B - укупна годишња новчана уштеда у [€], B_t – уштеда енергије у току године t ($t=1,2,\dots,n$); P_e – годишњи трошкове енергије, ΔC_e - промена експлоатационих трошкова.

Трошкови горива представљају трошкове куповине горива за рад конвенционалног - неинтегрисаног система или полигенерационог система. Одржавање и осигурање су рекурентни трошкови за одржавање система у радном стању и осигурање од пожара и сличних губитака, и могу бити део економске анализе енергетских система. „Паразитски“ трошкови енергије представљају трошкове рада уређаја за транспорт радних медијума (рад вентилатора и пумпи) и остале електричне и механичке енергије које систем користи за свој рад.

3.2.3.1.5. Извори финансирања

Извори финансирања показују порекло новчаних средстава из којег ће свако конкретно улагање бити финансирано, а могу се поделити на [109]:

- сопствене и
- позајмљене.

Код сопствених извора финансирања не постоји експлицитно исказан трошак, већ трошак коришћења сопствених средстава представља опортунитетни трошак, који се може сматрати изгубљеним приходом који би се остварио улагањем тих средстава у неку од других могућих пословних активности које могу донети веће приходе од улагања у полигенерационо постројење.

Трошак коришћења средстава из спољњих извора финансирања је камата и њена висина је позната из уговора о кредиту [107]. Осим камате, у пракси се могу јавити и додатни трошкови и то за [107]:

- гаранцију (уобичајено се плаћа на почетку сваког квартала и креће се у висини од 1 % неотплаћеног дела дуга);
- сервисирање кредита (плаћа се једнократно у моменту одобравања или у моменту уплате кредита и креће се од 0,5-1 % износа кредита);
- праћење кредита (динамика плаћања зависи од случаја до случаја, а износ се креће око 0,5 % неотплаћеног дела дуга);
- куповину меница (за износ који покрива вредност камате и главнице);
- процену хипотеке која се даје као залог (трошкови овлашћеног проценитеља);
- стављање хипотеке у залог (судски трошкови).

Камата се плаћа на неотплаћени део дуга и рачуна се као производ остатка главнице дуга на почетку периода (што је једнако остатку главнице дуга на крају претходног периода) са каматном стопом за припадајући период [107].

Каматна стопа за припадајући период се рачуна по следећем обрасцу [107]:

$$n=(1+i)^{m/12}-1 \quad (5)$$

где су: n - каматна стопа за припадајући период; i - годишња каматна стопа; m - број месеци за који се камата рачуна.

Враћање главнице кредита назива се отплата и везана је за период отплате [107].

Метод једнаких отплата подразумева да се у сваком ануитету (рати) враћа исти износ главнице [107]. Израчунавање се врши тако што се у првом кораку главница дуга подели са бројем периода (на пример месеци, квартала итд.) у којима се врши отплата кредита, чиме се утврђује износ отплате главнице у сваком ануитету, по обрасцу [107]:

$$O = G/n \quad (6)$$

где је: O - отплата у једном периоду; G – главница; n - број периода у којима се отплаћује главница.

По методи једнаких ануитета у сваком периоду у коме се враћа главница (период отплате), ануитети (отплата + камата) су једнаки [107]. По овом методу у првом кораку се израчунава ануитет по обрасцу [107]:

$$A = \frac{G(1+i)^ni}{(1+i)^n-1} \quad (7)$$

где је: A – ануитет; G – главница; n - број периода у којима се отплаћује главница; i - каматна стопа за припадајући период.

Ануитетни трошак животног циклуса полигенерационог система је просечна вредност пројектованог годишњег новчаног тока који је резултат инвестиционог пројекта израде полигенерационог система и његове експлоатације. Иако се може очекивати да се реални новчани ток разликује од године до године, сума у току времена економске анализе се може конвертовати на низ једнаких исплата исказаних кроз данашњу монетарну вредност, што се може сматрати еквивалентним променљивим трошковима у току животног века полигенерационог система. По истом принципу се формирају и ануитетне уштеде животног циклуса полигенерационог система.

3.2.3.1.6. Нето садашња вредност

Уколико од садашње вредности прихода пројекта одузмемо садашњу вредност свих инвестиционих и оперативних трошкова, добијамо нето садашњу вредност пројекта (енг. Net Present Value - NPV) [109]. Нето садашња вредност пројекта представља новостворену вредност, која преостаје након покрића укупних трошкова пројекта [109].

Нето садашња вредност одређује се према једначини (NPV) [109]:

$$NPV = \sum_0^n B_t / (1 + d^t) \quad (8)$$

где су: d - дисконтна стопа; n - економски век пројекта; B - нето новчани ток.

Дисконтовање новца у току времена представљено у литератури [107, 109] користи се за пројектовање новчаних токова инвестиционих улагања, при чему се узима у обзир утицај промене вредности новца у току животног века пројекта. Инсистирање на нето новчаном току, уместо диференцијалном добитку инвестиционог пројекта, сматра се значајним из два разлога [113]:

- разумљивији органима управљања;
- од њега зависи будућа инвестициона активност.

Да би пројекат био оправдан потребно је да NPV буде позитивна. NPV вредност се сматра добрим показатељем оправданости инвестиционог пројекта јер узима у обзир цео животни век пројекта, али не даје могућност поређења инвестиционих пројеката са различитом висином инвестиционог улагања. Пројекти са различитом висином улагања могу се упоредити помоћу коефицијента нето садашње вредности [109].

3.2.3.1.7. Трошак животног циклуса

У литератури [112] дефинисан је и трошак животног циклуса (Life Cycle Cost (LCC)) као величина за економску оцену соларних система. Трошак животног циклуса (LCC) полигенерационог система може се дефинисати као сума свих трошкова повезаних са испорученом енергијом и другим производима система у току његовог животног циклуса који је одабран за анализу, исказан данашњом монетарном (новчаном) вредношћу, а узима у обзир промену вредност новца у току периода животног циклуса система.

Основна идеја трошка животног циклуса је предвиђање будућих трошкова, чија се будућа вредност дисконтује назад до данашње вредности, тако што се срачунава колико би требало инвестирати према тржишној дисконтној стопи да би се добила потребна финансијска средства у тренутку када су она потребна [112]. Анализа трошкова животног циклуса укључује инфлацију при процени будућих трошкова. Ова метода може да укључи само главне трошкове или онолико детаља колико је од значаја за анализу.

3.2.3.1.8. Период повратка инвестиције

Период отплате - период повратка инвестиције се може дефинисати на више начина [112]:

1. Време потребно да годишњи ток новца постане позитиван;
2. Време потребно да кумулативна уштеда постане једнака почетној инвестицији, тј. време потребно да се надокнади почетна инвестиција уштедама и користима примене полигенерационог система (уштеде у гориву, користи од продаје енергије или нуспроизвода);
3. Време потребно да нето вредност кумулативних уштеда постане једнака нули;
4. Време потребно да кумулативне уштеде постану једнаке почетном капиталном улагању полигенерационог система;
5. Време потребно да кумулативна уштеда остварена применом полигенерационог система постане једнака главници дуга полигенерационог система.

Прости динамички рокови повратка инвестиција дефинисани су у литератури [109] и најчешће се користе у пракси за брзу оцену инвестиционог улагања. Недостатак примене простог периода повраћаја инвестиција као показатеља ефикасности инвестиционог пројекта је занемаривање промене вредности новца у току времена, док динамички период повраћаја инвестиција занемарује ефекте инвестиционог улагања након тренутка отплате инвестиционог улагања [109]. На основу спроведеног истраживања, утврђено је да се NPV може сматрати најпоузданијим параметром ефикасности инвестиционог пројекта [116].

3.2.3.1.9. Интерна стопа рентабилности

Интерна стопа рентабилности је тржишна дисконтна стопа са којом је годишња уштеда животног циклуса једнака нули, тј. дисконтна стопа при којој је садашња вредност соларне и несоларне опције једнака [112].

3.2.3.2. Поређење критеријума за економску оцену полигенерационих система

У ситуацији неограничених финансијских ресурса најбоље је користити NPV као најбољи параметар за доношење одлуке, јер је то показатељ који засигурно показује да ће капитал и вредност инвестиције бити увећана и за колико, сведено на вредност данашњег новца и даје слику о томе колико ће бити на располагању за инвестиције у будуће пројекте

[117]. У литератури [117] наведени су недостаци употребе периода повраћаја инвестиције, при чему је предност дата интерној стопи рентабилности као фактору који има више смисла, али који ипак може утицати на доносиоце одлука да донесу одлуку у корист пројекта са мањом NPV. Интерна стопа рентабилности такође доводи до погрешних закључака ако се пореде међусобно искључиви пројекти код којих је ред величине инвестиције различит као и када се животни век пројекта значајно разликује [117], што је случај код поређења различитих конфигурација полигенерационих система.

У капиталном планирању поред инвестиционих пројеката код којих су финансијске користи тешко мерљиве у квантитативној форми, срећу се и „мандатне“, „дефанзивне“ или „неекономске“ инвестиције, чије финансијске користи могу да буду неатрактивне [113]. Разлози за разматрање оваквих инвестиционих пројеката су у складу са нефинансијским циљевима инвестиционог пројекта.

Поред профита пројекта, често утицај на доношење одлуке имају и други фактори, попут уштеде сировина и природних ресурса, мотивација, уклапање са стратешким циљевима инвеститора или политиком корпоративне одговорности и сл. Израда и рад полигенерационих система заснованих на коришћењу ОИЕ може имати утицај и на животну средину, што такође може представљати додатну мотивацију.

3.2.4. Економска оцена утицаја на животну средину

Услови заштите животне средине регулисани су законском регулативом о заштити животне средине. Ови услови по питању примене енергетских система дефинисани су углавном новчаним казнама у случају непоштовања законских прописа. Поред законске регулативе, коришћење природних ресурса може се сматрати економским ресурсом уколико поседује економску вредност на основу које их користи људско друштво. „Услуге“ животне средине које могу имати вредност за човека су [118]:

- Услуге пречишћавања - мочварна подручја и шуме у функцији пречишћавања ваздуха;
- Циклични еколошки процеси - вегетациони процеси који везују CO₂, складиште га у биомаси до изумирања вегетације, након чега се врши трансфер угљеника у земљу. Узгајање биомасе доприноси везивању CO₂ из атмосфере;

- Регенерација и производња - екосистеми "узгајају" биомасу конверзијом светлости, енергије и хранљивих материја. Оваква биомаса обезбеђује храну, сирову материју и енергију.

Изазов економске анализе је одредити меру различитих еколошко-економских вредности природних и полу-природних екосистема [118]. Уколико би оваква мера постојала и била јасно дефинисана, друштво би имало много јаснију слику шта се губи или жртвује приликом деградације екосистема услед сталних претњи њихове конверзије у једноставније, мање диверсификоване системе [118].

Основни методолошки принцип валоризације утицаја на животну средину који немају директну тржишну вредност или имају вештачку „ниску“ тржишну вредност огледа се у њиховом повезивању са тржиштима цена, при чему то могу бити конвенционална тржишта, или хипотетичка тржишта [119].

На конвенционалном тржишту, вредност природног ресурса се везује за вредност финалног производа [119]. На хипотетичком тржишту, валоризација се везује за допринос датог фактора квалитету људских производа и услуга са аспекта животне средине [119]. На хипотетичким тржиштима, симулира се вредност питањима где људи дају одговоре како вреднују одређена добра или услуге. Технике валоризације укључују [119]:

- Ценовни приступ - реални или хипотетички трошкови се усмеравају на утицај квалитета животне средине;
- Приступ користи тј. бенефита - утицај промена у квалитету животне средине на могућности стварања профита.

Код ценовног приступа организације или индивидуе инвестирају у средства усмерена ка превенцији или измештању проблема који утичу на квалитет животне средине [119]. Превентивне мере су усмерене на извор или процес, док су мере измештања усмерене на последицу. Ове промене могу да створе штету фиксним средствима, па се у том случају цена одређује на основу трошкова замене или поправке ових фиксних средстава. Неповратна штета настала развојним пројектима може да утиче на „производе“ и „услуге“ животне средине [119]. У том случају се дефинишу паралелни пројекти, који би имали корист на животну средину, онолику колика је штета настала као последица развојног пројекта, а цена овог пратећег пројекта одређује цену еколошког утицаја развојног пројекта [119].

“Услуге“ животне средине су често улазне величине тржишних добара и услуга. Као последица, промена квалитета животне средине директно утиче на продуктивност оваквих профитних активности [119].

Промене у квалитету животне средине могу да утичу на људско здравље и њихову продуктивност. Приступ "губитка зараде" предвиђа еколошку вредност срачунавајући зараду и трошкове медицинског третмана који се може довести у везу са датим еколошким проблемима.

У току рада полигенерационих и конвенционалних система долази до емисија гасова са ефектом стаклене баште са неповољним утицајем на људско здравље и животну средину, али може доћи и до других емисија. Количина ових емисија може се користити за оцену утицаја полигенерационих и конвенционалних енергетских система на животну средину.

4. МЕТОДОЛОГИЈА ТЕХНО-ЕКОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА ЗАСНОВАНИХ НА КОРИШЋЕЊУ ОИЕ

У овом поглављу представљена је методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу ОИЕ. Код оптимизације полигенерационих система према предложеној методологији, део техничко технолошких услова третира се на нивоу интеграције система, а оптимизационе променљиве непосредно утичу на трошкове производа система и параметре економске рентабилности полигенерационог система, али и на емисију CO_2 конфигурације система. Промена почетних вредности изабраних параметара оптимизације – независно променљивих, утиче посредно на промену термодинамичких величина система (зависно променљивих) и на економске и еколошке параметре рада система.

Предложена метода подразумева употребу изабраних GenOpt оптимизационих алгоритама за решавање проблема оптимизације на основу нумеричке симулације понашања анализираних конфигурације полигенерационог система применом софтвера TRNSYS. Процесу оптимизације претходи процес интеграције полигенерационог система, чији је резултат дефинисање суперструктуре полигенерационог система, којом су дефинисане функционално могуће конфигурације полигенерационог система засноване на употреби применљивих полигенерационих модула. Процес интеграције узима у обзир доступност ресурса, примену полигенерационих модула и могућност њихове интеракције и подмиривање енергетских потреба применом полигенерационог система.

Након интеграције суперструктуре полигенерационог система, врши се моделирање (формирање физичког и математичког модела) конзума, суперструктуре полигенерационог система и њихове интеракције преко система снабдевања. Моделирање конзума и суперструктуре подразумева моделирање објеката и процеса конзума са једне стране и моделирање полигенерационих модула и њихове интеракције применом софтвера TRNSYS, према методи изложеној у овом раду.

У фази моделирања, посебну пажњу је потребно посветити избору оптимизационих променљивих, које треба прилагодити проблему оптимизације који се решава. За

оптимизацију конфигурације и капацитета полигенерационог система у овом раду, оптимизационе променљиве дефинишу учешће полигенерационих модула у суперструктури и њихове номиналне снаге или капацитете. Остале променљиве су зависно променљиве, и моделирају се као функција оптимизационих променљивих. Математички модели морају бити прилагођени за нумеричко решавање применом солвера TRNSYS [103], како би било могуће симулирати понашање конзума и полигенерационог система применом изабраног софтверског решења. Иако библиотека софтвера садржи моделе полигенерационих модула, својстава радних медијума, као и помоћних уређаја, потребно је дефинисати њихове међусобне интеракције, почетне и граничне услове, а у специфичним случајевима и моделирање одговарајућих физичких феномена или понашања одговарајућих модула, којих нема у библиотеци, као и њихове интеракције са остатком система. На тај начин, формира се сврсисходан математички модел понашања конзума, система снабдевања, дистрибуције и суперструктуре полигенерационог система и њихове интеракције, који солвер решава итеративно за сваки временски корак. Величина и број временских корака као и критеријум конвергенције за сваки временски корак дефинише се за сваки проблем посебно. За потребе анализираног оптимизационог проблема, врши се симулирање понашања система у току типичне метеоролошке године, па број и величина временских симулационих корака треба да одговарају периоду од годину дана. Избор временског корака врши се у складу са препорукама резултата истраживања утицаја временског корака код оваквог типа симулација [120], а у складу са правилима моделирања изабраног софтверског решења [103]. На основу истраживања [120], јасно је да временски корак од 1 часа у значајној мери утиче на непрецизност резултата код ове врсте симулације, док избор премалог временског корака реда величине 1 s или мање, захтева значајну примену линеарне интерполације и значајно продужује време симулације.

Резултати процеса симулације се анализирају, а пожељно је извршити валидацију модела мерењем одговарајућих параметара на реалним или лабораторијским објектима, у складу са могућностима. За валидацију се врши избор излазних параметара симулације, који одговарају мерљивим параметрима на реалном (или лабораторијском) објекту. За валидацију модела анализираног проблема, пожељно је вршити валидацију потрошње ресурса са једне стране и параметара који дефинишу квалитет подмирења потреба конзума са друге стране. Поред тога, у специфичним случајевима, могуће је вршити валидацију

одређених величина стања радних медијума, масених протока у систему и слично. У погледу валидације потрошње ресурса, код анализираних проблема оптимизације полигенерационих система, обично се пореди потрошња горива или сличног улазног ресурса реалног објекта или модула са симулираном потрошњом, са једне стране, и температуре конзума са друге стране. Овде треба водити рачуна о осталим утицајним параметрима у току мерења на реалном објекту и утицајним параметрима симулационог модела, попут температуре амбијента, дозрарене соларне енергије, влажности амбијенталног ваздуха. Како се симулације према предложеној методологији раде за типичну метеоролошку годину [121], а наведене параметре амбијента код реалног објекта у општем случају није могуће контролисати, валидација симулационог модела може бити отежана. Уколико валидација симулационог модела не пружи задовољавајућу тачност, врши се ревизија и модификација физичких или математичких модела. У случају прихватљивог поклапања одабраних излазних величина резултата симулације са одговарајућим мереним вредностима, резултат валидације се може користити као мера тачности спроведене анализе и касније спроведене техно-економске оптимизације. За валидацију проблема симулационог модела за проблем оптимизације конфигурације и снаге или капацитета енергетских система, у идеалном случају, било би потребно вршити валидацију мерењем излазних величина реалних објеката читавих серија уређаја и опреме у опсегу снага који одговара домену оптимизационог проблема. Ипак, у реалним условима оваква опсежна валидација се може сматрати непрактичном, те се понашање полигенерационих модула моделира на основу података произвођача опреме у различитим режимима рада.

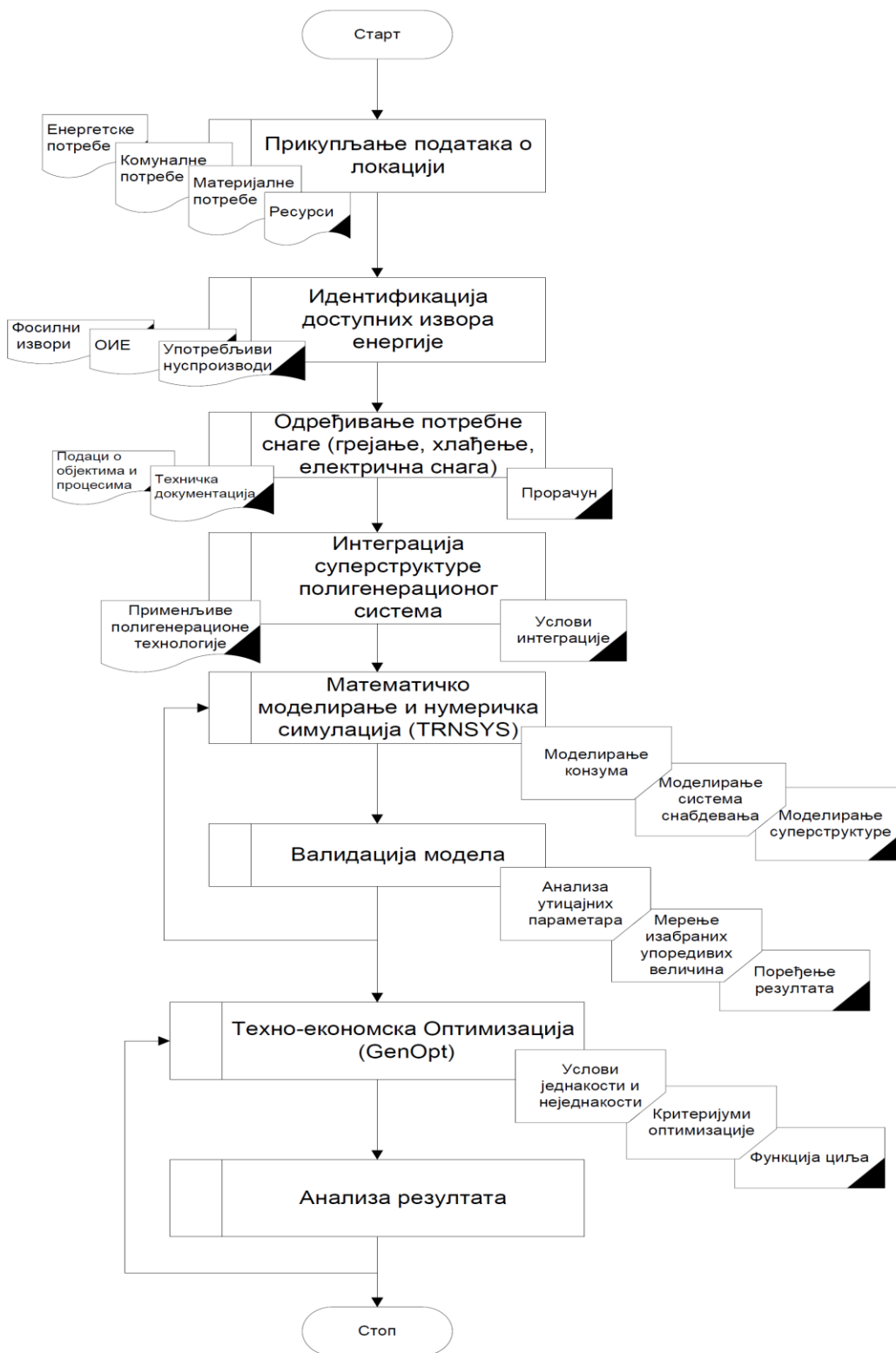
Ради проналажења оптималне конфигурације и снаге/капацитета полигенерационог система за подмиривање локалних комуналних потреба употребом обновљивих извора енергије као и фосилних горива, анализирана је употреба више оптимизационих метода. Понашање система у енергетском смислу се добија као резултат математичког моделирања и нумеричке симулације система помоћу одабраног софтверског алата, при чему се на основу имплементације одабраних метода врши и срачунавање економских и еколошких параметара понашања система.

Тестирање метода у овом раду се врши на примеру зграде затворених пливачких базена СРЦ „Дубочица“ у Лесковцу и примеру сточарске фарме (интегрисане фарме свиња). Иако је тестирање спроведено за постојеће реалне објекте, методологија оптимизације изложена у овом раду може се применити и за оптимизацију полигенерационих система и за потребе планирања нових постројења.

Методологија подразумева следеће активности:

- Прикупљање података о локацији, главним енергетским и другим (материјалним) потребама и о главним токовима материје и енергије у систему;
- Идентификација применљивих локално доступних ОИЕ;
- Идентификација применљивих / доступних конвенционалних извора енергије;
- Прикупљање података / прорачун потребне снаге за грејање и хлађење;
- Прикупљање података о потребној електричној снази за рад система;
- Идентификовање оптимизационих параметара полигенерационих технологија – дефинисање суперструктуре полигенерационог система;
- Математичко моделирање и нумеричка симулација динамичког понашања суперструктуре полигенерационог система у току типичне метеоролошке године;
- Формирање математичког модела економског критеријума оптимизације;
- Формирање математичког модела енергетског критеријума оптимизације;
- Формирање математичког модела еколошког критеријума оптимизације;
- Формирање функција циља на основу [8, 9, 10] и техно-економска оптимизација конфигурације и капацитета полигенерационог система;
- Анализа резултата.

Алгоритам са илустрацијом наведених активности методологије приказан је на слици 17.



Слика 17. Алгоритам методологије техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу ОИЕ

За потребе оптимизације, уведена су ограничења снаге тј. капацитета полигенерационог система, тако да капацитет грејања и хлађења не прелази капацитет опреме усвојене према пројектним условима, не узимајући у обзир капацитет модула који користе обновљиве изворе енергије. По претпоставци, полигенерациони систем има својство хибридности, тако да се вршна оптерећења у току рада и/или оптерећења које није могуће подмирити употребом модула који користе ОИЕ, подмирују употребом модула заснованих на конвенционалним технологијама (котао, компресорски чилер и сл.). Систем је по претпоставци повезан на електродистрибутивну мрежу, тако да може да користи електричну енергију када сопствена производња електричне енергије није довољна да подмири сопствене потребе.

Оптимизација се врши на основу функција циља дефинисаних према енергетским, економским и еколошким критеријумима. Након оптимизације, врши се поређење резултата добијених на основу наведених критеријума тј. функција циља. Поред тога, врши се поређење ефикасности примењених GenOpt оптимизационих алгоритама на основу вредности добијених резултата (вредности функције циља) и брзине конвергенције. Брзина конвергенције одређује се на основу броја итерационих корака до конвергенције решења.

Техно-економска оптимизација полигенерационог система чију конфигурацију одређују модули дефинисани у TRNSYS софтверу може да се врши на више начина. У даљем тексту овог поглавља објашњен је приступ формирању оптимизационог модела полигенерационог система чија је конфигурација предмет оптимизације. Овим приступом трага се за конфигурацијом оптималних трошкова, који су последица ефикасности и ефективности рада конфигурације полигенерационог система у задатим граничним условима уз почетне претпоставке:

- Номинални капацитет k -тог модула полигенерационог система је независно променљива и има константну вредност у сваком оптимизационом кораку.
- Јединична цена i -тог облика финалне енергије има константну вредност у базној години економског животног циклуса полигенерационог система.
- Процењена набавна вредност k -тог модула који чине полигенерациони систем је зависно променљива и функција је номиналног капацитета k -тог модула.

Укупна капитална инвестиција k -тог модула се може одредити као функција набавне вредности k -тог модула применом фактора дефинисаних у оквиру економске анализе.

Укупна капитална инвестиција полигенерационог система је сума капиталних инвестиција модула који улазе у састав разматране конфигурације система.

У овом раду, врши се оптимизација конфигурације и номиналног капацитета полигенерационог система за потребе одабраног реалног објекта на основу економских, енергетских и еколошких критеријума. Конфигурација је дефинисана на основу модула који чине полигенерациони систем, док је номинални капацитет дефинисан као збир номиналних капацитета за грејање, хлађење и производњу електричне енергије модула k који чине полигенерациони систем. Модел разматра и могућност локалне производње био-горива и пратећих нуспроизвода, за локације где постоје услови и ресурси за овакву врсту производње. Модел предвиђа локалну употребу произведеног био-горива од стране полигенерационог постројења, док се у недостатку ресурса или довољне количине локално произведеног био-горива користе локално доступна фосилна горива. У случају постојања ресурса за локалну производњу био-горива, користи од употребе евентуалних нуспроизвода попут компоста или органског ђубрива се додељује секундарни значај – нуспроизвод се сматра могућом последицом рада одређене конфигурације полигенерационог система који обухвата когенерацију са погоном на био-гориво [122, 123, 124]. Оствариве користи од употребе нуспроизвода вреднују се у зависности од специфичних локалних потреба и/или тржишне новчане вредности.

Конфигурација оптималног полигенерационог система је дефинисана компонентама чија је номинална снага већа од нуле, док је капацитет дефинисан збиром капацитета његових компоненти. Капацитет за грејање и хлађење полигенерационог система искључујући постојећу опрему и соларне системе еквивалентан је снази потребне опреме за пројектне услове, а у складу са реалним локалним потребама. Капацитети соларних топлотних и фотонапонских система су ограничени према реално расположивом простору за уградњу тих система.

Перформансе система су осетљивије на капацитет/снагу модула него на друге променљиве.

У датом активном соларном систему, релативна осетљивост годишњих перформанси на промену површине соларних колектора и релативна неосетљивост на промену ова два колектора је очигледна. Удео соларне енергије у систему је релативно неосетљив на капацитет акумулатора, када се достигне критични капацитет акумулатора.

4.1. Прикупљање података, идентификација ресурса и одређивање пројектних услова

Прикупљање података о локацији где се разматра изградња полигенерационог система претходи самој оптимизацији. Фаза прикупљања података треба да обухвати податке о положају локације, климатским условима, изложености објекта сунчевом зрачењу и утицају ветра. Поред тога, треба прикупити податке о расположивим ресурсима, попут доступности фосилних горива, биомасе, подземних (геотермалних) вода и сл. За постојеће објекте, прикупљају се подаци о функцији и намени објекта, тренутној и очекиваној употреби објекта, топлотном зонирању објекта, системима грејања, хлађења и климатизације и процесима који могу имати значајан утицај на топлотне добитке и губитке објекта. Подаци о инсталисаној снази система грејања, хлађења и климатизације објекта указују на потребну снагу за грејање и хлађење у пројектним условима, па се као такви могу користити за дефинисање домена оптимизације снаге полигенерационог система. Код новопроектованих објеката потребно је извршити прорачун топлотних губитака и добитака за пројектне услове како би се извршило дефинисање домена оптимизације снаге полигенерационог система.

На основу прикупљених података, дефинише се домен оптимизације капацитета полигенерационог система и врши се дефинисање полигенерационих модула који се разматрају у фази интеграције система.

У овој фази се у складу са могућностима прикупљају и подаци о годишњој потрошњи енергије, уколико су доступни и врше мерења одговарајућих параметара. Ове податке је могуће користити за валидацију симулационог модела конзума.

4.2. Интеграција полигенерационих система

Полигенерациони систем може бити заснован на садејству више данас доступних енергетских технологија, што подразумева конвенционалне технологије засноване на

сагоревању фосилних горива са једне стране и технологије за употребу ОИЕ, са друге стране. Полигенерациони системи могу имати својство хибридности, уколико се проблем периодичне доступности и/или мање расположивости делова система заснованих на ОИЕ решава интеграцијом модула заснованих на конвекционалним технологијама, у конфигурацију полигенерационог система. Како би се приступило решавању проблема оптимизације, потребно је најпре дефинисати предмет оптимизације, тј. извршити интеграцију технички и функционално могућих конфигурација полигенерационих система за задовољење локалних потреба применом локално доступних ресурса.

Конфигурација и капацитет полигенерационог система зависе од локалних ресурса са једне стране и локалних енергетских потреба са друге стране. Ова два фактора интеграције полигенерационих система захтевају решавање проблема интеграције система, тј. одређивања адекватне конфигурације и капацитета полигенерационог система за сваког потрошача и сваку локацију понаособ. Интеграција полигенерационог система која треба да дефинише конфигурацију система датог потрошача на датој локацији се може сматрати сложеним проблемом, јер се ради о системима високог нивоа интеграције, при чему је адекватну конфигурацију система могуће дефинисати помоћу модула-чиниоца система заснованих на више различитих доступних технологија за обављање једне или више функција система. Функција система, са друге стране, условљена је локалним потребама (енергетским и/или материјалним). Високи ниво интеграције полигенерационог система утиче на сложеност конфигурације самог система, али и на побољшање ефикасности система, попут термодинамичке, еколошке или економске [40].

Полигенерациони системи се најчешће дизајнирају да подмире основне енергетске потребе док се за подмиривање вршних оптерећења предвиђају резервни уређаји попут котлова, компресионих чилера и енергетских акумулатора [7]. Ипак, по мишљењу аутора при разматрању конфигурације полигенерационог система треба узети у обзир све доступне полигенерационе модуле који могу да врше трансформацију неког од локално доступних ресурса или локално произведених нуспроизвода, при чему се одлука о коначној конфигурацији система доноси на основу задатих термодинамичких, економских или еколошких критеријума.

Јасно је да посебну пажњу треба посветити моделирању (предвиђању) потрошње енергије [7], као и одређивању услова интеграције под којима је примена малих

полигенерационих система оправдана, тј. ефикаснија и исплатљивија у поређењу са конвенционалним системима.

У погледу конфигурације, може се сматрати да се полигенерациони систем састоји од низа комбинација блокова (или модула) који могу међусобно да ступе у интеракцију. Полигенерациони систем се може поделити на следеће блокове тј. модуле:

- когенерациони блок, који се састоји од когенерационих подсистема који могу бити засновани нпр. на мотору са унутрашњим сагоревањем или гасној турбини, стирлинг мотору, горивој ћелији и сл. и то најчешће са погоном на гас, код мањих система;
- блок за хлађење, који може да садржи електричне и абсорпционе или адсорпционе чилере (за погон користе природни гас или отпадну топлоту) у зависности од могућности за повезивање са когенерационим блоком;
- блок са уређајима за експлоатацију обновљивих извора енергије попут соларне, геотермалне, биомасе;
- блок за акумулацију енергије, која може бити топлотна (за грејање и/или хлађење) или акумулатор електричне енергије;
- блок за третман нуспроизвода попут производње биогорива или других специфичних материјалних производа;
- блок потрошње енергије који може а не мора да буде у вези са спољашњим енергетским мрежама (електрична мрежа, мрежа даљинског грејања и сл.).

4.2.1. Услови интеграције полигенерационих модула

Основна функција полигенерационих система је производња енергије и/или неког од материјалних производа у циљу подмиривања локалних потреба коришћењем доступних технолошких и енергетских ресурса. При интеграцији полигенерационих система, потребно је водити рачуна о техничко-технолошким условима интеграције, у смислу ограничења и захтева примене одређене технологије у садејству са осталим примењеним полигенерационим технологијама. С тим у вези, како се ради о сложеним хибридни постројењима, јавља се потреба за дефинисањем методе за планирање конфигурације, интеграцију и димензионисање полигенерационог система. Данашње методе развоја идејних решења се углавном заснивају на искуству пројектаната, што даје резултате у

смислу проналажења функционалних конфигурација, али не доприноси проналажењу оптималне конфигурације.

Циљ интеграције полигенерационих постројења је дефинисање техничко-технолошки могуће конфигурације спрегнутих полигенерационих модула за производњу енергије и/или других производа са сврхом подмиривања локалних потреба, коришћењем доступних технолошких и енергетских ресурса. Интеграција система се може сматрати адекватном, уколико интегрисани полигенерациони систем може да употребом доступних ресурса изврши њихову трансформацију и одговори локалним енергетским и/или материјалним потребама. Интеграција система најчешће није јединственог карактера, већ може да обезбеди више различитих адекватних конфигурација полигенерационог система, након чега се јавља проблем избора најбоље конфигурације за анализиране локалне услове: локалне ресурсе и локалне енергетске и/или материјалне потребе. Како је тренутно доступан велики број полигенерационих технологија, интеграцију система могуће је извршити на више начина и на више нивоа, те је избор оптималне конфигурације система значајно отежан [7].

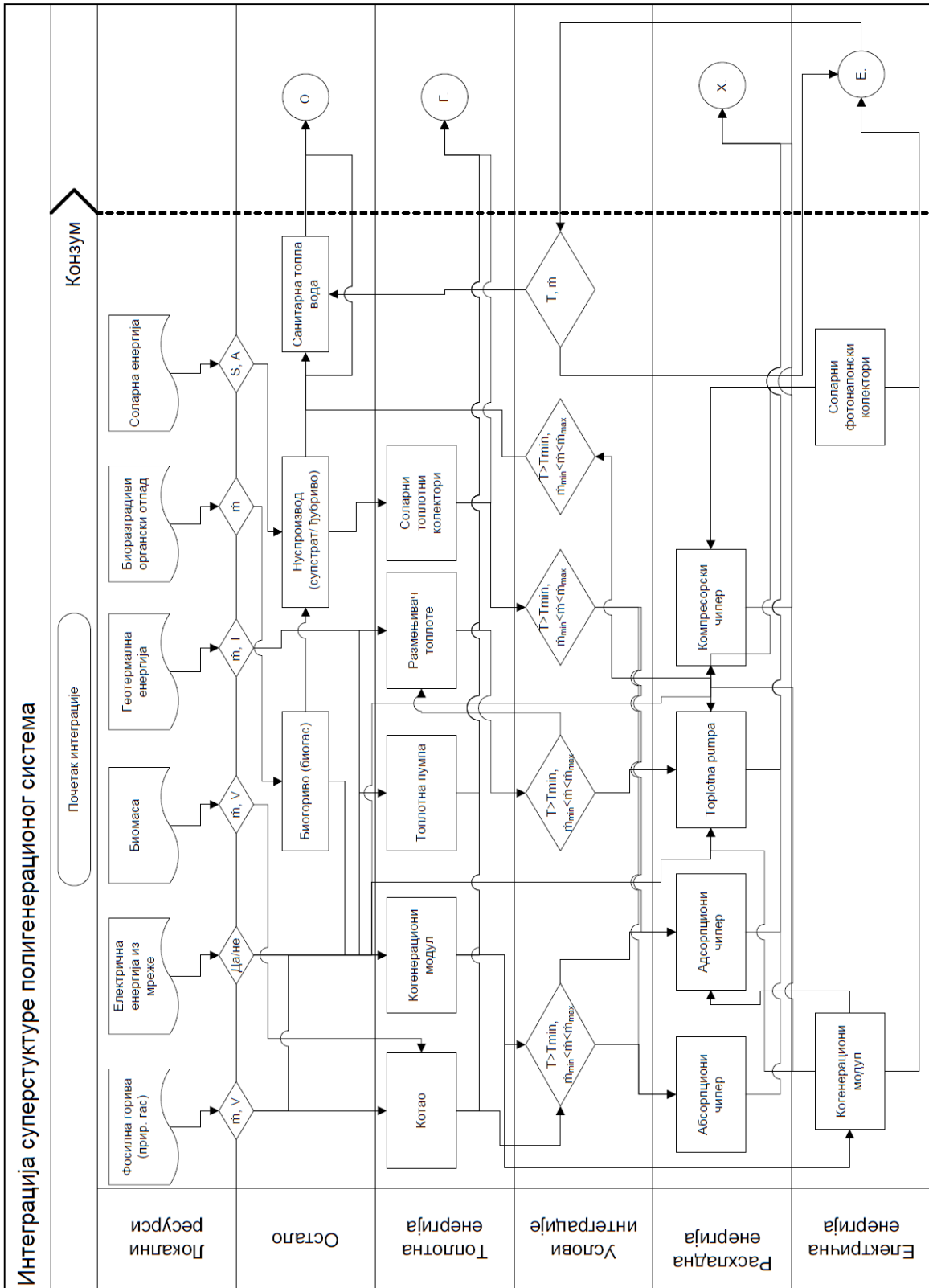
Додатни проблем интеграције полигенерационих система дефинишу техничко-технолошки услови ефективног рада зависних полигенерационих модула, где техничко-технолошки услови ефективног рада одређеног полигенерационог модула, захтевају одговарајући квалитет улазних ресурса и/или одговарајући квалитет излазног производа једног или више међуспрегнутих полигенерационих модула (на пример квалитет произведеног биогорива, одговарајући интензитет сунчевог зрачења, величине стања радног медијума у одређеним границама након трансформације у неком од полигенерационих модула и сл.). Управо ови услови интеграције полигенерационих система одређују могуће конфигурације и могућу међусобну интеракцију полигенерационих модула у оквиру система. Из тог разлога функционалну конфигурацију полигенерационог система није могуће дефинисати свим математичким комбинацијама полигенерационих модула. Поред тога, употреба неких полигенерационих модула за задовољење енергетских потреба носи проблеме поузданости и/или расположивости (попут неких од модула за експлоатацију ОИЕ) условљене променом доступности локалних ресурса, што може да изискује интеграцију допунских полигенерационих модула са истим

или сличним излазним „производом“ ради повећања поузданости и расположивости система, доприносећи притом својству хибридности.

Планирање и дефинисање оптималне конфигурације и снаге или капацитета сложених хибридних полигенерационих система, захтева предвиђање понашања различитих могућих конфигурација система, што је могуће извести методама моделирања, симулације и оптимизације [125]. Ипак, фази моделирања, симулације и оптимизације треба да претходи интеграција могућих конфигурација система, чиме се дефинише обим проблема тј. врши се избор полигенерационих модула који у међусобном садејству могу да задовоље једну или више локалних потреба, користећи локално доступне ресурсе.

Услови интеграције полигенерационих система у смислу избора полигенерационих модула који могу да чине функционалну конфигурацију полигенерационог система проистичу из карактеристика ових модула. Преглед главних карактеристика различитих конфигурација тригенерационих система и саставних модула представљен је у литератури [9].

На слици 18 приказана је шема алгоритма интеграције полигенерационих система са применом ОИЕ, где су илустровани и критеријуми интеграције. Као што је приказано на слици, алгоритам разматра учешће различитих доступних полигенерационих модула у зависности од испуњености услова интеграције попут доступности ресурса и техничких услова који дефинишу могућности интеракције полигенерационих модула са другим модулима или конзумом. Услови интеграције дефинисани су посебно за разматране полигенерационе модуле, а у складу са доступним ресурсима. Генерално, за модуле који врше трансформацију енергије горива (природни гас, биомаса) услови интеграције и даљег разматрања у оквиру решавања проблема оптимизације, дефинисани су доступношћу одговарајуће количине горива, тј. масеним протоком фосилног горива $\dot{m}_{f,min}$. Услов интеграције модула који користе геотермалну енергију дефинисани су температуром и протоком геотермалне воде или радног медијума који се користи за размену геотермалне топлоте. Услов интеграције модула за трансформацију биоразградивог органског материјала, је доступност одговарајуће масе овог материјала у току времена, како би могла да се врши континуирана анаеробна дигестија и производња биогорива, а могу се дефинисати и додатни услови који нису разматрани у оквиру овог рада, попут хемијског састава или квалитета доступних органских материја за производњу биогорива.



Слика 18. Алгоритам интеграције полигенерационих система заснованих на ОИЕ

Интеграција соларних система, дефинише се доступном незасенченом површином A_s на анализираној локацији за монтажу соларних система, са једне стране, и температуром и масеним протоком радног медијума са стране конзума. За решавање разматраног оптимизационог проблема, услови интеграције полигенерационих модула (B – топоводни котао, CHP – когенерациони модул, STC – соларни топлотни пријемници, $GSHP$ – топлотна пумпа земља вода, VCC – компресорски чилер, PV – фотонапонски соларни пријемници, $ADSC$ – адсорпциони чилер, $ABSC$ – абсорпциони чилер, BF – производња биогорива) дефинисани су фактором интеграције k -тог модула K_k , чија вредност може бити 0 или 1 у зависности од испуњености услова. Метода интеграције полигенерационих система за потребе оптимизације конфигурације система, у складу са алгоритмом са слике 18, дефинише одређивање вредности фактора интеграције K_k следећим релацијама:

- За модуле k , $k \in [B, CHP]$ који врше трансформацију енергије горива сагоревањем одређује се према доступности одговарајућег масеног протока одговарајућих доступних горива, укључујући и локално произведена биогорива или биомасу:

$$K_k = \begin{cases} 0, & \text{за } \dot{m}_g < \dot{m}_{gmin} \\ 1, & \text{за } \dot{m}_g \geq \dot{m}_{gmin} \end{cases} \quad (9)$$

- За модуле k , $k \in [HP, ADSC, ABSC]$ који врше трансформацију топлотне енергије (нпр. топлотне пумпе), фактор интеграције се одређује на основу температуре T и протока радног медијума \dot{m}_k , као:

$$K_k = \begin{cases} 1, & \text{за } \dot{m}_k \geq \dot{m}_{kmin}; T_{min} \leq T \\ 0, & \text{за } \dot{m}_k < \dot{m}_{kmin}; T_{min} > T \end{cases} \quad (10)$$

- За модуле k , $k \in [STC, PV]$ који врше трансформацију соларне енергије, фактор интеграције се одређује на основу доступне незасенчене површине за постављање соларних система A_s и уградне површине једног соларног панела A_{min} :

$$K_k = \begin{cases} 1, & \text{за } A_s \geq A_{min} \\ 0, & \text{за } A_s < A_{min} \end{cases} \quad (11)$$

- За модуле за k , $k \in [BF]$ производњу биогорива, интеграциони фактор се одређује на основу количине органске материје адекватног квалитета за континуирану производњу биогорива (нпр. за континуирану анаеробну дигестију):

$$K_k = \begin{cases} 0, & \text{за } \dot{m}_{BF} < \dot{m}_{gmin} \\ 1, & \text{за } \dot{m}_{BF} \geq \dot{m}_{gmin} \end{cases} \quad (12)$$

Фактор интеграције полигенерационог модула, одређен је условима интеграције са стране ресурса, укључујући и ресурсе настале радом полигенерационог система. За учешће полигенерационог модула у даљем разматрању, потребно је сагледати и фактор конзума $K_{k,p}$, који такође може да узима вредности 0 или 1. Фактор конзума $K_{k,p}$ k -тог полигенерационог модула, одређује се на следећи начин:

- За модуле k , $k \in [CHP, PV]$, са могућношћу производње електричне енергије, фактор конзума се одређује на основу потребе за електричном енергијом са стране конзума $P_{r,e}$, при чему потреба може подразумевати и предају електричне енергије мрежи:

$$K_{k,e} = \begin{cases} 1, & \text{за } P_{r,e} > 0 \\ 0, & \text{за } P_{r,e} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

- За модуле k , $k \in [B, CHP, STC, HP]$, са могућношћу производње топлотне енергије, фактор конзума се одређује на основу потребе за топлотном енергијом са стране конзума $P_{r,h}$, максималне очекиване температуре топлотног понора $T_{pr,h}$:

$$K_{k,h} = \begin{cases} 1, & \text{за } P_{r,h} > 0; T_{k,pr} > T_{pr,h} \\ 0, & \text{за } P_{r,h} = 0 \\ 0, & \text{за } T_{k,pr} \leq T_{pr,h} \end{cases} \quad (14)$$

- За модуле k , $k \in [ABS, ADS, VCC, HP]$ са могућношћу хлађења, фактор конзума се одређује на основу потребе за хлађењем са стране конзума $P_{r,c}$, и минималне очекиване температуре топлотног понора $T_{pr,c}$:

$$K_{k,c} = \begin{cases} 1, & \text{за } P_{r,c} > 0; T_{k,pr} < T_{pr,c} \\ 0, & \text{за } P_{r,c} = 0 \\ 0, & \text{за } T_{k,pr} \leq T_{pr,c} \end{cases} \quad (15)$$

- За модуле k , $k \in [BF, Pr]$, са могућношћу производње биогорива (BF) или других производа (Pr), фактор конзума $K_{k,pr}$ се одређује на основу потреба производње биогорива или других производа, укључујући и могућност пласирања ових производа на тржишту:

$$K_{k,pr} = \begin{cases} 1, & \text{за } P_{r,pr} > 0 \\ 0, & \text{за } P_{r,pr} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

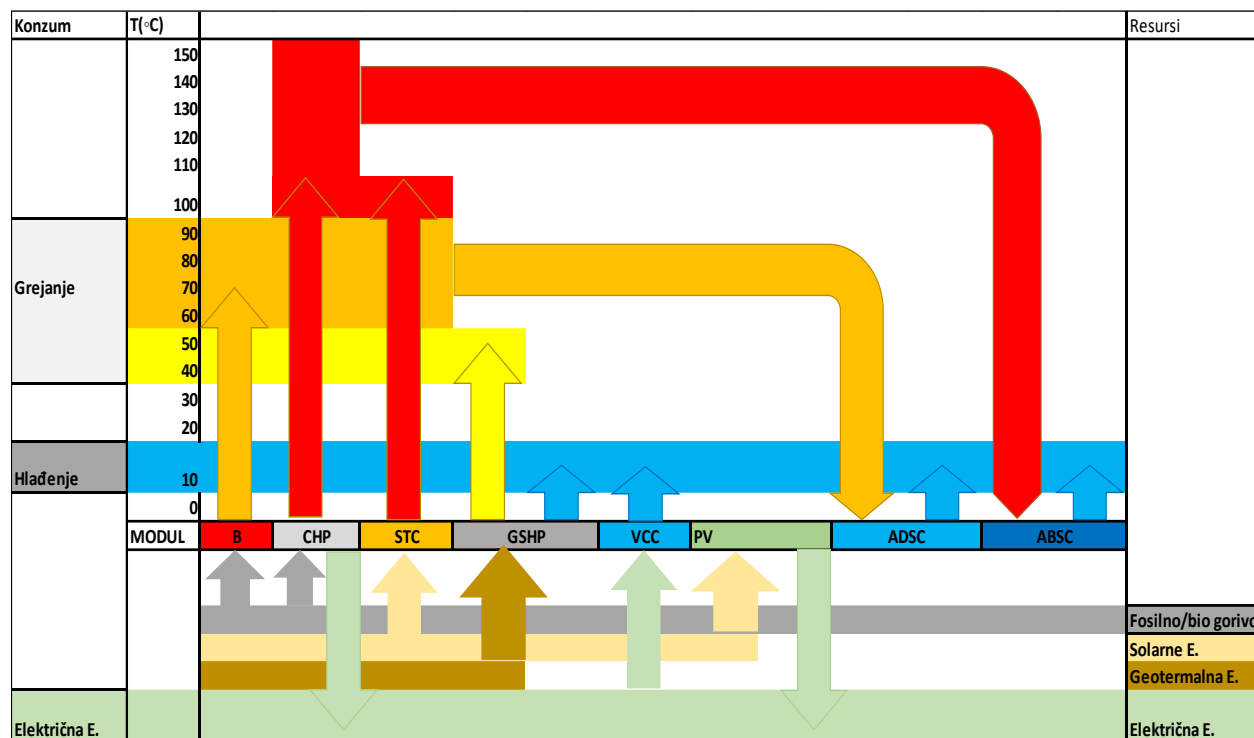
У наведеним условима интеграције треба нагласити да се масени протоци и температуре који се користе за одређивање фактора интеграције модула одређују на основу номиналних вредности произвођача опреме, који за потребе оптимизације могу бити сведени на специфичне вредности одговарајуће серије производа по јединици номиналне снаге или капацитета. Услови који одређују фактор локалних потреба са критеријумима дефинисаним температуром, одређују се на основу излазне карактеристике анализираних полигенерационог модула $T_{k,pr}$ који се одређује на основу номиналних вредности произвођача опреме за дату серију производа са једне стране и очекиване екстремне вредности температуре топлотног понора са стране конзума са друге стране, укључујући и могуће топлотне поноре који настају у току рада анализираних конфигурације полигенерационог система.

Учешће полигенерационог модула k у структури полигенерационог система, након одређивања фактора интеграције и фактора конзума, дефинише фактор конфигурације полигенерационог модула, $K_{c,k}$, који се у општем случају може срачунати као производ фактора интеграције и фактора локалних потреба:

$$K_{c,k} = K_k K_{k,e} K_{k,h} K_{k,c} K_{k,pr} \quad (17)$$

На слици 19, приказана је принципијална шема интеграције одабраних полигенерационих модула, који могу бити део полигенерационог система за грејање, хлађење и производњу електричне енергије са илустрованим температурним условима интеграције. Треба нагласити, да се потребне величине стања радног медијума на улазу и излазу из појединих представљених полигенерационих модула могу незнатно разликовати између модула различитих произвођача опреме, као и да зависе од радних услова и режима рада код реалних система. На слици су илустровани температурни нивои у систему, као последица рада појединих модула и услова интеграције сорпционих модула. Шема обухвата систем намењен конзуму који дефинишу грејање и хлађење простора и потрошња електричне енергије. Приказану шему интеграције је могуће проширити и прилагодити условима другачијег конзума (припрема процесне паре, хлађење и замрзавање и сл.) што

може да захтева разматрање додатних полигенерационих модула, али то неће бити разматрано у оквиру овог рада.



Слика 19. Интеграција полигенерационих модула: (B – топоводни котло, CHP – когенерациони модул, STC – соларни топлотни пријемници, GSHP – топлотна пумпа земља вода, VCC – компресорски чилер, PV – фотонапонски соларни пријемници, ADSC – адсорпциони чилер, ABSC – абсорпциони чилер).

Анализом шеме интеграције са слике 19 могуће је идентификовати више технички могућих конфигурација полигенерационих система, које би уз правилно димензионисање модула могле да задовоље задате потребе конзума. Са друге стране, на основу шеме интеграције није могуће одредити најбољу конфигурацију полигенерационог система.

Из шеме интеграције полигенерационих модула, види се да је за погон абсорпционог чилерског модула неопходна топлотна енергија на знатно вишем температурном нивоу у односу на потребе адсорпционог чилера. Из тог разлога, у случају топоводног енергетског конзума температуре које се типично користе за загревање простора (испод 100 °C), погоднија је примена адсорпционих чилера. Употреба абсорпционих чилера се може сматрати практичнијом код енергетских конзума на вишим температурним нивоима (вреловодни системи, процесна пара и сл.). Са друге стране, конзум одређен превасходно

потребама загревања простора може се подмитити и применом нискотемпературних система, а у том случају произведена топлотна енергија није на довољном енергетском нивоу за погон сорпционих уређаја, те се прибегава догревању радног медијума употребом других модула или употребом полигенерационих модула за хлађење чији рад није условљен на овај начин. Повећавањем броја интегрисаних модула конфигурације полигенерационог система, повећава се сложеност постројења и почетна капитална улагања.

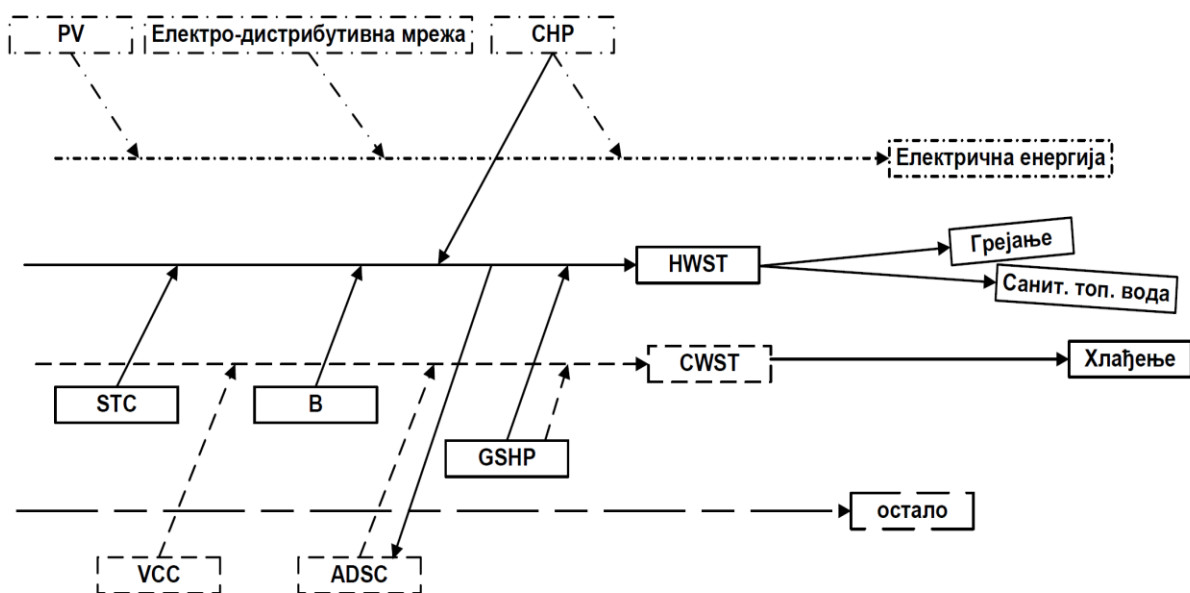
Шема интеграције полигенерационих модула (слика 19) је сведена на тригенерациони проблем због универзалности примене. У зависности од локалних специфичности, попут материјалних потреба и доступности локалних ресурса, потребно је извршити усклађивање представљене шеме.

4.3. Примењена метода математичког моделирања и нумеричке симулације полигенерационих система заснованих на ОИЕ

Резултат интеграције полигенерационог система може бити једно или више функционално могућих решења. Осим у случају јединственог решења, интеграција не даје квантитативне ни квалитативне информације о понашању система, које су неопходне за избор оптималне конфигурације система, као ни информације о оптималној снази и капацитету модула потребних за задовољавање потреба дефинисаних конзумом. Скуп свих резултата интеграције полигенерационог система, који чине више функционално могућих конфигурација полигенерационог система представља суперструктуру полигенерационог система (слика 20). Суперструктура полигенерационог система садржи информације о модулима који би потенцијално могли да буду део полигенерационог система и о могућој интеракцији између полигенерационих модула ради испуњења основне функције полигенерационог система. Састав оптималне конфигурације полигенерационог система зависи од резултата анализе понашања свих могућих конфигурација дефинисаних суперструктуром система и њиховим међусобним поређењем према утврђеним критеријумима.

Испитивање мерењем понашања могућих конфигурација полигенерационог система који могу да задовоље дате локалне потребе захтевало би присуство великог броја полигенерационих модула [126], при чему, чак и у случају доступности већег броја модула за испитивање, постоји проблем доступности полигенерационих модула у анализираном

распону снага и капацитета у реалним условима рада. Из тог разлога се у фази планирања сложених енергетских система, попут полигенерационих система, прибегава математичком моделирању и нумеричким симулацијама система са циљем предикције понашања анализираних конфигурација система и избора најбољег решења. У овој фази, од посебне важности је формирање физичког и математичког модела потрошача енергије анализираних објекта – модела конзума, и физичког и математичког модела хибридног полигенерационог система са друге стране, као и њихове међусобне интеракције. Поред модела енергетског конзума, у зависности од локалних ресурса и услова, може бити потребно извршити и моделирање третмана и/или производње материјалних нуспроизвода полигенерационог процеса, уколико постоје, и/или одређених утицајних фактора. Под математичким моделом се подразумева прецизна математичка репрезентација понашања система, динамичког или стационарног, која симулацијом и анализом треба да обезбеди одговоре на жељена питања.



Слика 20. Физички модел суперструктуре полигенерационог система [127]

За моделирање и процену годишњих енергетских потреба разматраног објекта, као и моделирање и процену годишњег понашања полигенерационог система у спрези са моделом конзума, методологија представљена у овом раду предвиђа употребу TRNSYS софтвера [103]. Наведени софтвер је изабран на основу поређења софтвера за моделирање, симулацију и/или оптимизацију енергетских система [59] и резултата из литературе добијених применом овог софтвера [128-141]. Поређење резултата симулације зграда и

енергетских система зграда са експерименталним резултатима [128], показало је добро поклапање резултата добијених изабраним софтвером, са експерименталним подацима.

Изабрани софтвер има богату библиотеку верификованих модела уређаја, пратеће опреме и уређаја који могу да утичу на предикцију понашања полигенерационих система.

Оптимизациони проблеми решавају се помоћу GenOpt [142] оптимизационог алата, што условљава прилагођавање примењених модела и техника моделирања овим алатима.

Соларна енергија, нискотемпературна геотермална енергија (енергија подземне воде), употреба природног гаса, као и употреба отпадне топлоте и технологија за добијање енергије из локално доступних материја се разматрају као доступни ресурси у овом раду. У приказаној анализи следећи модули чине суперструктуру полигенерационог постројења (слика 20) чиме се дефинишу границе оптимизационог проблема:

- Когенерациони модул заснован на мотору са унутрашњим сагоревањем са генератором, са погоном на природни или биогаз (CHP);
- Топловодни котло са погном на природни или биогаз (B);
- Топлотна пумпа вода-вода (GSHP);
- Топловодни адсорпциони чилер (ADSC);
- Компресорски расхладни чилер (VCC);
- Поље равних соларних колектора (STC);
- Поље фотонапонских колектора (PV);
- Акумулатор (резервоар) топле воде (HWST);
- Акумулатор (резервоар) хладне воде (CWST).

Модел суперструктуре полигенерационог система је формиран модуларно помоћу софтвера TRNSYS, тако да је могуће вршити симулацију понашања различитих технички могућих конфигурација система (слика 18) у току типичне метеоролошке године, са варијацијом учешћа свих модула који чине суперструктуру и варијацијом снаге/капацитета активних модула суперструктуре полгенерационог система (слика 20).

Поред формирања физичког и математичког модела самог полигенерационог система, његових модула и њихове међусобне интеракције, за предвиђање понашања полигенерационог система и решавања проблема симулације и оптимизације, од посебне је

важности физичко и математичко моделирање и нумеричка симулација конзума (енергетског и материјалног) и његове интеракције са полигенерационим системом.

Методологија анализирана у овом раду бави се проблемима подмиривања локалних потреба конзума које проистичу из намене и активности анализираниог објекта (јавног и пољопривредног објекта). Типичне потребе оваквог енергетског конзума се огледају у потрошњи топлотне, расхладне и електричне енергије, док се додатне потребе могу јавити у посебним случајевима. Поред употребе електричне енергије за производне или друге специфичне активности у самом објекту, електричну енергију користе и уређаји и опрема који су део система снабдевања енергијом, а може се користити и у полигенерационом систему за рад одговарајућих модула (нпр. за потребе хлађења, догревања, рад пумпи, вентилатора и сл.). Посебан значај даје се моделирању и симулацији топлотног (и расхладног) конзума, при чему се произведена електрична енергија применом одговарајућих полигенерационих модула као последица рада полигенерационог система сматра додатним производом и предаје се мрежи по важећој субвенционисаној цени. Оваква радна стратегија постројења може се сматрати прихватљивом према европској директиви о когенерацији [143] и о енергетској ефикасности [144].

Анализа примене методологије врши се на примеру јавног објекта „Затворени пливачки базени СРЦ Дубочица, Лесковац“ и пољопривредног објекта Фарма свиња „Халово“, део Делта аграр групе, Зајечар. Математичко моделирање и нумеричке симулације применом софтвера TRNSYS обухватају моделирање енергетског конзума, укључујући и систем транспорта енергије од полигенерационог система до модела конзума, и моделирање суперструктуре полигенерационог система. По претпоставци, разматрани објекти и полигенерациони систем су повезани на националну електродистрибутивну мрежу. Из тог разлога, приоритет се даје грејању и хлађењу са стране конзума, док се производња електричне енергије и нуспроизвода, где је то могуће, врши са секундарним приоритетом, а чији се недостатак одражава на повећане трошкове рада система због трошкова преузете електричне енергије и/или других сировина по тржишним ценама.

Физичке карактеристике анализираних објеката, услови амбијента и услови који проистичу из намене објеката, користе се да дефинишу топлотно тј. расхладно оптерећење које преко система за снабдевање топлотном и расхладном енергијом подмирује полигенерационо постројење. Произведена количина електричне енергије, по

претпоставци, предаје се мрежи, а не мора бити у сваком тренутку довољна да подмири локалне потребе. Евентуална производња других материјалних производа, може бити већа или мања од тренутних локалних потреба, а по претпоставци се складишти и продаје или купује по тржишној цени. Ради постизања веће профитабилности примене разматраног полигенерационог система, локално произведена електрична енергија се по претпоставци комплетно предаје мрежи по субвенционисаној цени.

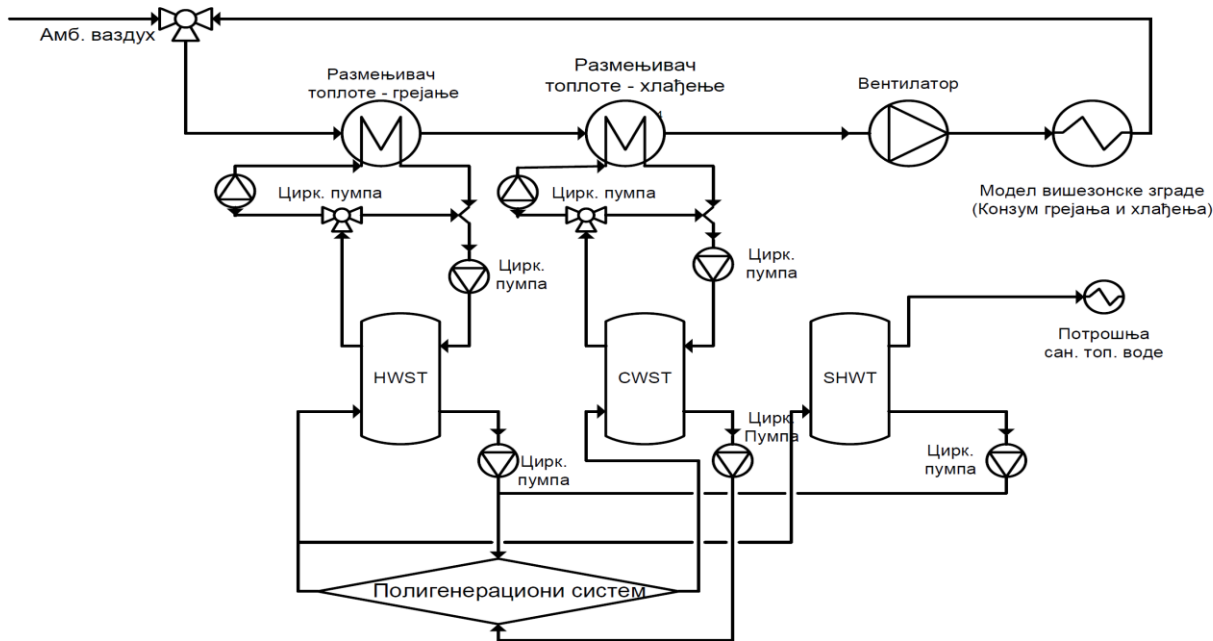
Математичко моделирање енергетског конзума изабраних објеката врши се помоћу Туре56 модела вишезонског објекта применом софтвера TRNSYS [103], при чему се узимају у обзир геометрија објекта, термофизичка својства објекта, климатски услови амбијента објекта укључујући и утицај сунчевог зрачења, засенчења, унутрашње добитке топлоте и међусобну размену топлоте између термичких зона модела али и акумулацију енергије у маси омотача објекта. Примењени математички модели и нумеричке методе доступне су у документацији софтвера [103]. Промена услова амбијента у току године, попут температуре, релативне влажности ваздуха, соларне радијације, температуре воде из водоводне мреже и сл. узима се за типичну метеоролошку годину на основу Метеонорм података за анализирану локацију [121], док се унутрашњи извори и/или понори енергије који дефинишу добитке унутар одговарајуће термичке зоне објекта посебно моделирају у зависности од функције и намене објекта и термичке зоне.

Интеракција између модела полигенерационог система и вишезонског модела објекта врши се помоћу система снабдевања енергијом у оквиру анализираног објекта, за који је такође потребно направити посебан физички и математички модел. Модел система снабдевања енергијом такође се формира модуларно, применом математичких модела из TRNSYS библиотеке, тако да може да са довољно детаља представи транспорт енергије из полигенерационог система до модела конзума. Модел система снабдевања енергијом чине модели цевовода, ваздушних канала, пумпи, вентилатора и размењивача топлоте.

У овом раду се анализира проблем одређивања оптималне конфигурације као и капацитета полигенерационог система. Приступ анализи овог проблема подразумева употребу софтверског алата за математичко моделирање и нумеричку симулацију понашања одређених конфигурација система у току типичне метеоролошке године. За ове потребе, као што је већ наведено, одабрана је употреба софтверског алата TRNSYS, док се сами оптимизациони проблеми решавају помоћу Genopt оптимизационог софтверског

алата. Математичко моделирање и нумеричке симулације система потрошње топлотне и расхладне енергије врше се применом математичких модела компонената из библиотеке софтвера, док се нумеричке симулације врше итеративним решавањем овако формираног математичког модела помоћу солвера TRNSYS [103].

Моделирани полигенерациони систем има задатак да обезбеди задате температурне услове у анализираном реалном објекту, тј. да задовољи топлотна оптерећења у режиму грејања и хлађења, при чему се врши и производња електричне енергије и/или других производа система. Топлотно оптерећење анализираног реалног објекта зависи од промене климатских услова у току године, геометрије и грађевинске конструкције објекта, као и од примењених система за снабдевање топлотном и расхладном енергијом доступном из полигенерационог система у оквиру објекта. На основу поређења експерименталних резултата топлотног оптерећења зграда и резултата симулације применом TRNSYS софтвера, утврђене су препоруке за моделирање утицајних термо-физичких процеса (транспорт топлоте кондукцијом, зрачењем и конвекцијом) које доприносе добром слагању између експерименталног и симулираног понашања објекта у току времена [128]. Промена климатских параметара на часовном нивоу у току типичне метеоролошке године дефинисана је Meteororm [121] климатским подацима за изабрану локацију.



Слика 21. Физички модел снабдевања конзума енергијом добијеном из полигенерационог система

Утицај геометрије и грађевинске конструкције на промену топлотног оптерећења решава се моделирањем реалног објекта помоћу TRNBuild дела софтвера, док се веза са моделом за снабдевање енергијом из полигенерационог система решава применом TYPE 56 модела вишезонског објекта из библиотеке компонената TRNSYS софтвера [103]. Реални објекти се моделирају по претпоставци као објекти са масом, те се кроз симулацију узима у обзир утицај топлотног капацитета грађевинске масе моделираног објекта.

Моделирање система снабдевања топлотном и расхладном енергијом урађено је на основу упрошћеног физичког модела приказаног на слици 21. По претпоставци, радни медијум система за снабдевање енергијом је вода.

Модел је прилагођен анализираним реалним објектима и представља упрошћени полигенерациони систем. Топлотна и расхладна енергија се из хибридног полигенерационог система преноси помоћу радног медијума до акумулатора топлотне енергије (HWST) и акумулатора расхладне енергије (CWST), одакле се даље преко размењивача топлоте врши загревање тј. хлађење ваздуха по потреби. Температура долазног радног медијума, а тиме и ваздуха регулише се трокраким вентилима. Модел подразумева и могућност довода одговарајуће количине свежег ваздуха. Поред тога, топлотна енергија доступна из полигенерационог система може да се користи и за загревање резервоара потрошне топле воде (SHWT), чија је потрошња моделирана на основу прикупљених података о дневној и годишњој динамици потрошње на реалном објекту применом „bottom-up“ методе [57, 58].

Моделирање потрошње електричне енергије за мање потрошаче приказано је у [58]. Сличан приступ применом „bottom-up“ методе, могуће је применити и за симулирање укупне потрошње електричне енергије у анализираним објектима. Ипак, како се по претпоставци, електрична енергија произведена од стране моделираног полигенерационог система предаје мрежи по субвенционисаној цени [8, 10], моделирање промене профила потрошње енергије за анализиране објекте није вршено. Према претпоставци, објекти су повезани на националну електродистрибутивну мрежу одакле имају на располагању електричну енергију по тржишним ценама.

Димензионисање система снабдевања енергијом доступном из моделираног полигенерационог система врши се за пројектне услове, а у случају постојећих реалних

објекта какви се анализирају у овом раду може се одредити из доступне техничке документације термотехничких инсталација објекта (главни машински пројекат).

Укупна номинална снага/капацитет за грејање $P_{h,POLY}$, хлађење $P_{c,POLY}$ и производњу електричне енергије $P_{e,POLY}$ једнак је суми номиналних капацитета модула к суперструктуре са активним учешћем у разматраној конфигурацији:

$$P_{h,POLY} = \sum_{i=1}^n (\sum_K q_{hK,i}) \quad (18)$$

$$P_{c,POLY} = \sum_{i=1}^n (\sum_K q_{cK,i}) \quad (19)$$

$$P_{e,POLY} = \sum_{i=1}^n (\sum_K w_{eK,i}) \quad (20)$$

Годишња нето испоручена електрична енергија $W_{net,POLY}$ полигенерационог система се може срчунати као разлика симулиране локалне производње електричне енергије w_{eK} применом модула eK и симулиране потрошње електричне енергије w_{uK} модула uK који користе електричну енергију за свој рад од укупне годишње производње (тј. за период од n временских корака):

$$W_{net,POLY} = \sum_{i=1}^n (\sum_{(eK)} w_{eK,i}) - \sum_{i=1}^n (\sum_{(uK)} w_{uK,i}) \quad (21)$$

Перформансе полигенерационог система се пореде са перформансама постојећег енергетског система за постојеће објекте, тј. са перформансама конвенционалног система за нове објекте.

Потрошња топлотне енергије конвенционалног система у току типичне метеоролошке године $Q_{h,a}$, одређује се према симулираној потрошњи топлотне енергије топоводног котла q_{hBa} и додатних електричних загрејача, уколико постоје q_{hAUXa} (попут електричних загрејача за загревање потрошне топле воде)

$$Q_{h,a} = \sum_{i=1}^n (q_{hBa,i} + q_{hAUXa,i}) \quad (22)$$

Потрошња енергије за хлађење конвенционалног система у току типичне метеоролошке године $Q_{c,a}$, одређује се према симулираној потрошњи енергије чилера q_{cVCCA} :

$$Q_{c,a} = \sum_{i=1}^n (q_{cVCCA,i}) \quad (22)$$

Смањење потрошње примарне енергије за грејање $Q_{h,a}$ и хлађење $Q_{c,a}$ које се може остварити применом полигенерационог система у поређењу са конвенционалним постојећим системом на фарми, се може срчунати према:

$$Q_{h,r} = Q_{c,POLY} - Q_{h,a} \quad (23)$$

$$Q_{c,r} = Q_{c,POLY} - Q_{c,a} \quad (24)$$

Овде треба имати у виду, да конвенционални модули могу ући у састав суперструктуре за разматрање конфигурације полигенерационог система за потребе постојећих објеката, или уколико постоје оправдани разлози, попут повећања расположивости система или покривања вршних оптерећења, за потребе нових објеката.

4.3.1. Математичко моделирање и нумеричке симулације применом софтвера TRNSYS

TRNSYS поседује симулационо окружење за моделирање и симулацију система у нестационарним условима, заједно са мулти зонским зградама. Овде треба нагласити да се врше заправо квазистатичке симулације, са могућношћу смањивања временског корака до нивоа који захтева анализа одговарајуће симулиране појаве. Предвиђен је за коришћење од стране инжењера и истраживача широм света како би извршили валидацију нових енергетских концепата или побољшање постојећих решења [103].

Један од кључних успеха овог софтвера у последњих 40 година његовог развоја је његова отворена и модуларна структура. Изворни код као и модели компонената су доступни кориснику за евентуалну допуну или модификацију. Ово поједностављује проширење постојећих модела, а такође даје могућност модификовања модела у складу са специфичним потребама корисника.

Архитектура софтвера је заснована на DLL базама и дозвољава корисницима и трећим лицима да лако додају произвољне моделе компонената, користећи уобичајене програмске језике (C, C++, PASCAL, FORTRAN i dr.), или помоћу w-editor интерфејса који је део софтвера од верзије 17 [103]. Коришћење w-editor подразумева упознавање корисника са специфичном програмском синтаксом. TRNSYS се може лако повезати са многим другим апликацијама, за пре или пост процесирање или за интерактивно позивање у току симулације (нпр. Microsoft Excel, Matlab, COMIS, GenOpt и сл.).

Програм се састоји из три дела: Simulation Studio за моделирање система, TRNBuild – интерфејс за дефинисање параметара зграда, Editor који се користи за стварање самосталних програма тзв. TRNSED апликација који се могу редистрибуирати [103].

Simulation Studio такође садржи *output manager* који даје могућност контроле променљивих чија ће се интеграција вршити, штампати или користити у даљим анализама и *log/error manager* који дозвољава детаљно проучавање тока симулације [103].

Софтвер даје могућност формирања „костура“ нове компоненте у Fortran Wizard-у, прегледа и едитоватовања компоненте (*proforma, input, output, parameter*), прегледа излазних фајлове и сл.

Солвер је програмиран у Fortranу, а код се добија уз програм. Компајлирање се врши са Windows Dynamic Link Library (DLL), TRNDII. TRNSYS –а за покретање симулације користи улазне *.dck фајлове који садрже све информације о употребљеним компонентама и њиховим везама. Улазни фајлови дефинишу се применом Simulation Studio дела програма.

TRNBuild је алат који се користи за убацивање параметара вишезонских зграда. Дозвољава прецизирање свих детаља структуре зграде, као и свега што треба да симулира топлотно понашање зграде, као што су оптичка својства прозора, распоред грејања и хлађења. Као излаз се добија *.bui fajl који садржи податке који описују физички и математички модел зграде. Софтверски пакет садржи специјализовани едитор који се може користити за стварање и модификовање улазних фајлова. TRNEdit се може користити за стварање и редистрибуцију апликација TRNSed, које се могу слободно редистрибуирати крајњим корисницима који немају TRNSYS лиценцу као прости алат за симулацију. TRNSYS стандардна база података садржи око сто модела компонената [103].

Иза тренутне верзије и могућности овог софтвера стоји преко двадесет година развоја. Поред ужег развојног тима, развоју модела појединих компонената допринели су и самостални аутори са универзитета широм света. Неке од ових компонената су доступне за преузимање на сајту универзитета где је развијан софтвер. Ове компоненте, заједно са основном библиотеком и комерцијално доступним компонентама и отвореном структуром софтвера, пружају велике могућности за симулацију.

4.3.2. Солвер

Симулација се дефинише помоћу контролних функција. Оне се користе да се дефинишу параметри TRNSYS симулације као што су трајање, толеранције грешке симулације и сл.

TRNSYS поседује два солвера за решавање алгебарских и диференцијалних једначина које чине модел датог система: солвер 0 и солвер 1 (Powell-ov metod) [103]. SOLVER команда служи за одабир врсте прорачуна тј. солвера [103]. На овај начин се врши избор

једног од два доступна алгоритма за нумеричко решавање система алгебарских и диференцијалних једначина. Како се солвер 1 користи за решавање инверзних проблема, уз ограничени број модела из библиотеке софтвера, за симулацију полигенерационог система користи се SOLVER 0: сукцесивна апроксимација .

Сукцесивном апроксимацијом и субституцијом, вредности излазних параметара једног модела мењају се улазним вредностима параметара наредног модела у систему. Замена се наставља за дати временски корак, све док не престане промена свих повезаних излазних параметара, тј. док разлика њихове вредности не буде мања од задате толеранције. Тада солвер региструје конвергенцију и прелази на симулацију следећег временског корака.

Солвер врши „позивање“ математичког модела компоненте макар једном у току сваког временског корака. Након овога, солвер врши селекцију које компоненте је потребно „позвати“ поново у току симулације истог временског корака: само математички модели компоненте чији је макар један улазни параметар вредности ван задате толеранције се позивају. Када се постигне конвергенција свих компонената, или у случају достизања максималног задатог броја итерација солвер наставља са симулацијом следећег временског корака.

Иако је ова нумеричка метода врло једноставна, она се користи у већини симулација и показала се као веома поуздана за симулирање система са акумулацијом енергије, соларних система, система за припрему санитарне топле воде, симулацију зграда, система грејања и климатизације. Ограничење овог солвера се јавља код решавања нелинеарних алгебарских једначина са диференцијалним једначинама. Овакве једначине јављају се код система где је акумулација енергије занемариво мала, што је случај нпр. код фотонапонских система, директно повезаних на конзум или расхладни систем који ради у стационарном режиму. Овај солвер не решава ефикасно нелинеарне алгебарске једначине, и постоји могућност да је немогуће добити решење уколико је нелинеарност јако заступљена. Овај проблем се решава коришћењем опције за убрзавање конвергенције као и опцијом нумеричке релаксације.

4.3.2.1. Нумеричка релаксација

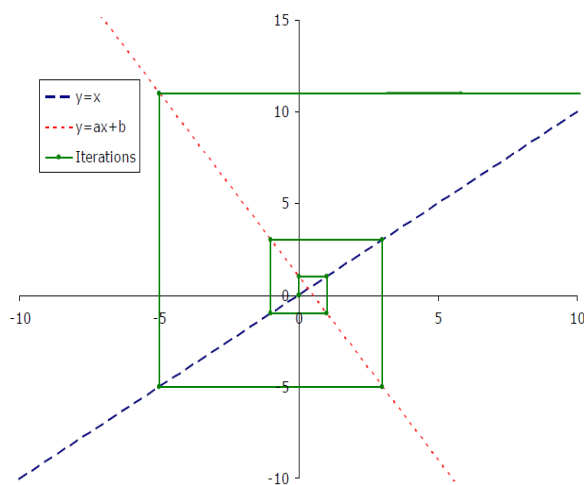
Нумеричка релаксација доказано доприноси побољшању конвергенције код Солвера 0 за одређене класе проблема. Један од типичних проблема који се не може лако решити

сукцесивном субституцијом, представља упаривање струјања ваздуха и температура у моделу зграде. Нумеричка релаксација је представљена на простом примеру [103].

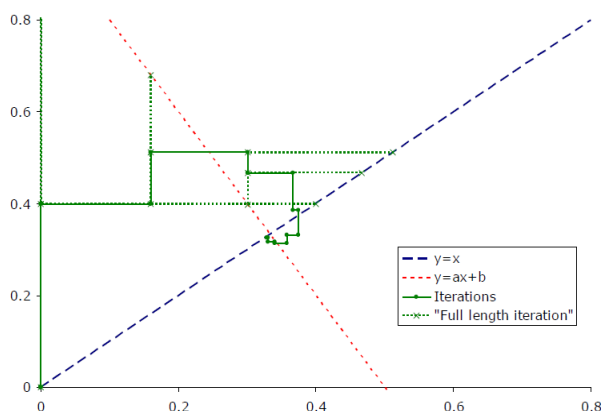
Размотримо систем једначина:

$$y=ax+b, y=x \tag{25}$$

Солвер ће решити овај проблем само за $-1 < a < 1$ (слика 22) [103]. До оваквог случаја долази када су у симулацији две величине повезане у цикличној информатичкој петљи.



Слика 22. Солвер 0 без релаксације



Слика 23. Солвер 0 са нумеричком релаксацијом

Солвер покушава решавање оваквог проблема са $a= -1$ и $b=1$. Почевши са почетном претпостављеном вредности $y=0$. Вредности којима се врши симултана замена величине 1 ((UNIT 1): 1, -1, 3, -5 . Метода нумеричке релаксације се огледа у додавању корекционих фактора излазним вредностима како би се ограничила њихова промена (слика 23) [103].

$$OUT_{n+1} = OUT_n + RF(OUT_{n+1} - OUT_n) \quad (26)$$

Где је RF фактор релаксације. Ако је $RF = 1$, ($0 \leq RF \leq 1$), тада нема релаксације (за солвер 0).

Овде треба напоменути да за $a > 1$, није могуће пронаћи позитивну вредност фактора релаксације који води до конвергенције, те је неопходно користити негативну вредност фактора релаксације.

4.3.2.2. Имплементација метода сукцесивне апроксимације

Фактор релаксације се бира за сваки од излаза независно, што води до промене вредности излаза у складу са овим. Правила имплементације за промену релаксационог фактора су дата као [103]:

$$if((OUT_{n+1} - OUT_n)(OUT_n - OUT_{n-1}) < 0) \quad (27)$$

$$RF_{n+1} = \frac{RF_n}{2} \quad (28)$$

$$RF_{n+1} = 1.5 \cdot RF_n \quad (29)$$

Где је RF увек ограничено на интервал $[RF_{min}, RF_{max}]$.

4.3.3. Решавање диференцијалних једначина

Програм користи две методе за решавање диференцијалних једначина: апроксимација аналитичког решења помоћу подпрограма и нумеричко решавање применом једне од три доступне методе [103]:

1. Модификовани Ојлеров метод (метод „Runge-Kutta“ другог реда);
2. Хеунов метод („Predictor-Corrector“ метод другог реда);
3. Адамсов метод („Predictor-Corrector“ метод четвртог реда).

Описи примењене имплементације ових метода, према литератури софтвера [103], доступни су у литератури [145].

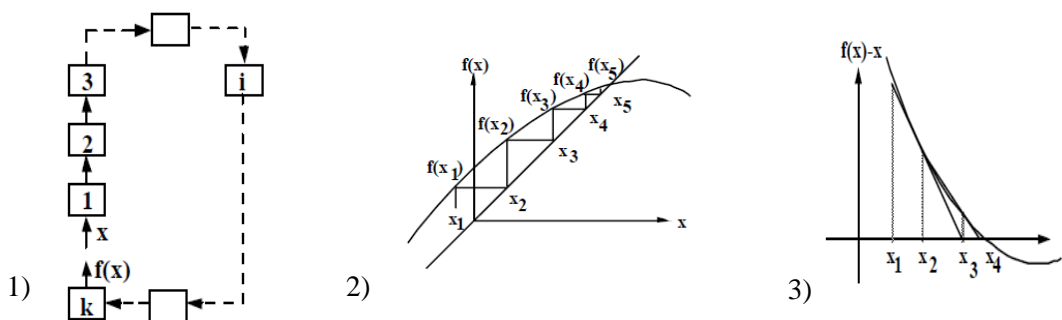
Аналитички метод се користи по препоруци [103] где год је могуће написати диференцијалну једначину облика:

$$\frac{dT}{dt} = aT + b \quad (30)$$

Нумеричко решавање обично захтева краће временске кораке и више прорачуна како би се постигла упоредива тачност и нумеричка стабилност.

4.3.4. Убрзавање конвергенције

Сврха ове команде је смањивање броја итерација потребних за постизање конвергенције у сваком временском кораку симулације. На слици 24 је приказана циклична информатичка петља са k компонената. Излаз компоненте k која је резултат улазне вредности x прве компоненте је израз $f(x)$. Након конвергенције је $x=f(x)$ са алгебарском толеранцијом грешке, односно дефинисаном толеранцијом. Итеративни процес почиње почетном вредности x_1 , као улазом прве компоненте [103]. Даљи поступак по информатичкој петљи води до излаза $f(x_1)$ за компоненту k . Овај излаз се тада користи као друга итерација x_2 , за вредност улазне променљиве прве компоненте. Решење се добија у пресеку криве $f(x)$ и праве под углом од 45° ($f(x)=x$) [103].



Слика 24. (1) Циклични ток информација, (2) Конвергенција sukcesивном апроксимацијом, (3) метода сечице

У овом случају, користи се метода сечице за добијање решења $f(x)=x$. Након две итерације применом солвера, вредности x и $f(x)-x$ се користе за добијање праволијског решења као на слици 24 (3) [103]. Претходне две вредности x_2 и x_3 се користе за добијање апроксимације решења [103]. Уколико је нова апроксимација са већим одступањем од тачног решења од претходне, напушта се метод сечице и користи се опет описана метода апроксимације.

4.4. Математички модели коришћених компонената из библиотеке TRNSYS

За потребе овог рада коришћени су математички модели из библиотеке модела компонената софтвера TRNSYS. Краћи математички опис најважнијих коришћених компонената приказан је у продужетку текста док је комплетан опис доступан у литератури [103].

4.4.1. Туре 2. Диференцијални контролер са хистерезисом

Контролер генерише контролну функцију γ_o , која узима вредности 0 или 1. Вредност γ_o је изабрана као функција разлике између горње и доње температуре, које се упоређују са две температурне разлике ΔT_H и ΔT_L [103]. Нова вредност контролне функције γ_o зависи од тога да ли је $\gamma_i = 0$ или $\gamma_i = 1$.

Уколико је контролер претходно био у стању ON [103]:

$$\text{ако је } \gamma_i = 1 \text{ и } \Delta T_L \leq (T_H - T_L), \gamma_o = 1 \quad (31)$$

$$\text{ако је } \gamma_L = 1 \text{ и } \Delta T_L > (T_H - T_L), \gamma_o = 0 \quad (32)$$

где су:

ΔT_H [°C] горња гранична температурна разлика;

ΔT_L [°C] доња гранична температурна разлика;

T [°C] горња улазна температура;

T_{IN} [°C] температура за праћење горње границе;

T_L [°C] доња улазна температура;

T_{MAX} [°C] максимална улазна температура;

γ_i [0,..1] улазна контролна функција;

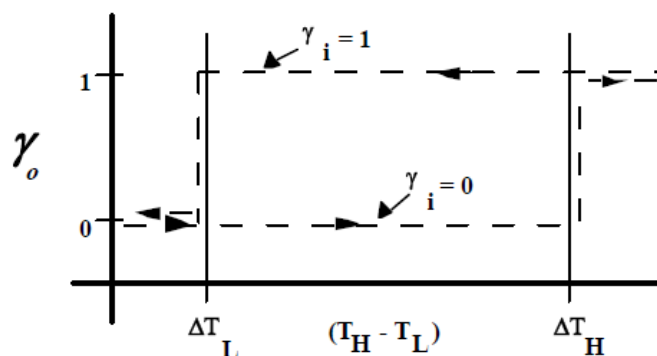
γ_o [0,..1] излазна контролна функција.

Уколико је контролер претходно био у стању OFF [103]:

$$\text{ако је } \gamma_i = 0 \text{ и } \Delta T_H \leq (T_H - T_L), \gamma_o = 1 \quad (33)$$

$$\text{ако је } \gamma_i = 0 \text{ и } \Delta T_H > (T_H - T_L), \gamma_o = 0 \quad (34)$$

Уколико је $T_{IN} > T_{MAX}$, контролна функција узима вредност 0, независно од горње и доње температуре која се прати. До оваквог случаја долази нпр. код загревања акумулатора топлоте где се искључује напојна пумпа уколико температура у акумулатору достигне задати максимум. Контролна функција је приказана на слици 25 [103]:



Слика 25. Контролна функција [103]

4.4.2. Туре 3: Пумпа са променљивим протоком

Модел пумпе (или вентилатора), срачунава масени проток помоћу променљиве контролне функције чија је вредност између 0 и 1. Потрошња електричне енергије пумпе или вентилатора се такође може израчунати, или као линеарна функција масеног протока, или као функција масеног протока коју дефинише корисник. Ова компонента обезбеђује одговарајући масени проток низводно од ње, док се проток на улазу користи само за проверу конвергенције [103].

4.4.2.1. Математички опис

Излазна температура је [103]:

$$T_0 = T_i + \frac{P \cdot f_{par}}{\dot{m} c_p} \quad (35)$$

где су:

T_i температура флуида на улазу;

T_0 температура флуида на излазу;

P потрошња електричне енергије пумпе/вентилатора;

f_{par} удео снаге пумпе/вентилатора који се конвертује у енергију флуида ;

c_p топлотни капацитет радног медијума.

Излазни проток је [103]:

$$\dot{m}_0 = \gamma \dot{m}_{max} \quad (36)$$

где су:

γ контролна функција;

\dot{m}_{max} максимални проток (за $\gamma=1$).

Уколико други параметри нису обезбеђени, линеарна зависност између протока и потрошње електричне енергије се претпоставља као [103]:

$$P = \gamma \dot{P}_{max} \quad (37)$$

где је:

\dot{P}_{max} максимална потрошња електричне енергије пумпе (за $\gamma=1$).

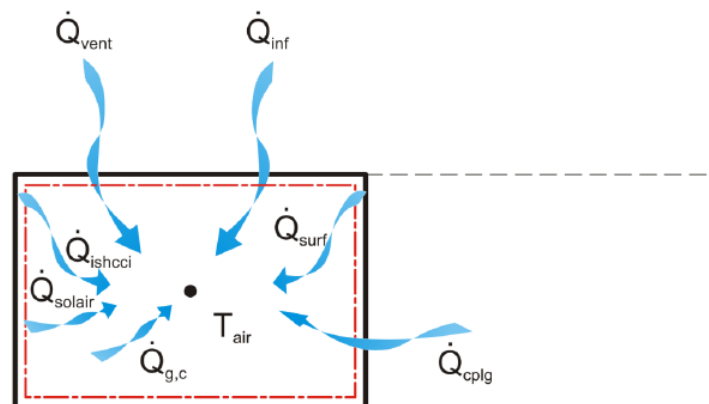
4.4.3. Туре 56: Вишезонска зграда

Модел ове компоненте опонаша топлотно понашање зграде подељене у више различитих топлотних зона. За коришћење ове компоненте, неопходно је коришћење пред-процесорског програма TRNBuild, који читава и врши обраду фајла са описом објекта и генерише два фајла која користи модел компоненте TYPE 56 у току симулације.

4.4.3.1. Математички опис

4.4.3.1.1. Топлотна зона

Модел зграде TYPE 56 је геометријски модел енергетског биланса ваздуха топлотне зоне са једном карактеристичном нодалном тачком, коју карактерише топлотни капацитет запремине ваздуха зоне и топлотни капацитети величина које су у блиској вези са том зоном (попут намештаја нпр.) (слика 26) [103].



Слика 26. Топлотни биланс зоне [103]

Енергетски биланс ваздуха топлотне зоне са карактеристичном нодалном тачком [103]:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solar,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad (38)$$

где је:

$\dot{Q}_{surf,i}$ укупни транспорт топлоте са унутрашњих површина температуре $T_{wall,i}$, за коефицијент прелаза топлоте $[W/m^2K]$ и температуру ваздуха у зони T_{air} :

$$\dot{Q}_{surf,i} = U_{w,i} A_{w,i} (T_{wall,i} - T_{air}) \quad (39)$$

$\dot{Q}_{inf,i}$ укупни инфилтрациони губици (проток ваздуха \dot{V}_{inf} . Густине ρ из спољашње средине температуре $T_{outside,i}$):

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V}_{inf} \cdot \rho \cdot c_p (T_{outside,i} - T_{air}) \quad (40)$$

$\dot{Q}_{vent,i}$ укупни вентилациони губици (проток ваздуха \dot{V}_{vent} , температуре $T_{ventilation,i}$ из извора који дефинише корисник, нпр КГХ систем) [103];

$$\dot{Q}_{vent,i} = \dot{V}_{vent} \cdot \rho \cdot c_p (T_{ventilation,i} - T_{air}) \quad (41)$$

$\dot{Q}_{g,c,i}$ укупни унутрашњи добици конвекцијом (од људи, опреме, осветљења, радијатора и сл.);

$\dot{Q}_{cplg,i}$ укупни добици топлоте услед протока ваздуха \dot{V} из суседне зоне температуре ваздуха $T_{zone,i}$ и/или гранични услов [103];

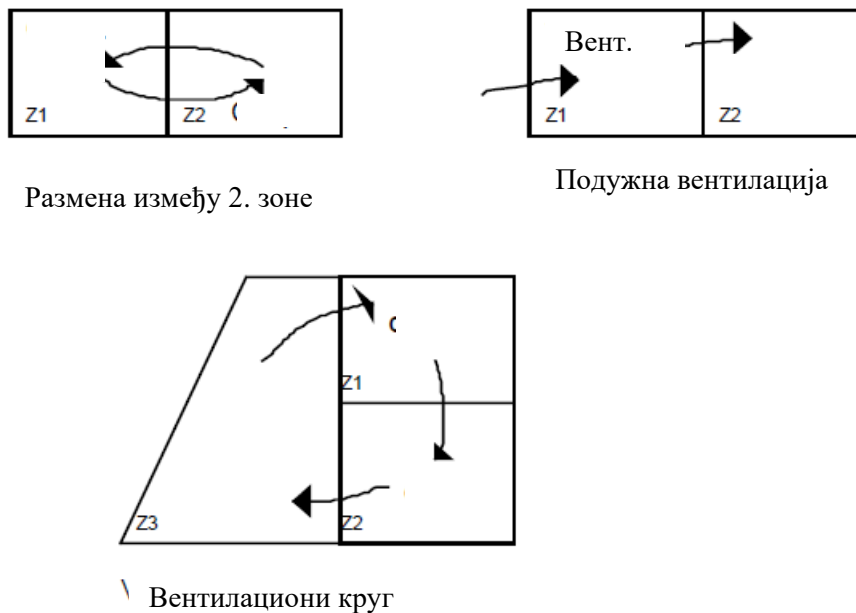
$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (42)$$

$\dot{Q}_{solar,i}$ представља удео соларне радијације која улази кроз контролну границу зоне кроз спољашње прозоре и тренутно се преноси као конвективни добитак ваздуха унутар зоне i ;

$\dot{Q}_{ISHCCI,i}$ је укупно апсорбовано соларно зрачење од стране унутрашњег засенчења које се директно преноси као конвективни добитак ваздуху.

4.4.3.1.2. Упаривање

Упаривање дефинише проток ваздуха који једна зона прима од друге зоне, на основу енергетског биланса за нодалну тачку зоне (слика 27) [103]. На овај начин није унапред дефинисано која количина ваздуха се враћа назад у зону приликом међузонске размене. Зато је неопходно посебно дефинисати супротносмерно упаривање тако да зона у коју улази одређена количина ваздуха, исту ту количину ваздуха враћа назад [103].

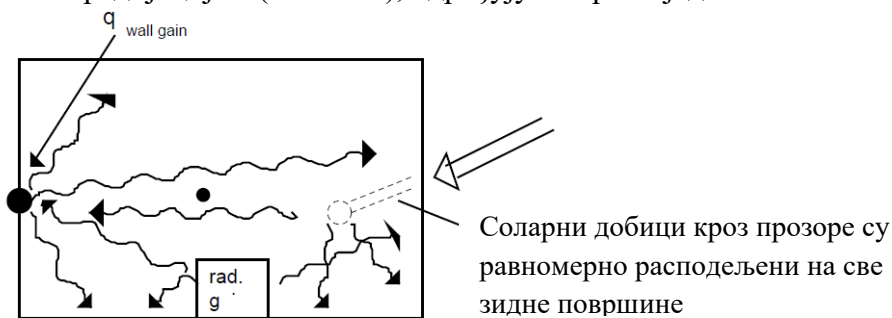


Слика 27. Упаривање зона [103]

TYPE 56 не врши проверу биланса ваздуха, те је могуће неадекватним упаривањем зона, вентилације и инфилтрације, испразнити или препунити једну зону ваздухом, уколико подешавање нема физички смисао [103].

4.4.3.1.3. Добици топлоте радијацијом (за зидове и прозоре)

Укупни добаци топлоте радијацијом (слика 28), одређују се према једначини:



Слика 28. Добици топлоте радијацијом [103]

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall\ gain} \quad (43)$$

где су:

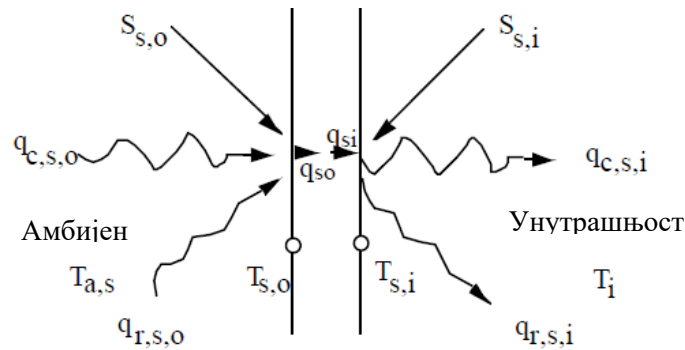
\dot{Q}_{r,w_i} [kJ/h] добаци услед радијације у нодалној тачки за површину зидова;

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} [kJ/h] унутрашњи добаци радијацијом које прима зид;

\dot{Q}_{sol,w_i} [kJ/h] добици соларне радијације кроз прозоре зоне које прима зид;
 \dot{Q}_{long,w_i} [kJ/h] дуготаласна размена радијације између зида и осталих зидова;
 $\dot{Q}_{wall\ gain}$ [kJ/h] топлотни добици које дефинише корисник за зид или прозор.

4.4.3.1.4. Интеграција зидова и прозора

На слици 29 су приказани топлотни флуksеви и температуре које карактеришу термичко понашање било ког зида или прозора [103].



Слика 29. Топлотни биланс било ког зида [103]

Топлотни биланси на унутрашњој и спољашњој површини зида су [103]:

$$q_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (44)$$

$$q_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k \dot{q}_{s,0}^k \quad (45)$$

где су:

$S_{s,i}$ радијациони топлотни флуks који апсорбује унутрашња површина (соларни и радијациони добици);

$S_{s,o}$ радијациони топлотни флуks који апсорбује спољашња површина (соларни добици);

$q_{r,s,i}$ нето специфични транспорт топлоте радијацијом са свих површина зоне;

$q_{r,s,o}$ нето специфични транспорт топлоте радијацијом са свих површина видљивих са спољашње површине;

$q_{s,i}$ конвенктивни специфични топлотни флуks до унутрашње површине зида;

$q_{s,o}$ специфични топлотни флуks на спољашњем зиду транспортован кондукцијом кроз зид;

$q_{c,s,i}$ специфични конвенктивни топлотни флуks са унутрашње површине зида ка ваздуху у зони;

$q_{c,s,o}$ специфични конвенктивни топлотни флуks на спољашњу површину зида од околине;

$T_{s,i}$ температура унутрашње површине;

$T_{s,o}$ температура спољашње површине;

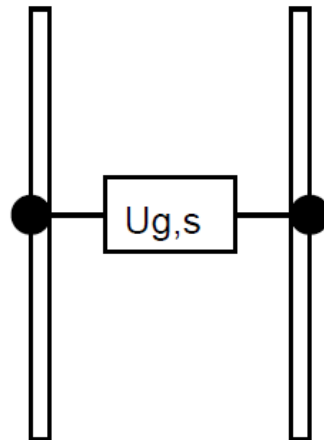
T_i температура ваздуха у зони у карактеристичној нодалној тачки;

$T_{a,s}$ температура амбијента са спољашње граничне површине;

a,b,c,d временски коефицијенти који се према [103] одређују преносном функцијом.

Евалуација ових временски зависних једначина у погледу температуре одређених површина се врши у једнаким временским интервалима. Индекс k се односи на временски корак. Тренутни временски корак добија се за $k=0$, претходни временски тренутак за $k=1$ и тд.

Модел прозора је термички сагледан као спољашњи зид без масе, делимично пропустљив за соларне, али непрозиран за високо таласне унутрашње добитке. Појава високоталасне апсорпције је претпостављена само на површинама. У погледу топлотног биланса, прозор је представљен компонентом са две нодалне тачке, као на слици 30.



Слика 30. Прозор као компонента са две нодалне тачке [103]

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = U_{g,s} \quad (46)$$

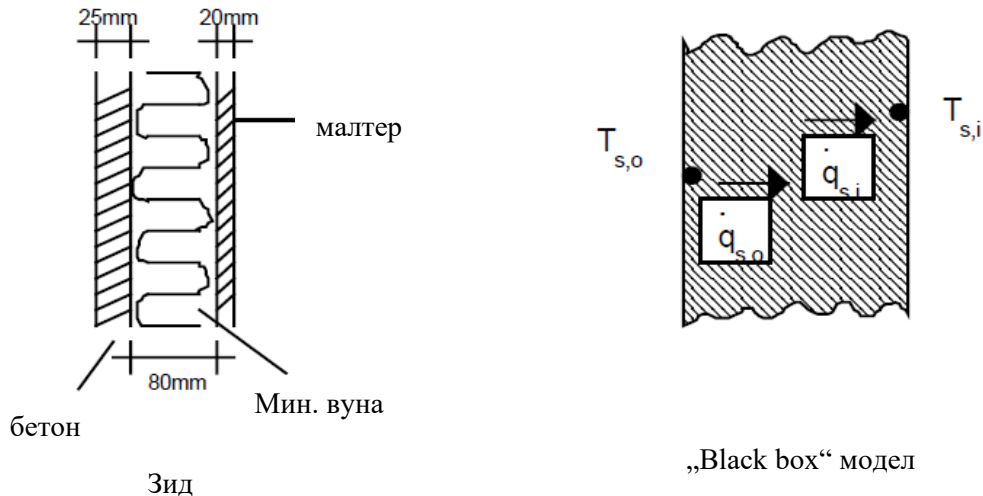
$$a_s^k = b_s^k = c_s^k = d_s^k = 0, \quad k > 0 \quad (47)$$

где је $U_{g,s}$ укупни коефицијент губитака кроз застакљење од унутрашње до спољашње површине.

4.4.3.1.5. Метод преносне функције

Метод преносне функције или фактора одзива се може описати као метод „термичке историје“ зида. Зид је моделиран као „black box“ (слика 31) [103]. Број временских корака

(i) који је повезан са временском основом (коју дефинише корисник) одређује да ли је у питању тежак зид са великом термичком масом ($i \leq 20$), или је потребно урачунати свега пар суседних временских корака како би се описало топлотно понашање зида [103]. Уколико је временска основа зида већа од временске константе, срачунавање коефицијената матрице преносне функције се зауставља. Тако да се „танки“ зид може заменити дефинисањем одређеног отпора чиме се занемарује топлотна маса [103].

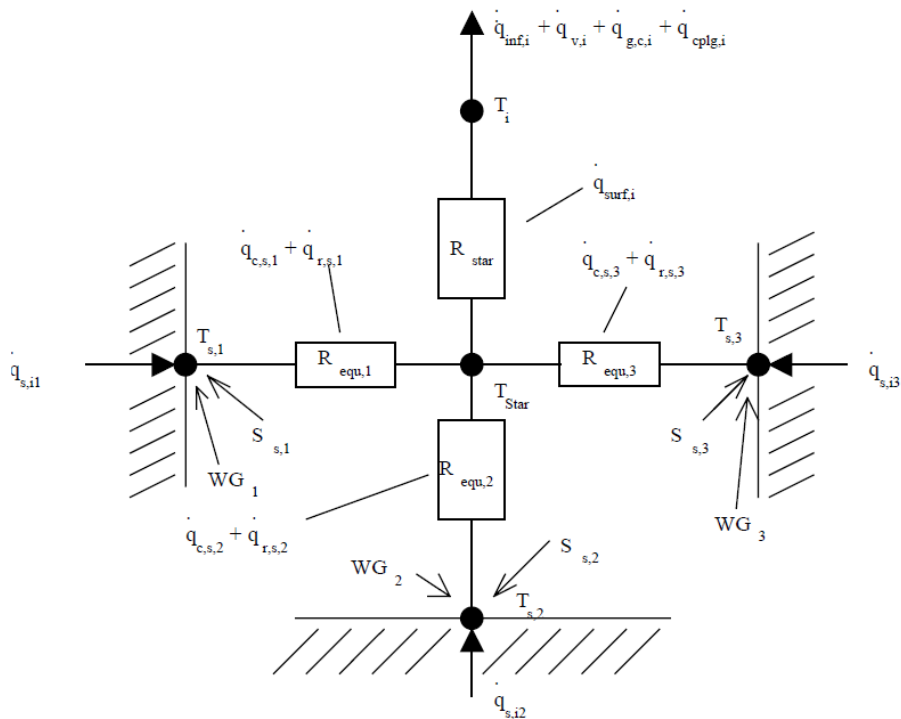


Слика 31. Модел зида (лево реални зид, десно „black-box“ модел) [103]

Методом преносне функције, подпрограм одређује коефицијенте a, b, c, d једначина (44) и (45). На тај начин, динамичка симулација која узима у обзир утицај акумулације топлоте у маси елемента омотача топлотне зоне заправо не користи коефицијенте прелаза топлоте за прорачун провођења топлоте, већ одређује кориговану вредност транспорта топлоте кроз површине зидова помоћу преносне функције. Верификација примене наведене преносне функције и ове методе наводи се у литератури [103].

4.4.3.1.6. Високоталасна радијација

Високоталасна радијација између површина у оквиру зоне и конвективни топлотни флуks са унутрашњих површина на ваздух у зони се апроксимирају методом „звездане мреже“ као што је приказано на слици 32 где се фиктивна температура у нодалној тачки (T_{Star}) користи за урачунавање паралелног енергетског тока са површине зида конвекцијом до ваздушне нодалне тачке и радијацију до других зидова и прозора [103].



Слика 32. Звездана мрежа за зону са три површине [103]

$$R_{STAR,i} = f(\alpha_i, A_{Surf,i}) = \frac{1}{Q_{surf,i}} (T_{Star} - T_i) \quad (48)$$

Фиктивна температура у нодалној тачки (температура звезде) се може користити за срачунавање нето радијације и конвективног топлотног флукса са унутрашње површине зида [103]:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (49)$$

тада је

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{S,i} - T_{star}) \quad (50)$$

где су:

$\dot{q}_{comb,s,i}$ комбиновани конвективни и радиациони специфични топлотни флукс;

$A_{s,i}$ унутрашња површина

За екстерне површине високоталасна размена радијације на спољашњој површини се сагледава експлицитно помоћу фиктивне температуре неба – T_{sky} , што је један од улаза модела и фактора изложености небу (f_{sky}), за сваку размењивачку површину. Укупни транспорт топлоте $\dot{q}_{comb,s,o}$ се добија као сума конвекције и радијације [103].

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o} \quad (51)$$

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o} \cdot (T_{a,s} - T_{s,o}) \quad (52)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} \cdot (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad (53)$$

$$T_{fsky} = (1 - f_{sky}) \cdot T_{a,s} + f_{sky} \cdot T_{sky} \quad (54)$$

где су:

$\dot{q}_{comb,s,o}$ комбиновани специфични топлотни флуks – конвективни и радијациони;

$\dot{q}_{c,s,o}$ конвективни специфични топлотни флуks за површину;

$\dot{q}_{r,s,o}$ радијациони специфични топлотни флуks кроз површину;

$h_{conv,s,o}$ транспорт топлоте конвекцијом кроз спољашњу површину;

f_{sky} део неба који се види са спољашње површине;

T_{sky} фиктивна температура неба за високоталасну размену топлоте радијацијом;

$\varepsilon_{s,o}$ високоталасна емисивност површине;

σ Stephan-Boltzman-ова константа.

Биланс енергије за површину је [103]:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} \quad (55)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (56)$$

За унутрашње површине $S_{s,i}$ може да укључи и соларну радијацију и високоталасну радијацију,

4.4.3.1.7. Спољашњи зидови

За зидове са спољашњим граничним условима важи једначина [103]:

$$\dot{q}_{s,i} = B_s T_{a,s} - C_s T_{star,i} + D_s \quad (57)$$

где су B_s и D_s коефицијенти описани у [103].

Важи и за зид са познатим граничним условима са познатим температурама на граници $T_{b,s}$ и где се $T_{b,s}$ мења са $T_{a,s}$.

За зид који се граничи са другом зоном, унутрашње зидове или зидове суседне зоне са идентичним граничним условима важи иста једначина [103]:

$$T_{a,s} = T_{star,j} \text{ за суседну зону,}$$

$$T_{a,s} = T_{star,i} \text{ за унутрашњи зид,}$$

$$T_{a,s} = T_{star,i} \text{ за суседни зид са идентичним граничним условом,}$$

4.4.3.1.8. Укупни добици са површина у зони

Укупни губици од различитих површина у једној зони представљају суму [103]:

$$\dot{Q}_{surf,i} = \sum A_s \dot{q}_{comb,i} = \sum_{j=1}^{Susedne\ zone} \sum_{i=1}^{površni\ i\ do\ j} A_s B_s T_{star,j} + \sum^{spoljašnja\ površ} A_s B_s T_a + \sum^{unutr.zidovi} A_s B_s T_{star} + \sum A_s B_s T_{b,s} - \sum^{površina\ zone\ i} A_s (C_s T_{star,i} - D_s - S_{s,i}) \quad (58)$$

где је A_s унутрашња површина зоне.

Биланс енергије нодалне тачке у звезди је [103], где је $R_{star,i}$ одређено једначином (48):

$$\dot{Q}_{surf,i} = \frac{1}{R_{star,i}} (T_{star,i} - T_i) \quad (59)$$

4.4.3.1.9. Инфилтрација, вентилација и конвективно упаривање

Инфилтрација и вентилација се ирачунавају преко броја промена ваздуха на сат за сваку зону. Масени проток је производ запремине зоне, густине ваздуха, и степена промене ваздуха. Инфилтрација потиче увек од спољашњег ваздуха, док вентилација представља довод ваздуха одређене (некад и променљиве) температуре [103]. Претпоставља се да једнаке количине ваздуха напуштају зону са температуром ваздуха те зоне. Укупни добици енергије било које зоне због инфилтрације и вентилације су [103]:

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf,i} c_p (T_a - T_i) \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \sum_k^{nvent} \dot{m}_{v,k,i} c_p (T_{v,k} - T_i) \quad (61)$$

где су:

$\dot{m}_{inf,i}$ масени проток инфилтрационог ваздуха;

$\dot{m}_{v,k,i}$ масени проток вентилационог ваздуха вентилационог система k;

c_p топлотни капацитет ваздуха;

$T_{v,k}$ температура вентилационог ваздуха вентилационог система k;

T_a температура амбијента.

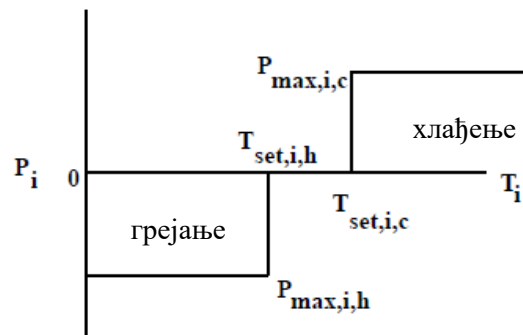
За сваки зид или прозор који дели зоне са променљивом температуром, или зид са познатим граничним условом, могуће је одредити конвективно упаривање [103]. Ово упаривање се односи на масени проток ваздуха који улази у зону кроз ту површину, при чему се претпоставља да једнака количина ваздуха излази из зоне са температуром у зони. Добитак енергије од конвективног упаривања је сума свих добитака за све зидове у зони [103]:

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \sum^{Sus.zone} \sum^{površi\ i\ do\ j} \dot{m}_{cplg,s} c_p (T_f - T_i) + \dots + \sum \dot{m}_{cplg,s} c_p (T_{b,s} - T_i) \quad (62)$$

где је $\dot{m}_{cplg,s}$ масени проток ваздуха који улази у зону кроз зидове и прозоре.

4.4.3.1.10. Модел грејања и хлађења

Овај модел се користи за одређивање потребне енергије за грејање и хлађење. Проток енергије за грејање и хлађење је у директној вези са карактеристичном нодалном тачком зоне. Топлотно оптерећење опреме за грејање и/или хлађење је функција температуре зоне, као што је приказано на слици 33 [103]:



Слика 33. Потребна снага за задату температуру [103]

где су:

P_i топлотно оптерећење за грејање и хлађење зоне;

$P_{max,i}$ апсолутна вредност максималног капацитета за грејање / хлађење зоне;

$T_{set,i}$ задата унутрашња температура зоне у режиму грејања и/или хлађења.

Промена температуре ваздуха зоне, је по претпоставци линеарна [103]. Уколико је доступна одређена снага за одржавање задате температуре, и уколико је доступна снага довољна за одржавање задате температуре, тада је позната средња температура зоне [103]:

$$T_t = T_{set,i} \quad (63)$$

$$T_{req,i} = \frac{T_{\tau-\Delta t} + T_{set,i}}{2} \quad (64)$$

где је $T_{req,i}$ средња температура зоне за временски корак уколико је потребна мања количина топлоте од максималног капацитета моделираног система грејања/хлађења.

За зоне које спадају у област грејања или хлађења и карактерише их мање од топлотно оптерећење од максималног капацитета, претпоставља се да је коначна температура једнака задатој температури грејања или хлађења и да је средња температура зоне $T_{req,i}$ [103]. Промена температуре у зони се тада може одредити за топлотни капацитет зоне C_i према:

$$C_i \frac{d}{dt} T = \dot{Q}_i - P_i \quad (65)$$

где су P_i и Q_i су по претпоставци константне у току једног временског корака, а процена Q_i се врши за средњу температуру зоне. Заменом у претходној једначини, добија се [103]:

$$\begin{aligned} \bar{P}_i - \frac{1}{R_{star,i}} T_{star,i} - \sum_{\text{зона } i \text{ до } j}^{\text{сус.површине}} \dot{m}_{cplg,s} c_p \bar{T}_j = - \left[\frac{1}{R_{star,i}} + \left(\dot{m}_{inf,i} + \dot{m}_{v,i} + \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{\text{површине } i \text{ до } j} \dot{m}_{cplg} + \sum_{\text{Позната граница}} \dot{m}_{cplg} \right) c_p \right] \bar{T}_{req,i} - \frac{c_i}{\Delta t} (T_{set,i} - T_{\tau-\Delta t}) + \dot{m}_{inf} c_p T_a + \\ \sum_k^{invent} \dot{m}_{v,k,i} c_p T_{v,k} + \dot{Q}_{g,c,i} + \sum_{\text{Позната граница}} \frac{d}{dt} \dot{m}_{cplg} c_p \bar{T}_b \end{aligned} \quad (66)$$

Ова једначина се мења једначинама биланса енергије за све зоне, за сваку зону која је у области са мањим потребама за грејањем или хлађењем од максималног [103]. Како би се одредили региони грејања и хлађења за све зоне, најпре се срачунавају температуре за случај без грејања и хлађења. Ово дозвољава прву процену контроле грејања и хлађења [103]. За зоне где је потребно грејање и хлађење, потребна енергија за одржавање задате температуре зоне се одређује. Уколико је потребна мања количина енергије од максималне, зона се распоређује у област са потребом мањом од максималне снаге за грејање и хлађење [103]. У супротном, за грејање или хлађење потребна је максимална снага [103]. Решава се систем једначина у матричном облику, а процес се понавља све док не дође до промене контролне стратегије [103]. Након тога се врши процена потребне енергије по зонама и одржавају се на фиксираним нивоу [103].

4.4.4. Туре 1. Плочасти соларни колектор (STC)

Овај модел је намењен за симулирање рада већег броја соларних колектора [103]. Укупна површина колектора може да садржи више колектора повезаних серијски или паралелно. Топлотно понашање низа колектора се одређује бројем модула у серијској вези и карактеристикама сваког од модула. Улазни параметри су резултати стандардизованих тестова ефикасности, однос разлике промене температуре флуида и температуре амбијента и радијације ($\Delta T/I_T$) [103]. Температура флуида може да буде улазна, средња или излазна температура. Модел врши апроксимацију криве ефикасности колектора квадратном једначином. Корекције се примењују на нагибни угао, пријем, параметре закривљености,

за срачунавање присуства размењивача топлоте, низа идентичних колектора, протока флуида различитог од оног у току тестирања.

4.4.4.1. Математички опис

Општи облик једначине ефикасности соларног термалног колектора се добија једначином Hottel Whiller [103]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A I_T} = \frac{\dot{m} c_{pf} (T_o - T_i)}{A I_T} = F_R (\tau \alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (67)$$

где су:

- $A [m^2]$ укупна површина низа колектора или бруто површина;
- $I_T [kJ/hm^2]$ укупна директна радијација соларног колектора (за површину под углом);
- $\dot{m} [kg/h]$ масени проток за услове експлоатације;
- $c_{pf} [kJ/kg K]$ специфични топлотни капацитет радног флуида колектора;
- $T_i [^\circ C]$ температура флуида на улазу у колектор;
- $T_o [^\circ C]$ температура флуида на излазу из колектора;
- $F_R [-]$ фактор укупне ефикасности „уклањања“ топлоте колектора;
- $(\tau \alpha) [-]$ производ емисивности поклопца и коефицијента апсорпције;
- $U_L [kJ/hm^2 K]$ коефицијент укупних губитака колектора по јединици површине;
- $T_a [^\circ C]$ температура амбијента.

Коефицијент губитака U_L , није константан, па се бољи израз добија узимајући у обзир линеарну зависност овог коефицијента од $(T_i - T_a)$ [103]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A I_T} = F_R (\tau \alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (68)$$

где је:

- $(\tau \alpha)_n [-]$ $(\tau \alpha)$ за нормални упадни угао;
- $U_{L/T} [kJ/hm^2 K]$ коефицијент зависности топлотног губитка од T .

Одакле се добија:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(\Delta T)}{I_T} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{I_T} \quad (69)$$

где је:

$$\Delta T = T_i - T_a$$

a_0 [-] коефицијент ефикасности колектора;

a_1 [kJ/hm²K²] негативна вредност коефицијента првог степена у једначини ефикасности;

a_2 [kJ/hm²K²] негативна вредност коефицијента другог степена једначине ефикасности.

Ова температурна разлика се понекад добија у другој форми приликом тестирања колектора [103]:

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_i = T_i - T_a \\ \Delta T_{av} = T_{av} - T_a \\ \Delta T_o = T_o - T_a \end{cases} \quad (70)$$

где је T_{av} [°C] просечна температура радног флуида колектора.

Уколико су коефицијенти дати за излазну температуру, примењују се корекциони фактори, који су изведени за криву линеарне ефикасности, па се претходна једначина мора довести у одговарајући облик. Модификована ефикасност колектора првог степена је [103]:

$$U'_L = U_L + U_{L/T}(T_i - T_a) \quad (71)$$

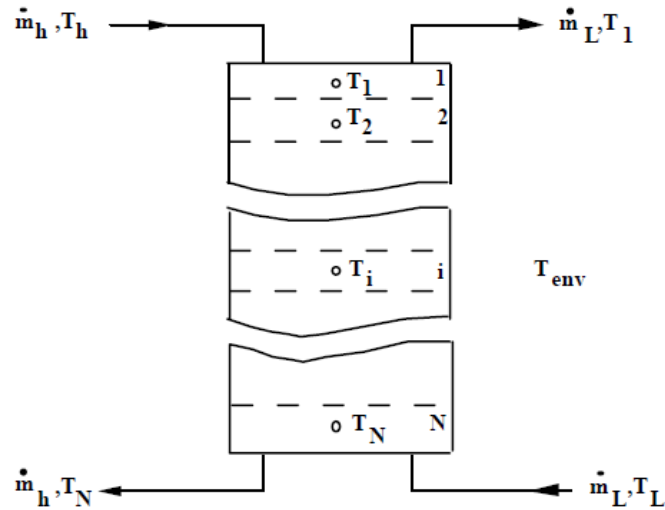
Чиме се добија:

$$\eta = \frac{Q_u}{A I_T} = F_R (\tau \alpha)_n - F_R U'_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (72)$$

Корекциони фактори протока и промене нападаног угла дати су у литератури [103].

4.4.5. Туре 4. Акумулатор топлоте са стратификацијом

Топлотно понашање сензибилног акумулатора топлоте испуњеног флуидом са топлотном стратификацијом је моделиран са претпоставком да у резервоару постоји N ($N \leq 15$) потпуно измешаних једнаких запреминских сегмената, као што је приказано на слици 34.



Слика 34. Акумулатор топлоте са стратификацијом [103]

Степен стратификације је одређен бројем N . За $N = 1$, топлотни акумулатор се моделира као резервоар са потпуним мешањем, без појаве стратификације. Постоје опције променљивих улаза, различитог растојања нодалних тачака, подешавања граничне температуре на термостату грејача, укупних коефицијената губитака, губитака код додатног грејача [103].

4.4.5.1. Математички опис

Струје флуида улазе у акумулатор на фиксираним местима. Струја „израђеног“ флуида улази у доњи део резервоара, а топли флуид након извора улази одмах испод додатног грејача, уколико додатни грејач постоји, или на врху резервоара, уколико додатни грејач није дефинисан. На крају сваког временског интервала, свака инверзија температуре се елиминише тоталним мешањем са одређеним суседним нодалним тачкама. Могуће је одредити висину нодалне тачке, или подесити једнако растојање између нодалних тачака.

Модел додатно укључује два електрична грејна елемента, чији рад се контролише временски или према некој температури. Ови грејачи имају два радна режима: у првом режиму доњи грејач се пали само у случају да је услов паљења горњег грејача већ задовољен, у другом режиму раде оба истовремено. Њихов рад одређује у оба случаја контролна температурна разлика.

4.4.5.2. Топлотни губици

У већини случајева, довољно је да се рачунају униформни губици, али је могуће урачунати и губитке на спојевима арматуре (цевовода) и акумулатора, за шта је потребно подесити додатне параметре. За прорачун укупног коефицијента губитака, потребно је одредити пети параметар $PAR 5$ мањи од нуле и одредити укупни коефицијент губитака. Коефицијент губитака у i -тој нодалној тачки је тада [103]:

$$U_i = |PAR 5| + \Delta U_i \quad (73)$$

где је ΔU_i укупни коефицијент губитка између i -те нодалне тачке и њене околине.

Како би се укључио ефекат кључања, моделиран је и сезнор притиска, при чему је потребно одредити температуру кључања. Отварањем вентила, долази до губитака „вишка“ енергије, а акумулатор се одржава на температури кључања, при чему се губитак масе занемарује [103].

Модел даје могућност симулирања губитака издувних гасова гасног загрејача који се налази у резервоару [103]. Потребно је одредити кондуктивност губитака топлоте издувних гасова када грејач не ради, на основу температуре амбијента.

4.4.5.3. Струје флуида

Пертпоставка овог модела је да се флуид који уструјава у било коју зону потпуно меша, пре уласка у било који сегмент (слика 35). Биланс енергије једног сегмента је [103]:

$$M_i c_{pf} \frac{dT_i}{dt} = \begin{cases} (\dot{m}_1 - \dot{m}_3)(T_{i-1} - T_i)c_{pf} & \dot{m}_1 \geq \dot{m}_3 \\ (\dot{m}_3 - \dot{m}_1)(T_{i+1} - T_i)c_{pf} & \dot{m}_1 < \dot{m}_3 \end{cases} \quad (74)$$

где су:

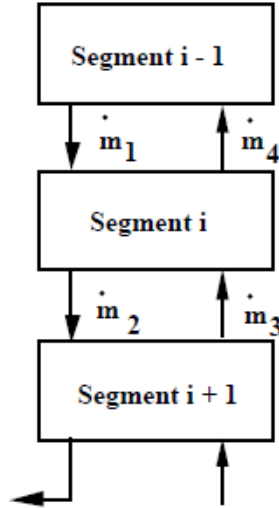
i сегмент резервоара, где је сегмент са највишом температуром $i=1$;

M_i маса флуида у i -том сегменту;

c_{pf} специфично топлотни капацитет флуида у резервоару;

T_i температура i -тог сегмента.

Ова претпоставка дозвољава већу могућност стратификације.



Слика 35. Струјање између сегмената [103]

Додатни загрејач је искључен за $\gamma_{хтр} = 0$, уколико је већ био искључен и важи [103]:

$$T_{IT} \geq T_{set} - T_{db} \text{ или } T_{IT} \geq T_{set}$$

где је:

T_{set} температура термостата;

γ_i контролна функција: $\gamma_i = \dot{m}_h \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - \dot{m}_L \sum_{j=i+1}^N \beta_j$;

α_i контролна функција чија је вредност 1 за $i=Sh$, а у супротном 0;

β_i контролна функција чија је вредност 1 за $i=Sl$, а у супротном 0;

Sh број сегмента где улази флуид од извора топлоте;

Sl број сегмента где улази флуид који мења флуид изручен за потребе конзума.

У супротном, количина енергије која се доводи резервоару са грејача је

$$\dot{Q}_{aux} = \min(\dot{Q}_{req}, \dot{Q}_{max}) \quad (75)$$

где су:

\dot{Q}_{aux} укупна улазна количина енергије грејача;

\dot{Q}_{req} количина улазне енергије потребна за загревање целог акумулатора на задату температуру.

Биланс енергије i -тог сегмента акумулатора је за $i = 1, N$ [103]:

$$M_i c_{pf} \frac{dT_i}{dt} = \alpha_i \dot{m}_h c_{pf} (T_h - T_i) + \beta_i \dot{m}_L c_{pf} (T_L - T_i) + UA_i (T_{env} - T_i) + \gamma_i (T_{i-1} - T_i) c_{pf} + \dot{Q}_i \text{ ако је } \gamma_i > 0 \quad (76a)$$

$$M_i c_{pf} \frac{dT_i}{dt} = \alpha_i \dot{m}_h c_{pf} (T_h - T_i) + \beta_i \dot{m}_L c_{pf} (T_L - T_i) + UA_i (T_{env} - T_i) + \gamma_i (T_i - T_{i+1}) c_{pf} \quad \text{ako je } \gamma_i < 0 \quad (77b)$$

где су:

T_L температура флуида на излазу из акумулатора ка конзуму;

γ_i контролна функција;

\dot{Q}_i улазна енергија грејног елемента достављена i -том сегменту;

A_i површина i -тог сегмента акумулатора;

T_{env} температура околине акумулатора;

T_h температура флуида који улази у акумулатор од топлотног извора.

Температуре сваког од N сегмената се одређују интеграцијом њихових извода по времену изражених претходном једначином. На крају сваког временског корака, елиминише се инверзна температура мешањем одговарајућих суседних нодалних тачака.

Ток енергије и промена унутрашње енергије се може срачунати према [103]:

$$\dot{Q}_{env} = \sum_{i=1}^N U_t A_i (T_i - T_{env}) + \gamma_f \sum_{i=1}^{i=l} (UA_i)_{f,i} (T_i - T_f) \quad (78)$$

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_L c_{pf} (T_1 - T_L) \quad (79)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_h c_{pf} (T_h - T_N) \quad (80)$$

$$\Delta E = \frac{V_t \rho_f c_{pf} [\sum_{i=1}^N T_i - \sum_{i=1}^N T_i |_{t=0}]}{N} \quad (81)$$

где су:

V_t запремина резервоара;

ΔE промена унутрашње енергије резервоара;

U_t коефицијент губитка топлоте са површине акумулатора;

t време;

\dot{Q}_S количина топлоте која се одводи за потребе конзума;

\dot{Q}_{in} количина енергије доведена у акумулатор струјом топлог флуида;

T_{env} температура околине акумулатора;

ρ_f густина флуида;

T_f средња температура на излазу из акумулатора;

T_h температура флуида који улази у акумулатор од топлотног извора;

T_L температура флуида на излазу из акумулатора ка конзуму.

4.4.6. Туре 907: Сет мотора са унутрашњим сагоревањем са генератором

Ова компонента представља модел мотора са генератором, као уређаја који производи електричну енергију сагоревањем горива у мотору са унутрашњим сагоревањем. Симулација понашања овог уређаја заснована је на подацима произвођача опреме.

Потребно делимично оптерећење мотора (PLR_{des}) се срачунава на основу једначине [103]:

$$PLR_{des} = \frac{\dot{P}_{del}}{\dot{P}_d} \quad (82)$$

где су:

$\dot{P}_{des} \left[\frac{kJ}{h} \right]$ електрична снага коју треба испоручити применом мотора са генератором;

$PLR_{des} [-]$ потребно делимично оптерећење мотора;

$\dot{P}_d \left[\frac{kJ}{h} \right]$ електрична снага испоручена мотором са генератором.

Максимална могућа вредност ове величине је 1, при чему ова вредност одговара номиналном оптерећењу. Ова компонента учитава податке о понашању уређаја на основу података произвођача опреме о механичкој ефикасности, електричној ефикасности, уделу укупне отпадне топлоте предате радном медијуму за хлађење блока мотора, хладњаку уља, издувним гасовима, накнадном хладњаку, околини.

Збир удела предате отпадне топлоте наведеним топлотним понорима одговара укупној отпадној топлоти [103].

$$f_{tot} = f_{jw} + f_{oilc} + f_{ac} + f_{exh} + f_{env} \quad (83)$$

где су:

$f_{ac} [-]$ удео отпадне топлоте мотора који се предаје систему накнадног хлађења мотора;

$f_{env} [-]$ удео отпадне топлоте мотора који се предаје околини;

$f_{exh} [-]$ удео отпадне топлоте мотора који се предаје преко издувних гасова;

$f_{jw} [-]$ удео отпадне топлоте мотора који се предаје преко радног флуида који хлади блок мотора;

f_{oilc} [-] удео отпадне топлоте мотора који се предаје систему за хлађење уља мотора;
 f_{tot} [-] укупни удео отпадне топлоте мотора.

Снага на вратилу мотора се одређује као [103]:

$$\dot{P}_{shaft} = \frac{\dot{P}_{del}}{\eta_{elec}} \quad (84)$$

Потребна енергија горива се одређује као [103]:

$$\dot{q}_{req} = \frac{\dot{P}_{shaft}}{\eta_{mech}} \quad (85)$$

где су:

\dot{q}_{req} [$\frac{kJ}{h}$] количина енергије потребне за рад мотора са генератором;

η_{elec} [-] ефикасност генератора електричне енергије;

η_{mech} [-] механичка ефикасност мотора;

\dot{P}_{shaft} [$\frac{kJ}{h}$] снага на вратилу мотора;

\dot{P}_{del} [$\frac{kJ}{h}$] испоручена снага.

Количина отпадне топлоте предате радном медијуму за хлађење блока мотора и температура радног медијума на излазу из блока мотора се одређују према једначинама [103]:

$$\dot{q}_{jw} = \frac{f_{jw}}{f_{total}} (\dot{q}_{req} - \dot{P}_{shaft}) \quad (86)$$

$$T_{jw,out} = T_{jw,in} - \frac{\dot{q}_{jw}}{\dot{m}_{jw} c_{p,jw}} \quad (87)$$

где су:

\dot{q}_{jw} [$\frac{kJ}{h}$] количина енергије предата радном медијуму за хлађење блока мотора;

$T_{jw,out}$ [$^{\circ}C$] температура радног медијума за хлађење блока мотора на излазу из блока;

$T_{jw,in}$ [$^{\circ}C$] температура радног медијума за хлађење блока мотора на улазу блока;

\dot{m}_{jw} [$\frac{kg}{h}$] масени проток радног медијума за хлађење блока мотора;

$c_{p,jw}$ [kJ/kg K] специфична топлота расхладног медијума који се користи за хлађење блока мотора.

Једначине за срачунавање количине отпадне топлоте предате хладњаку уља су аналогне наведеним једначинама. Масени проток издувних гасова се одређује на основу номиналног протока издувних гасова према једначини [103]:

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_{exh,rtd} \cdot f_{exh} \quad (88)$$

где је:

$\dot{m}_{exh} \left[\frac{kg}{h} \right]$ масени проток издувних гасова;

$\dot{m}_{exh,rtd} \left[\frac{kg}{h} \right]$ масени проток издувних гасова у номиналном режиму;

f_{exh} удео номиналног протока издувних гасова на основу података произвођача опреме.

Количина топлоте предата околина се одређује на основу једначине [103]:

$$\dot{q}_{env} = \frac{f_{env}}{f_{tot}} (\dot{q}_{req} - \dot{P}_{shaft}) \quad (89)$$

где је:

$\dot{q}_{env} \left[\frac{kJ}{h} \right]$ количина енергије предата околина са мотора;

$\dot{q}_{req} \left[\frac{kJ}{h} \right]$ количина енергије потребне за рад мотора са генератором;

$\dot{P}_{shaft} \left[\frac{kJ}{h} \right]$ снага на вратилу мотора;

$f_{env} [-]$ удео отпадне топлоте мотора који се предаје околина;

$f_{tot} [-]$ укупни удео отпадне топлоте мотора.

Подаци о понашању когенерационог сета мотора са генератором коришћени у овом раду дати су у табели 15.

Табела 15. Перформансе когенерационог сета мотора са генератором при промени оптерећења мотора (промена оптерећења приказана као удео номиналне вредности)

<i>PLR</i>	η_{mech} [-]	η_{elec} [-]	f_{jw} [-]	f_{oilc} [-]	f_{exh} [-]	f_{ac} [-]	f_{env} [-]
0,4	0,338	0,921	0,311	0,07	0,532	0,0	0,087
0,5	0,35	0,932	0,314	0,071	0,526	0,013	0,076
0,6	0,359	0,936	0,314	0,071	0,521	0,026	0,068
0,7	0,365	0,939	0,314	0,07	0,517	0,037	0,061
0,75	0,367	0,939	0,313	0,07	0,515	0,043	0,059
0,8	0,368	0,939	0,313	0,07	0,513	0,048	0,056
0,9	0,368	0,939	0,31	0,069	0,512	0,057	0,052
1,0	0,364	0,939	0,307	0,068	0,514	0,065	0,047

4.4.7. Туре 927: Топлотна пумпа вода-вода

Ова компонента представља модел једностепене топлотне пумпе.

Симулација понашања заснована је на подацима произвођача опреме о капацитету хлађења и грејања и потрошњи електричне енергије топлотне пумпе, у функцији улазне температуре топлотног извора и излазне температуре радног медијума. Модел користи нормиране податке, сведене на јединичне вредности, тако да се множењем са номиналним капацитетом добијају укупне вредности наведених параметара [103].

Коефицијент учинка (COP) у режиму грејања се одређује према [103]:

$$COP = \frac{Cap_{heat}}{\dot{P}_{heat}} \quad (90)$$

где су:

COP [-] коефицијент учинка топлотне пумпе;

Cap_{heat} [kJ/h] капацитет грејања за тренутне услове;

\dot{P}_{heat} [kJ/h] електрична снага потребна за рад топлотне пумпе у режиму грејања.

Количина енергије коју преда извор топлоте у режиму грејања се одређује према [103]:

$$\dot{Q}_{abs} = Cap_{heat} + \dot{P}_{heat} \quad (91)$$

где је:

\dot{Q}_{abs} [kJ/h] количина топлоте предата радном медијуму у режиму грејања;

Cap_{heat} [kJ/h] капацитет грејања за тренутне услове;

\dot{P}_{heat} [kJ/h] електрична снага потребна за рад топлотне пумпе у режиму грејања.

Излазне температуре радних флуида се срачунавају као [103]:

$$T_{source,out} = T_{source,in} - \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{m}_{source}c_{p_{source}}} \quad (92)$$

$$T_{load,out} = T_{load,in} - \frac{Cap_{heat}}{\dot{m}_{load}c_{p_{load}}} \quad (93)$$

где су:

$T_{source,in}$ [°C] температура флуида на улазу у топлотну пумпу са стране извора;

$T_{source,out}$ [°C] температура флуида на излазу из топлотне пумпе са стране извора;

$T_{load,in}$ [°C] температура флуида на улазу у топлотну пумпу са стране конзума;

$T_{load,out}$ [°C] температура флуида на излазу из топлотне пумпе са стране конзума;

\dot{m}_{source} [kg/h] масени проток флуида са стране извора;

$c_{p_{source}}$ [kJ/kgK] топлотни капацитет флуида са стране извора;

\dot{m}_{load} [kg/h] масени проток флуида са стране конзума;

$c_{p_{load}}$ [kJ/kgk] Топлотни капацитет флуида са стране конзума.

Коефицијент (COP) хлађења се одређује као [103]:

$$COP = \frac{Cap_{cool}}{\dot{P}_{cool}} \quad (94)$$

где су:

COP [-] коефицијент хлађења (COP) топлотне пумпе;

Cap_{cool} [kJ/h] капацитет хлађења за тренутне услове;

\dot{P}_{cool} [kJ/h] електрична снага потребна за рад топлотне пумпе у режиму хлађења.

Количина топлоте предата топлотном понору се одређује као [103]:

$$\dot{Q}_{rej} = Cap_{cool} + \dot{P}_{cool} \quad (95)$$

где је:

\dot{Q}_{rej} [kJ/h] количина топлоте коју преда радни медијум у режиму хлађења;

\dot{P}_{cool} [kJ/h] електрична снага потребна за рад топлотне пумпе у режиму хлађења;

Cap_{cool} [kJ/h] капацитет хлађења за тренутне услове.

Излазне температуре радних медијума се одређују према [103]:

$$T_{source,out} = T_{source,in} + \frac{\dot{Q}_{rejected}}{\dot{m}_{source}c_{p,source}} \quad (96)$$

$$T_{load,out} = T_{load,in} + \frac{Cap_{cooling}}{\dot{m}_{load}c_{p,load}} \quad (97)$$

где су:

- $T_{source,in}$ [°C] температура флуида на улазу у топлотну пумпу са стране извора;
 $T_{source,out}$ [°C] температура флуида на излазу из топлотне пумпе са стране извора;
 $T_{load,in}$ [°C] температура флуида на улазу у топлотну пумпу са стране конзума;
 $T_{load,out}$ [°C] температура флуида на излазу из топлотне пумпе са стране конзума;
 \dot{m}_{source} [kg/h] масени проток флуида са стране извора;
 $c_{p,source}$ [kJ/kgK] топлотни капацитет флуида са стране извора;
 \dot{m}_{load} [kg/h] масени проток флуида са стране конзума;
 $c_{p,load}$ [kJ/kgK] топлотни капацитет флуида са стране конзума.

4.4.8. Типе 194: Систем фотонапонских колектора

Ова компонента се користи за симулацију фотонапонских система.

Модел фотонапонског система одређује криву јачина струје-напон као функцију амбијенталних услова и података произвођача опреме [103].

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (98)$$

$$a \equiv \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (99)$$

где су:

- I интензитет електричне струје;
 I_L фото електрична струја модула;
 I_o инверзна струја засићења диоде;
 V напон у тачки максималне снаге [V];

- R_s редна отпорност модула [Ω];
 R_{sh} отпорност скретнице модула [Ω];
 a параметар модела;
 N_s број ћелија повезаних редно у оквиру модула;
 T_c температура модула [K];
 n фактор идеалности диоде;
 k - Волманова константа [J/K];
 q - константа наелектрисања електрона;

Референтне вредности ових фактора се дефинишу за стандардне услове (SRC) (1,000 W/m² и 25°C) [103]:

За јачину струје кратког споја $I=I_{sc,ref}$, $V=0$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{I_{sc,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref}R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (100)$$

За јачину струје отвореног кола $I=0$, $V=V_{oc,ref}$

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (101)$$

У тачки највеће снаге $I=I_{mp,ref}$, $V=V_{mp,ref}$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[e^{\frac{V_{mp,ref}+I_{mp,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref}+I_{mp,ref}R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (102)$$

где су:

- $I_{L,ref}$ фото-струја модула при референтним условима;
 $I_{o,ref}$ инверзна струја засићења диоде при референтним условима;
 I_{sc} струја кратког споја;
 $I_{sc,ref}$ струја кратког споја при референтним условима;
 I_{mp} јачина струје у тачки максималне снаге;
 $I_{mp,ref}$ јачина струје у тачки максималне снаге при референтним условима;
 V_{mp} напон [V];

$V_{mp,ref}$ напон у тачки максималне снаге при референтним условима [V];

V_{oc} напон отвореног кола [V];

$V_{oc,ref}$ напон отвореног кола при референтним условима [V];

Извод у тачки највеће снаге једнак је нули [103]:

$$\left. \frac{\partial(IV)}{\partial V} \right|_{mp} = I_{mp} - V_{mp} \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{mp} = 0 \quad (103)$$

где је $\left. \frac{\partial(IV)}{\partial V} \right|_{mp}$ дато као:

$$\left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{mp} = \frac{-\frac{I_0}{a} e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_0 R_s}{a} e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (104)$$

Температурни коефицијент напона отвореног кола је [103]:

$$\mu V_{oc} = \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{I=0} \approx \frac{V_{oc,ref} - V_{oc,T_c}}{T_{ref} - T_c} \quad (105)$$

где је:

$T_{c,ref}$ температура модула при референтним условима [K];

4.4.9. Туре 700: Когао

Ова компонента користи једноставну једначину ефикасности за предвиђање потребне количине енергије за загревање радног медијума до задате температуре, према [103]:

$$\dot{Q}_{need} = \dot{m}_{fluid} c_{pfluid} (T_{set} - T_{in}) \quad (106)$$

где су:

\dot{Q}_{need} [kJ/h] окличина топлоте потребна да загреје радни медијум од његове тренутне температуре до жељене температуре;

c_{pfluid} [kJ/kgK] специфични топлотни капацитет радног медијума;

\dot{m}_{fluid} [kg/h] масени проток радног медијума;

T_{in} [°C] температура радног медијума на улазу у котлоу;
 T_{set} [°C] жељена температура радног медијума.

Излазна температура једнака је задатој температури, док се коефицијент делимичног оптерећења уређаја одређује према [103]:

$$PLR = \frac{\dot{Q}_{need}}{\dot{Q}_{max}} \quad (107)$$

где је \dot{Q}_{max} [kJ/h] Максимална количина топлоте која се може пренети радном медијуму.

Уколико потребна количина енергије за загревање радног медијума до задате температуре превазилази снагу котла, количина енергије предата флуиду (\dot{Q}_{fluid}) једнака је капацитету котла (Q_{max}), док је коефицијент делимичног оптерећења (PLR) једнак јединици, а температура радног медијума на излазу из котла одређује се према једначини [103]:

$$T_{out} = T_{in} - \frac{\dot{Q}_{max}}{\dot{m}_{fluid}c_{pfluid}} \quad (108)$$

Где је T_{out} [°C] Температура радног медијума на излазу из котла.

Енергија горива која је била потребна за загревање радног медијума одређује се према једначини [103]:

$$\dot{Q}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{fluid}}{\eta_{boiler}} \quad (109)$$

Где је \dot{Q}_{fuel} [kJ/h] количина топлоте која се добија сагоревањем горива, а η_{boiler} ефикасност котла.

4.4.10. Туре 909: Адсорпциони чилер

Ова компонента се базира на подацима произвођача опреме, а користи се за одређивање коефицијента хлађења на основу улазне температуре радног медијума (топле воде), температуре воде за хлађење, температуре охлађене воде.

Количина топлоте потребне за рад уређаја је [103]:

$$\dot{Q}_{hw} = \frac{\dot{q}_{chw}}{COP} \quad (110)$$

где је:

\dot{Q}_{chw} [kJ/h] Количина топлоте коју преда топла вода

Количина енергије коју треба предати води за хлађење је [103]:

$$\dot{Q}_{cw} = \dot{Q}_{chw} + \dot{Q}_{hw} + \dot{Q}_{aux} \quad (111)$$

где су:

\dot{Q}_{cw} [kJ/h] количина топлоте коју преда вода за хлађење;

\dot{Q}_{aux} [kJ/h] количина електричне енергије потребна за рад уређаја попут пумпи и контролера.

Температура воде на излазу из чилера је [103]:

$$T_{cw,out} = T_{cw,in} - \frac{\dot{Q}_{cw}}{\dot{m}_{cw}c_{p,cw}} \quad (112)$$

$$T_{hw,out} = T_{hw,in} - \frac{\dot{Q}_{hw}}{\dot{m}_{hw}c_{p,hw}} \quad (113)$$

Где су:

$T_{cw,in}$ [°C] температура воде за хлађење на улазу;

$T_{cw,out}$ [°C] температура воде за хлађење на излазу;

$T_{hw,out}$ [°C] температура топле воде на улазу;

$T_{hw,in}$ [°C] температура топле воде на излазу.

\dot{m}_{cw} [kg/h] масени проток воде за хлађење;

\dot{m}_{hw} [kg/h] масени проток топле воде;

$c_{p,cw}$ [kJ/kgK] специфични топлотни капацитет расхладне воде;

$c_{p,hw}$ [kJ/kgK] специфични топлотни капацитет топле воде.

Остварени коефицијент хлађења се одређује према [103]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{chw}}{\dot{Q}_{aux} + \dot{Q}_{hw}} \quad (114)$$

4.4.11. Type 655: Ваздухом хлађени чилер

Ова компонента се заснива на подацима произвођача опреме за предвиђање понашања компресорског чилера са ваздушним хлађењем. Номинални коефицијент (COP) хлађења чилера се одређује према [103]:

$$COP_{nom} = COP_{rated} \cdot COP_{ratio} \quad (115)$$

где су:

COP_{nom} [-] номинални коефицијент хлађења за тренутне услове;

COP_{rated} [-] одређени коефицијент хлађења за тренутне услове;

COP_{ratio} [-] однос коефицијента хлађења за тренутне услове и одређеног коефицијента хлађења.

Оптерећење чилера се одређује као [103]:

$$\dot{Q}_{load} = \dot{m} \cdot C_p (T_{chw,in} - T_{chw,set}) \quad (116)$$

где су:

\dot{Q}_{load} [kJ/h] тренутно оптерећење чилера;

C_p [kJ/kgK] специфичан топлотни капацитет расхладног флуида;

$T_{chw,set}$ [°C] жељена излазна температура расхладног флуида;

$T_{chw,in}$ [°C] жељена излазна температура расхладног флуида.

PLR (коефицијент делимичног оптерећења) стога је [103]:

$$PLR = \frac{\dot{Q}_{load}}{Capacity} \quad (117)$$

где је:

$Capacity$ [kJ/h] Капацитет чилера на тренутним условима;

Ангажована електрична снага уређаја је [103]:

$$P = \frac{Capacity}{COP_{nom}} FFLP \quad (118)$$

где је :

P [kJ/h] механички рад потребан за рад чилера;

$FFFLP$ [0,1] удео максималног оптерећења чилера.

Излазна температура охлађеног флуида је [103]:

$$T_{chw,out} = T_{chw,in} - \frac{\dot{Q}_{met}}{\dot{m}c_p} \quad (119).$$

Где је:

$T_{chw,out}$ [°C] Температура расхладног флуида на излазу;

\dot{m} [kg/h] Масени проток расхладног флуида;

\dot{Q}_{met} [kJ/h] Топлотно оптерећење конзума подмирено чилером.

4.5. Валидација модела мерењем изабраних величина на реалном објекту

Након извршеног моделирања врши се нумеричка симулација применом изабраног софтвера. У оквиру овог рада се за нумеричке симулације користи библиотека постојећих модела компонената из самог софтвера. Може се сматрати да су ови математички модели општег карактера. Из тог разлога, како би се обезбедио квалитет резултата нумеричке симулације, потребно је дефинисати вредности параметара, улазних и излазних променљивих величина примењених математичких модела из библиотеке софтвера. Параметри симулације, улазне и излазне променљиве које се односе на снагу и капацитет појединих примењених модула дефинисани су на основу података прикупљених о систему потрошње и производње енергије. Параметри који дефинишу специфично понашање појединих полигенерационих модула дефинишу се на основу података произвођача опреме или података о мерењу понашања опреме из литературе.

Поред ових параметара, потребно је дефинисати радне параметре система, попут масених протока и температурних нивоа. Код симулација применом софтвера TRNSYS, максимални масени проток радног медијума у одговарајућем делу циркулационог круга моделираног система дефинише се вредношћу номиналног протока модела пумпе или вентилатора. Вредности номиналних протока најмеродавније се могу дефинисати прикупљањем података на основу извршених мерења, уколико се ради о нумеричкој симулацији система за потребе реалног објекта. Мерења протока на реалним системима врше се у току рада система у типичним експлоатационим условима. За мерење протока на

реалним објектима у функцији, како се не би пореметио рад система, могу се користити неинванзивне методе са задовољавајућим резултатима, како се не би пореметио редован рад система. Једна од могућности је примена ултразвучног мерача протока, што је примењено у овом раду (поглавље 5.2.3). Проток ваздуха код система са ваздушним грејањем, може се одредити помоћу уређаја за мерење брзине или протока ваздуха на местима довода ваздуха у зону и одсиса ваздуха из зоне објекта која се симулира. Како код методе симулирања примењене у овом раду, запремина ваздуха симулиране зоне одговара једној нодалној тачки (одговара једној контролној запремини), узима се средња вредност измереног протока ваздуха уколико у зони постоји више доводних и одсисних места.

Поред одређивања протока радних медијума у систему, за добијање валидних резултата потребно је одредити и температурне нивое у одговарајућим тачкама система. Температуре радног медијума такође се одређују мерењем, неинванзивним методама за реалне објекте са задовољавајућом тачношћу за потребе анализе која се спроводи. Мерење температурног нивоа радног флуида у затвореном систему, може се одредити читавањем са постојећих термометара у систему, или мерењем температуре површине неизолованих цеви код система реалних објеката како се не би реметио њихов рад.

Код објеката посебне намене, анализа физичког модела и утицајних фактора на потрошњу енергије може указати на потребу за одређивањем додатних величина (поглавље 5.1.2) и формирања сопствених математичких модела који нису део стандардне библиотеке модела изабраног софтвера. У том случају, потребно је извршити додатна мерења при чему се опрема и метода мерења одређује у зависности од проблема. Верификација резултата добијених формираном математичким моделом може се вршити поређењем са измереним или експерименталним резултатима из литературе, али је пожељно извршити мерења на анализираном објекту. Поређењем мерених вредности са рачунски добијеним резултатима применом математичког модела врши се валидација формираног модела. При формирању модела потребно је водити рачуна о избору независно и зависно променљивих, тако да је могућа интеракција модела са остатком система формираног помоћу компонената из библиотеке софтвера, и о величинама чије је мерење могуће на реалном објекту.

За валидацију модела тренутног понашања анализираног објекта и његових енергетских потреба, могуће је користити измерене и симулиране податке о годишњој потрошњи

енергије (грејање, хлађење, електрична енергија). Како симулације применом софтвера TRNSYS подразумевају употребу статистичких осредњених часовних климатских података, код поређења мерене годишње потрошње енергије за грејање и хлађење са симулираним подацима, може се очекивати мање неслагање јер су из симулације изузете екстремне вредности које се могу јавити у току године. Додатна валидација резултата врши се поређењем резултата симулације са вредностима мерених величина на реалном објекту (попут мерених температура у одабраним тачкама конзума), са симулираним вредностима тих величина у истим тачкама симулираног система добијених за исте или сличне услове. Валидација резултата симулације на основу мерења на реалном објекту поређењем резултата дневне симуације са истим, мереним, условима приказана је у поглављу 5.1. Валидација резултата симулације на основу измерених резултата симулације у сличним условима приказана је на примеру реалног објекта у поглављу 5.2. Овде треба нагласити да се други приступ валидације (примењен у поглављу 5.2.) може користити за брже долажење до резултата, захтева мању припрему и употребу једноставније мобилне опреме.

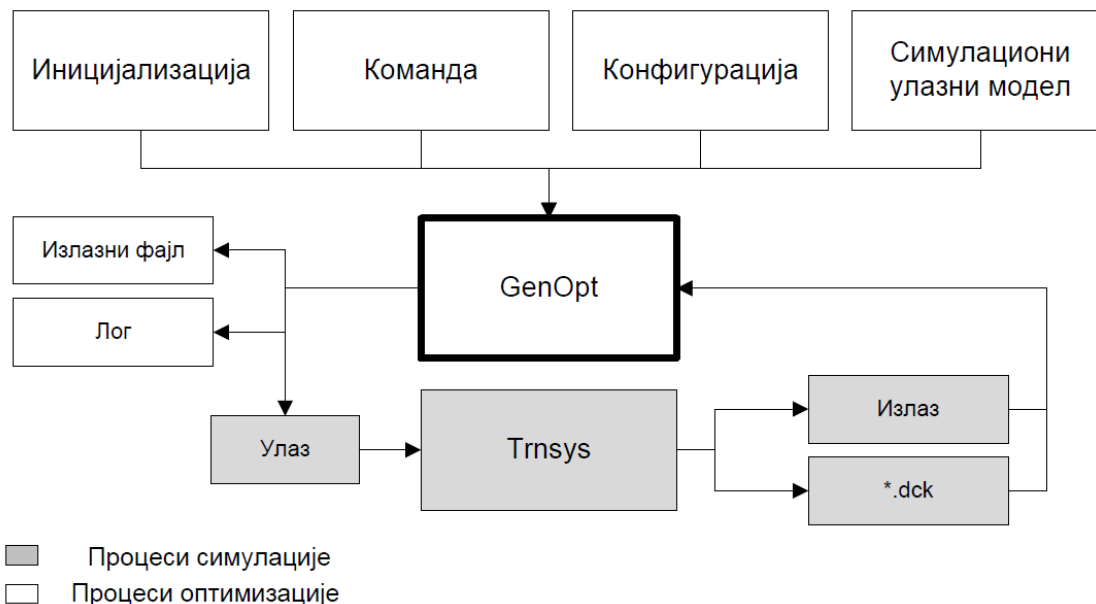
4.6. Примењене методе оптимизације полигенерационих система

У овом раду коришћен је Genopt [146] софтвер за оптимизацију упарен са TRNSYS софтвером за симулацију годишњег понашања полигенерационих система у спрези са конзумом. Излазне вредности одабраних променљивих из TRNSYS динамичких симулација коришћене су као улазне оптимизационе променљиве процеса оптимизације. За потребе оптимизације коришћени су GenOpt алгоритми [146] који се користе за одређивање минимума функције циља.

GenOpt је генерички оптимизациони програм, развијан за потребе генеричке оптимизације. GenOpt је предвиђен за решавање сложених инжењерских проблема, са већим бројем независно променљивих, чија се оптимизација може вршити само нумеричком симулацијом [142]. Код оваквих проблема, срачунавање вредности функције циља је нумерички веома „скупо“, док изводи функције нису доступни нити је познато да ли постоје [142]

Функција програма је проналажење вредности параметара за које функција циља има минималну вредност, што може да буде годишња потрошња енергије, вршно електрично оптерећење и тд. Срачунавање функције циља врши се помоћу екстерног симулационог

програма. У овом раду се за формирање екстерног симулационог модела користи TRNSYS софтвер, али је могуће користити и друге софтвере. GenOpt такође може да се користи за одређивање непознатих параметара у процесу „фитовања“ података [146].



Слика 36. Интеракција TRNSYS – GenOpt

GenOpt има отворени интерфејс, како са стране екстерног симулационог програма – TRNSYS софтвера, тако и са стране оптимизационог алгоритма. Размена података између GenOpt -а и TRNSYS софтвера се врши помоћу текстуалних фајлова (слика 36) [146]. За вршење оптимизације, GenOpt, који се заснива на употреби GenOpt улазних фајлова, аутоматски генерише нове улазне *.dck фајлове за TRNSYS симулациони програм. У току овог процеса, GenOpt додељује нумеричке вредности изабраним оптимизационим параметрима, уместо њиховог назива дефинисаног у улазном симулационом фајлу [146].

Формирање улазног симулационог фајла за симулацију термичког понашања зграде захтева доста времена [146]. Оптимизација термичких карактеристика зграде или система грејања и климатизације се састоји у „погађању“ вредности одређених параметара, који би требало да доведу до бољег понашања система у експлоатацији [146].

Математичка оптимизација даје могућност одређивања вредности параметара које дефинишу систем и омогућавају оптималне перформансе система применом нумеричке процедуре [146].

Решавање оптимизационог проблема (одређивањем минимума), сет независно променљивих (које се називају још и оптимизационим параметрима, променљивим или слободно променљивим), се модификује како би се одредио минимум функције, при чему $x \in \mathbb{R}^n$. Нумеричке вредности независно променљивих морају одговарати физички могућим вредностима, те је потребно ограничити домен коме свака од ових вредности припада, чиме проблем оптимизације постаје контурни, а дефинише се условима једнакости или неједнакости. Функција чија се екстремна вредност тражи назива се функцијом циља или трошкова. Код симулације енергетских система, ова вредност је обично годишња потрошња енергије, оперативни трошкови, вршно оптерећење и сл. [146]

Скуп (вектор) независно променљивих за чију вредност се добија минимална вредност функције представља решење или тачку минимума. Минимум функције може бити локални и глобални, а обично није могуће унапред знати да ли је локални минимум истовремено и глобални. Одређивање чак и локалног минимума представља побољшање система, у односу на почетне вредности x [146].

За решавање оптимизационог проблема, покреће се оптимизациони алгоритам са почетним нумеричким вредностима независно променљивих, које припадају домену.

Оптимизациони проблем се у општем облику може представити као $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, где је X контурни проблем (низ ограничења), а f функција циља, при чему X садржи нумеричке вредности независно променљивих којима се дефинишу све разматране опције оптимизационог проблема, а нумеричка вредност функције циља f представља меру перформанси система [146].

GenOpt оптимизација врши претрагу решења оптимизационог проблема као [147]:

$$\min_{x \in X} f(x) \quad (120)$$

Овакав проблем се најчешће решава итеративно, при чему се формирају бесконачни низови, прогресивно бољих апроксимација „решења“, тј. тачке која задовољава услове оптимизације. У случају да је $X \subset \mathbb{R}^n$, при чему неко $n \in \mathbb{N}$, и X или f нису конвексни, не постоји тест глобалне оптимизације, те се са сигурношћу може пронаћи само тачка која задовољава локалне критеријуме оптимизације [146]. Тест оптимизације (постојања

глобалног оптималног решења) се обично заснива на претпоставци о диференцијабилности функције циља. Последица овога је да оптимизациони алгоритам не мора да обезбеди решење, или може да укаже на локални оптимум, у случају да функција циља није диференцијабилна и независно променљиве нису непрекидне [146].

GenOpt може да се користи за решавање проблема са непрекидним, дискретним и непрекидним и дискретним независно променљивама (оптимизационим променљивама).

4.6.1. Класификација GenOpt оптимизационих проблема

Класификација оптимизационих проблема је извршена према врсти оптимизационих променљивих, и то на проблеме код којих су оптимизационе променљиве параметри непрекидне променљиве, дискретне променљиве, или комбинација непрекидних и дискретних променљивих [146]. Поред тога, може се направити и дистинкција на проблеме са условима неједнакости и без услова неједнакости.

4.6.2. Проблеми са непрекидним оптимизационим променљивама

Према литератури [146], GenOpt контурни проблеми независних непрекидних променљивих имају следећу нотацију:

$$X \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \mid l^i \leq x^i \leq u^i, i \in \{1, \dots, n\}\} \quad (121)$$

где је: $-\infty \leq l^i < u^i \leq \infty$ за $i \in \{1, \dots, n\}$.

Ако је функција $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ непрекидна диференцијабилна функција циља, оптимизациони проблеми са непрекидним оптимизационим променљивама представљени су као [146]:

$$P_c \quad \min_{x \in X} f(x) \quad (122)$$

4.6.3. Проблеми са дискретизованим променљивама

У случају када оптимизационе променљиве могу узимати само одређене дискретне вредности дефинисане оптимизационим проблемом, $X_d \subset \mathbb{Z}^{n_d}$ означава скуп ограничења са коначним бројем целобројних вредности различитих од нуле за сваку променљиву.

У том случају, проблем се своди на проблем целобројног програмирања и означава се као [146]:

$$P_d \quad \min_{x \in X_d} f(x) \quad (123)$$

4.6.4. Проблеми са континуалним и дискретним променљивама

За непрекидне и дискретне независне променљиве, користи се следећа нотација [146]

$$X \triangleq X_c \times X_d \quad (124)$$

$$X_c \triangleq \{x \in \mathbb{R}^{n_c} \mid l^i \leq x^i \leq u^i, i \in \{1, \dots, n_c\}\} \quad (125)$$

где су граничне вредности континуалне независно променљиве дате као $-\infty \leq l^i < u^i \leq \infty$ за $i \in \{1, \dots, n_c\}$ и ограничен скуп $X_d \subset \mathbb{Z}^{n_d}$, док се за дискретизовану променљиву дефинише коначан скуп при дефинисању оптимизационог проблема, из скупа целих бројева без нуле за сваку променљиву. Оптимизациони проблем за мешовите проблеме непрекидних и дискретизованих променљивих представљен је као [146]:

$$P_{cd} \quad \min_{x \in X} f(x) \quad (126)$$

где $x \triangleq (x_c, x_d) \in \mathbb{R}^{n_c} \times \mathbb{Z}^{n_d}$, $f: \mathbb{R}^{n_c} \times \mathbb{Z}^{n_d} \rightarrow \mathbb{R}$ и X је као у $(X \triangleq X_c \times X_d$

(124).

Када се додају услови неједнакости за зависно променљиве изразу (122) добијамо [146]:

$$P_{cd} \quad \min_{x \in X} f(x) \quad (127)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (4.7b) \quad (128)$$

где је x дефинисано као у једначини (122), $f, g: \mathbb{R}^{n_c} \times \mathbb{Z}^{n_d} \rightarrow \mathbb{R}^m$, за неко $m \in \mathbb{N}$, при чему по претпоставци постоји $x^* \in X$ такво да $g(x^*) \leq 0$

У овом раду, коришћени су следећи GenOpt алгоритми:

1. Алгоритам опште шаблонске претраге са претрагом координата (GPS);
2. Хук Џивс (Hooke Jeeves) (HJ);

3. Алгоритам ројева честица (PSO);
4. Хибридни (PSO-GPS) - комбинована општа шаблонска претрага и оптимизација методом ројева честица.

У раду је извршено поређење добијених резултата оптимизације и брзина конвергенције добијених применом наведених GenOpt алгоритама на примеру реалних објеката. На основу поређења резултата, може се закључити да тестирани алгоритми могу да обезбеде задовољавајућа решења. Алгоритми GPS и НЈ знатно брже конвергирају, при чему НЈ уз приближно исту брзину конвергенције може да да незнатно квалитетније резултате. Хибридни PSO-GPS алгоритам се може сматрати најпоузданијим за добијање глобалне оптималне тачке у задатом домену, уз најспорију конвергенцију. Треба напоменути, да се за брже добијање задовољавајућих резултата може користити НЈ алгоритам. У том случају, потребно је посветити пажњу избору корака за сваки од изабраних параметара оптимизације, тако да корак буде довољно велики да се осигура добијање решења блиског глобалној оптималној тачки, али не превелики тако да не утиче превише на прецизност резултата.

4.6.5. Општа шаблонска претрага (GPS)

Алгоритам опште шаблонске претраге (Generalized Pattern Search (GPS)) представља оптимизациони алгоритам решавања оптимизационог проблема за непрекидне или дискретизоване променљиве [146]. Под претпоставком да је функција циља непрекидно диференцијабилна, све тачке претраге генерисане применом овог алгоритма су стационарне.

Овај алгоритам врши претрагу тако што формира мрежу претраге у задатом просторном домену, по којој врши претрагу на основу задатих правила. Уколико претрага не покаже смањење вредности функције циља у околини тачке тренутне итеративне претраге, врши се редукција растојања између тачака формиране мреже и процес претраге се понавља. Детаљна математичка репрезентација оптимизационог проблема опште шаблонске претраге третираних и одговарајућег GenOpt оптимизационог алгоритма представљени су у литератури [146], док ће у наставку текста бити представљени најважнији аспекти примењеног алгоритма.

У овом раду примењен је алгоритам опште шаблонске претраге координата са адаптивном функцијом процене тачности применом GPS алгоритма. Матрица претраге се може дефинисати као [146]:

$$D \triangleq [+s^1 e_1, -s^1 e_1, \dots, +s^n e_n, -s^n e_n] \quad (129)$$

где је $s_i \in \mathbb{R}, i \in \{1, \dots, n\}$ фактор скалирања сваког од оптимизационих параметара, који алгоритам одређује за сваки параметар за сваки оптимизациони корак.

Почетна вредност експонента величине мреже $s_0 \in \mathbb{N}$ задаје се као почетни параметар оптимизационог проблема, док се задати прираштај експонента величине мреже t_k примењује за итерације код којих нема редукције вредности функције циља. Вредност прираштаја експонента величине мреже се такође задаје као почетни параметар оптимизационог проблема. Код ове имплементације оптимизационог алгоритма нема глобалне претраге, већ се врши локална претрага мреже [146]. Максимални број редукција корака мрежа се такође задаје као почетни параметар оптимизационог проблема.

4.6.6. Хук Џивс оптимизациони алгоритам (НЈ)

Хук Џивс (Hooke Jeeves) алгоритам [146] представља оптимизациони алгоритам базиран на GPS методи, који се састоји од почетне претраге (I), основне итерације (II) и редукције оптимизационог корака (III) [146]. Операције (I) и (II) користе такозване методе претраге за добијање локалне информације о смеру опадања функције.

Нека је $\Delta x^i \in R$ величина корака i -тог независног параметра, а $e_i \in R^n$ јединични вектор дуж i -те координате. За познату почетну тачку x_r и вредност функције у тој тачки $f_p \triangleq f(x_r)$, постоји низ ортогоналних корака претраге. Нека је за добијање овог низа $i = 0$, тада можемо доделити вредност [146]:

$$f_p \leftarrow f_r, \quad (130)$$

или, у супротном:

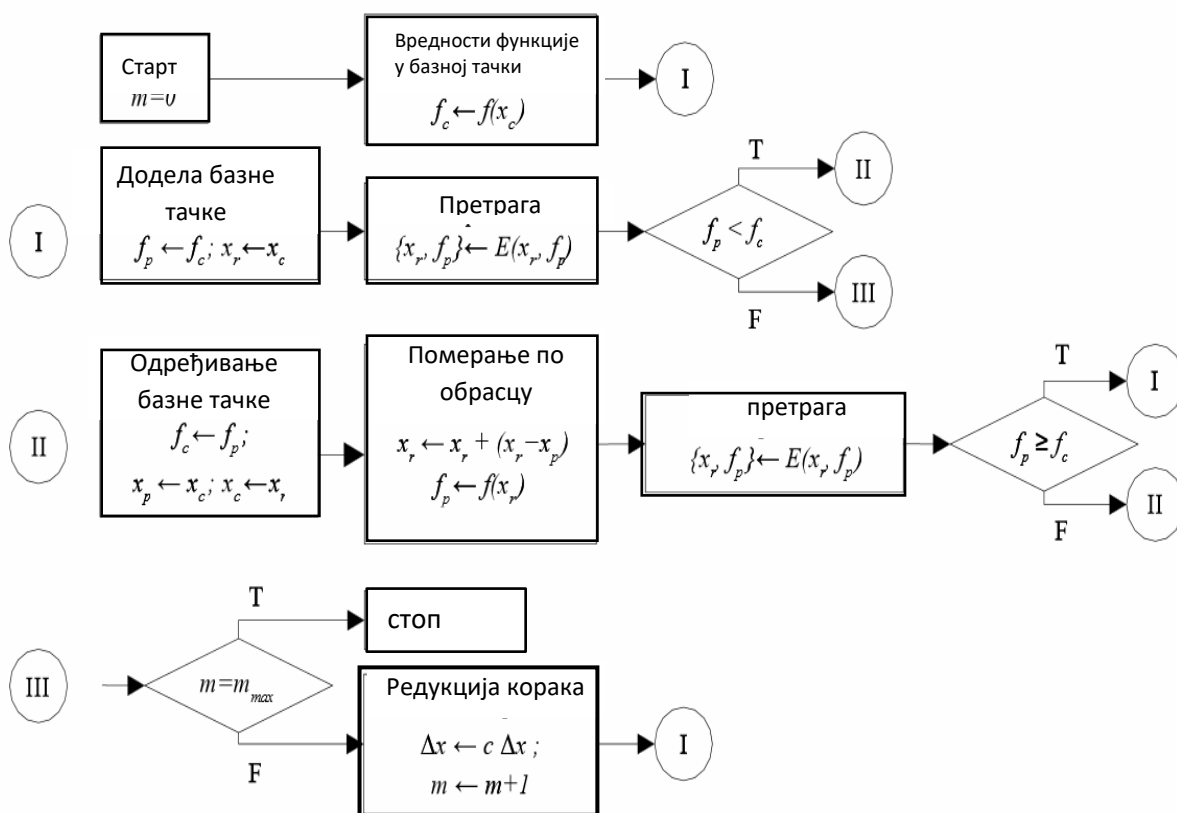
$$\Delta x^i \leftarrow -\Delta x^i \quad (131)$$

$$x_p \leftarrow x_p - 2\Delta x^i e_i \quad (132)$$

врши се процена $f(x_r)$ и додељује се $f_r \leftarrow f(x_r)$. Уколико је ова претрага довела до смањења вредности функције циља, тада се додељује $f_p \leftarrow f_r$ [146]. Уколико нема смањење вредности функције циља, врши се ресетовање резултујуће базне тачке, доделом [146]:

$$x_r \leftarrow x_r - \Delta x^i e_i, \quad (133)$$

тако да нема промене резултујуће базне тачке претрагом у правцу e_i .



Слика 37. Шематски приказ Хук Џивс оптимизационог алгоритма [146]: (I) почетна претрага, (II) основна претрага, (III) редукција корака претраге.

На овај начин, уколико је било који од корака претраге био успешан, долази се до нове базне тачке x_r , и нове вредности функције у тој тачки $f_p = f(x_r)$ [146]. Употребом нове базне тачке x_r описани поступак се наставља до следеће базне тачке у наредном координатном правцу (тј. дуж e_i), све док се не заврши претрага дуж свих координатних вектора $e_i, i \in \{1, \dots, n\}$ [146].

На крају n -тог корака претраге, долази се до нове резултујуће базне тачке x_r ако и само ако је макар један од корака претраге довео до смањења вредности функције циља.

Хук Џивс алгоритам, укључујући и фазе почетне итерације тј. почетне претраге (I), основне претраге (II) и редукција корака претраге (III), приказани су на слици 37 [146].

4.6.7. Оптимизација алгоритмом ројева честица (Particle Swarm Optimization – PSO)

PSO алгоритми су пробабилистички алгоритми засновани на популацијама (еволутивни), којима се решава оптимизациони проблем P_c , где је функција циља непрекидна $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, а применом одговарајућих репрезентација овог GenOpt алгоритма, могуће је решавати и проблеме дискретних независно променљивих P_d и комбиноване проблеме непрекидних и дискретних оптимизационих променљивих P_{cd} [147].

PSO алгоритми користе сетове потенцијалних решења оптимизационог проблема, при чему се свако од потенцијалних решења назива *честицом*, док се један сет потенцијалних решења сваке од итерација назива *популацијом*. PSO алгоритми су општи оптимизациони алгоритми и не захтевају нити врше апроксимацију градијента функције циља [146]. Прва генерација се обично добија након иницијализације оптимизационог процеса као сет насумично генерисаних вредности распрострањених униформно у домену дефинисаним оптимизационим проблемом. Релација добијања нових честица, која је моделирана на основу социјалног понашања чланова јата птица или риба, одређује локацију сваке од честица наредне генерације.

4.6.8. PSO за оптимизационе проблеме са непрекидним променљивама

Ако $k \in \mathbb{N}$ означава број генерације, а $n_p \in \mathbb{N}$ означава број честица сваке генерације, $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$, $i \in \{1, \dots, n_p\}$ означава i – ту честицу k – те генерације, чија је брзина $v_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$, а $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+$ и $\rho_1(k), \rho_2(k) \sim U(0,1)$ су бројеви униформно распоређени између 0 и 1; тада је једначина доделе нових вредности за свако $i \in \{1, \dots, n_p\}$ и свако $k \in \mathbb{N}$ [147]:

$$\begin{aligned} v_i(k+1) &= v_i(k) + c_1 \rho_1(k) (p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 \rho_2(k) (p_{g,i}(k) - x_i(k)), \\ x_i(k+1) &= x_i(k) + v_i(k+1) \end{aligned} \quad (134)$$

где је $v_i(0) \triangleq 0$ и

$$p_{l,i}(k) \triangleq \operatorname{argmin}_{x \in \{x_i(j)\}_{j=0}^k} f(x) \quad (135)$$

$$p_{g,i}(k) \triangleq \underset{x \in \{x_i(j)\}_{j=0}^k\}_{i=1}^{n_p}}{\operatorname{argmin}} f(x) \quad (136)$$

Према томе, $p_{l,i}(k)$ је локација која за i – ту честицу тежи ка најнижој вредности функције циља за све генерације, а $p_{g,i}(k)$ је локација најбоље честице из свих генерација. c_1, c_2 су фактори убрзања [147].

Минимум функције на основу претходних једначина не мора да буде изабран на основу свих тачака популације. Сет тачака из чијег скупа се бира минимум се дефинише на основу топологије околине, која се код PSO методе обично дефинише на основу индекса честице а не њене локације. Код примењене методе топологија величине $l \in \mathbb{N}, l > 1$, околина честице $i \in \{1, \dots, n_p\}$ садржи све честице чији је индекс дефинисан сетом [147]:

$$\mathcal{N}_i \triangleq \{1, \dots, n_p\} \quad (137)$$

где се подразумева могућност мешања индекса у околини, тј. врши се замена -1 са $n_p - 1$, замена -2 са $n_p - 2$ и сл.

4.6.9. Хибридна метода- (GPS-PSO) Комбинована општа шаблонска претрага и оптимизација методом ројева честица

Ова општа метода оптимизације се користи за решавање проблема минимума функције циља P_c , као и проблема P_{cd} , који су раније дефинисани. Овај алгоритам почиње покретањем PSO алгоритма за број генерација који се дефинише као почетни параметар оптимизације, након чега се покреће раније описани НЈ алгоритам, који користи непрекидне независно променљиве честице за коју је вредност функције циља најнижа [147]. Уколико оптимизациони проблем има непрекидне и дискретизоване променљиве, дискретне вредности независно променљивих ће за НЈ алгоритам бити фиксирани на вредности честице за коју је вредност функције циља најнижа [147].

Како PSO алгоритам представља општи оптимизациони алгоритам, у поређењу са НЈ алгоритмом, мања је вероватноћа одређивања локалног минимума као решења оптимизационог проблема. Хибридни алгоритам комбинује општи карактер PSO алгоритма са доказивом конвергенцијом НЈ алгоритма [147]. У случају дисконтинуитета функције

циља, у поређењу са НЈ алгоритмом, мање је вероватно да се претрага хибридног алгоритма задржи у области дисконтинуитета далеко од најбољег решења [147].

5. ОПТИМИЗАЦИЈА КОНФИГУРАЦИЈЕ И КАПАЦИТЕТА ПОЛИГЕНЕРАЦИОНИХ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ ИЗАБРАНИХ РЕАЛНИХ ОБЈЕКТА

За анализу примене предложене методе оптимизације полигенерационих система заснованих на ОИЕ, изабрани су:

- 1) Јавни објекат, затворени пливачки базени Спортско рекреативног центра (СРЦ) „Дубочица“ у Лесковцу и
- 2) Пољопривредни објекат, интегрисана фарма свиња „Халово“, код Зајечара, део Делта аграр Групе.

5.1. Оптимизација полигенерационог система за потребе јавног објекта затворених пливачких базена

Зграде затворених пливачких базена представљају значајне потрошаче енергије. Код оваквих објеката, хала са пливачким базеном је идентификована као највећи потрошач енергије [148], где се користи енергија за одржавање прописаних услова термичког комфора амбијенталног ваздуха и базенске воде. Анализа потрошње енергије у зградама затворених пливачких базена, показала је да се 45 % енергије искористи за потребе базенске хале, 33 % за потребе грејања базенске воде, 10 % за потребе грејања и вентилације остатка зграде, 9% за расвету и рад остале опреме и 3 % за припрему санитарне топле воде (STV), али детаљна анализа и енергетско билансирање топлотних губитака базенске хале и базенске воде нису разматрани [148]. Губици енергије везани за базенску халу и воду имају највећи удео и до 60 % у енергетском билансу зграде затворених пливачких базена [148, 149, 150], те је у овом раду извршено математичко моделирање енергетског биланса ових ентитета.

У халама затворених пливачких базена, температура ваздуха и влажност се одржавају у оквиру дефинисаних граница, приказаним у овом раду. Загревање базенске воде и амбијенталног ваздуха хале помоћу система за грејање, вентилацију и/или климатизацију поспешује ефекте исхлапљивања а самим тим и повећање релативне влажности ваздуха, што за последицу има повећану потрошњу енергије зграде. Пројектовање система грејања, вентилације и климатизације за потребе одржавања параметара базенске воде и ваздуха

хале на оптималном нивоу уз ефикасан рад је од посебног значаја. У овом раду је извршена варијација жељених вредности температуре базенске воде и ваздуха базенске хале, како би се методом нумеричких симулација одредио утицај ових параметара на губитке енергије и дошло до оптималних вредности ових параметара. За анализирање проблема енергетске ефикасности базена, полазна тачка у литератури је најчешће енергетско билансирање [149, 151, 152, 153], где представљени резултати не пружају информације о утицају жељене температуре воде и ваздуха на резултате билансирања. Највећи утицај на губитке топлоте базенске хале затворених пливачких базена има исхлапљивање са слободне водене површине, али је прецизно моделирање ове појаве врло комплексан задатак [154].

Услед сличности у примени профила потрошње енергије за грејање базена и доступности соларне енергије у току године, употреба соларних система за загревање базенске воде се користи као успешна мера енергетске ефикасности већ деценијама. Услед релативно ниских температура извора потребних за загревање базенске воде, употреба соларне енергије се сматрала посебно значајном за загревање отворених пливачких базена. Czarnеcki [155] је предложио метод за загревање отворених пливачких базена применом транспарентне пластичне покривке, која је повећавала соларне добитке базена истовремено смањујући губитке услед исхлапљивања. Szeicz and McMonagle [156] су представили енергетски биланс урбаног пливачког базена 1982, и констатовали да употреба соларних колектора и покривки базена представљају најефективнија решења по питању енергетске ефикасности базена. Анализа примене апсорпционог система и компресорске топлотне пумпе у затвореним пливачким базенима представљена је у [157], где је показано да се 40 - 50 % укупних енергетских потреба доводи у везу са производњом топле воде. Nahne and Kübler [150] су извршили симулацију отвореног пливачког базена применом TRNSYS софтвера, при чему су закључили да се потрошња природног гаса за грејање може смањити за око 40 % применом незастакљених соларних колектора, занемаривши потребе загревања санитарне топле воде. У раду [57] је извршена анализа примене равних соларних колектора (STC), за загревање затворених пливачких базена и санитарне топле воде.

Детаљним истраживањем енергетских потреба отворених пливачких базена Централне Европе, дошло се до закључка да је употреба соларне енергије довољна за загревање базенске воде [157, 158]. Губици енергије базенске воде зависе од температурне разлике

између воде и амбијенталног ваздуха изнад површине воденог огледала, влажности ваздуха, брзине струјања ваздуха изнад површине воде, масеног протока и температуре компензацијске свеже воде и дебљине и квалитета изолације базена. Дневни губици топлоте затворених пливачких базена према процени износе $2,5 \text{ kWh/m}^2$ дневно [157, 159, 160], међутим анализа утицајних фактора на губитке топлоте базенске хале и воде базена није била део анализе. Унапређење енергетске ефикасности затворених пливачких базена методом прелиминарног енергетског билансирања указала је на могућности унапређења применом топлотних пумпи [161, 162]. Са друге стране, соларни системи се користе за загревање STV у 80 % инсталираних система широм света [15, 163].

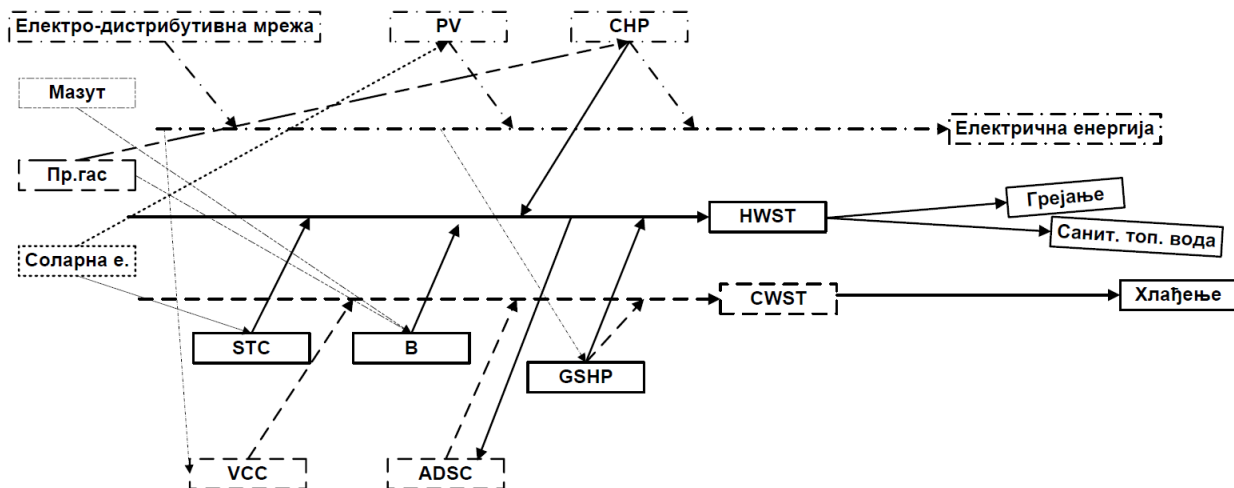
У овом примеру се разматра примена полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена Спортско рекреационог центра „Дубочица“ у Лесковцу. Ефекти примене STC за загревање воде се такође разматрају, у оквиру суперструктуре система. Највише пажње је посвећено истраживању и анализи понашања базенске воде и хале, као највећем потрошачу енергије код овакве врсте зграда, као и утицају радне стратегије грејно-вентилационог система, тј. жељених температура базенске воде и амбијенталног ваздуха у хали. Математички модел пливачког базена је формиран тако да је могућа интеракција са улазним и излазним променљивим TRNSYS Type 56 више-зонског модела зграде и нумеричка симулација понашања спрегнутог модела грејно-вентилационог система у току типичне метеоролошке године. За потребе математичког моделирања и нумеричких симулација извршен је избор корелација исплапљивања [57, 164]. Утицај услова пројектовања и конструкције зграде на понашање соларног система интегрисаног у конструкцију објекта разматран је у литератури [58].

5.1.1. Интеграција суперструктуре полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена

Модел суперструктуре полигенерационог система садржи моделе постојеће опреме, котлова на мазут, али се у току симулације понашања разматраних конфигурација овог система овим уређајима додељује секундарни приоритет – постојећа опрема се ангажује само у случају да опрема са већим приоритетом ангажовања није у могућности да задовољи симулирано оптерећење у датом временском кораку симулације. Највећи приоритет ангажовања у оквиру суперструктуре имају модули који могу да користе обновљиве изворе

енергије (ОИЕ), попут равних застакљених соларних топлотних колектора STC, топлотне пумпе земља-вода (вода-вода) (GSHP) или отпадну топлоту попут адсорпционог чилера (ADSC). Поред тога, претпоставља се и могућност употребе електричних грејача (AUX) постојећег резервоара санитарне топле воде који се тренутно користи за загревање санитарне топле воде (STV), при чему ангажовање ових грејача има најмањи приоритет. Поред тога, претпоставља се употреба когенерационог модула заснованог на употреби мотора са унутрашњим сагоревањем са погоном на природни гас и фотонапонских соларних колектора. Претпостављено је да је зграда затворених пливачких базена повезана на електро-дистрибутивну мрежу, те да има статус повлашћеног произвођача електричне енергије, при чему је могуће остварити добит од продаје локално произведене електричне енергије по условима дефинисаним домаћом регулативом [10, 8]. На основу услова интеграције представљених у поглављу 4.2.1, једначинама (9-17) добија се физички модел суперструктуре полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена (слика 38). На основу овог физичког модела, дефинисана је конфигурација суперструктуре, чије се математичко моделирање, нумеричка симулација и оптимизација по одабраним критеријумима врши помоћу TRNSYS/GenOpt софтвера. Дакле, полигенерациони модули који улазе у састав суперструктуре за потребе затворених пливачких базена су (слика 38):

- Топловодни котао (B),
- Когенерациони модул заснован на мотору са унутрашњим сагоревањем са погоном на природни гас (CHP),
- Топлотна пумпа вода вода (GSHP),
- Компресорски чилери (VCC),
- Адсорпциони чилер (ADSC),
- Соларни топлотни колектори (равни застакљени) (STC),
- Фотонапонски соларни колектори (PV).

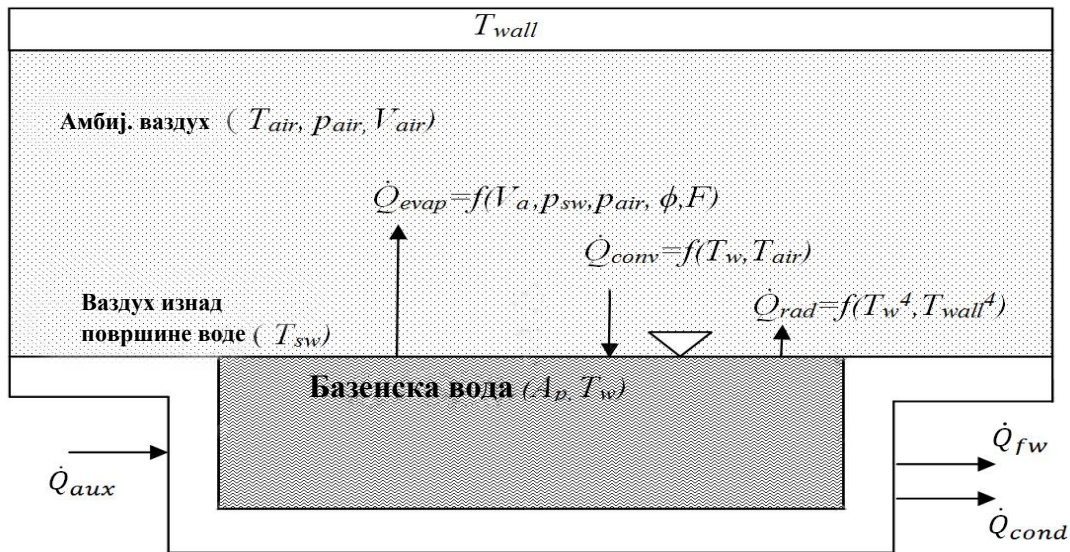


Слика 38. Суперструктура полигенерационог система за потребе зграде затворених пливачких базена

5.1.2. Математичко моделирање затворених пливачких базена

Системи грејања, вентилације и климатизације затворених пливачких базена су пројектовани да обезбеде одговарајуће услове термичког комфора у простору хале базена. Унутрашња температура ваздуха базенске хале се одржава на релативно високом нивоу (24-29 °C), што ствара погодне услове за релативно високе степене исплапљивања са слободне водене површине базена. Размена топлоте затвореног пливачког базена (слика 39) је под утицајем: (1) кондукција кроз зидове базена $\dot{Q}_{cond,w}$; (2) конвекција са водене површине базена \dot{Q}_{conv} ; (3) радијација са површине базена \dot{Q}_{rad} ; (4) исплапљивање са слободне водене површине базена \dot{Q}_E ; (5) губитак топлоте услед дотока компензацијске свеже воде \dot{Q}_{fw} ; (6) количина топлоте за загревање базенске воде \dot{Q}_{aux} .

Кондукција кроз зидове базена се обично сматра занемариво малом, осим у случају када је базен изнад земље или у директном контакту са подземним водама, што се ретко сусреће у пракси [3]. Конвекција са површине базена је функција температуре ваздуха базенске хале и брзине струјања ваздуха изнад површине воде. Пренос топлоте зрачењем са површине базена је од већег значаја код отворених базена [150], иако се јавља и као последица размене топлоте високоталасним зрачењем између површине воде и зидова базенске хале [165]. Према резултатима страних аутора, исплапљивање има најзначајнији утицај на губитке топлоте базена, где је удео ових губитака и до 50-60 % [166].



Слика 39. Физички модел базена и базенске хале [57]

Енергетски биланс отворених пливачких базена је коришћен у литератури [149], [150] за симулацију перформанси различитих система грејања. Енергетски биланс затворених пливачких базена, приказан у овом раду, је моделиран за нумеричке симулације у комбинацији са TYPE 56 више зонским моделом зграде, из библиотеке компонента TRNSYS. Представљени математички модел користи излазне зависно променљиве из TRNSYS модела чиме су дефинисане улазне величине стања ваздуха у сваком временском кораку симулације, као и температуре зидова. Поред тога, представљени модел у току сваког временског корака симулације врши интеракцију, преко својих излазних зависно променљивих, са моделираним системом грејања и вентилације, те узима у обзир и величине стања ваздуха базенске хале.

Модел претпоставља да постоји идеално мешање базенске воде као и да је овај флуид некомп्रेसибилан. Густина воде и коефицијент кондукције се сматрају константним. Енергетски биланс затвореног пливачког модела из литературе [152] узима у обзир губитке услед инфилтрације спољашњег ваздуха у базенској хали као и довод свежег ваздуха, али занемарује прелаз топлоте радијацијом са површине базена, као и количину топлоте потребне за догревање базенске воде услед дотока компензацијске свеже воде.

Промена температуре базенске воде у току времена τ је представљена релацијом:

$$\rho_w c_{pw} V_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{aux} - (\dot{Q}_{fw} + \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) \quad (138)$$

Губици топлоте услед исплапљивања су пропорционални количини исплапеле воде слободне водене површине базена:

$$\dot{Q}_{evap} = A_p \dot{q}_{evap} = A_p \dot{E} r \quad (139)$$

где је \dot{E} проток масе исплапеле воде у посматраном периоду, а r је латентна топлота испаравања.

Транспорт топлоте конвекцијом са слободне водене површине се може представити релацијом:

$$\dot{Q}_{conv} = A_p \dot{q}_{conv} = A_p \alpha (T_w - T_{air}) \quad (140)$$

где је α [$Wm^{-2}K^{-1}$] коефицијент транспорта топлоте конвекцијом, T_w је температура базенске воде, а T_{air} је температура ваздуха у хали базена. Коефицијент транспорта топлоте конвекцијом се може добити као линеарна функција брзине струјања ваздуха у базенској хали [149]:

$$\alpha = 2,8 + 3,0V_{air} \quad (141)$$

где је V_{air} [ms^{-1}] брзина струјања ваздуха изнад слободне водене површине.

Транспорт топлоте радијацијом са слободне површине базена у амбијент код отворених пливачких базена је разматран у литератури [149], [150]. Код затворених пливачких базена, може се узети у обзир размена топлоте радијацијом између слободне водене површине и зидова базенске хале [167], што је описано релацијом:

$$\dot{Q}_{rad} = A_p \dot{q}_{rad} = A_p \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{wall}^4) \quad (142)$$

где је ε [-] просечна емисивност површине, σ је Штефан-Болцманова (Stefan-Boltzmann) константа ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$) а T_{wall} је температура површине зидова.

За моделирање затворених пливачких базена претпостављено је да је ниво воде у базену константан. Исхлапела маса воде и губитак воде у систему за пречишћавање воде се компензују дотоком свеже воде. Количина топлоте потребна за догревање услед дотока компензацијске воде ниже температуре од температуре воде у базену може се описати изразом:

$$\dot{Q}_{fw} = \dot{m}_{fw} c_{pw} (T_w - T_{fw}) \quad (143)$$

За одржавање базенске воде на жељеној температури, потребна је количина топлоте која зависи од укупних губитака топлоте базенске воде, што се остварује применом загрејача. Загревање базенске воде директним соларним зрачењем код отворених пливачких базена се разматра у литератури [150, 167], док се добици топлоте оствариви применом соларних колектора разматрају у литератури [150], а примена топлотних пумпи у [153]. Укупни добици топлоте независно од врсте опреме за загревање базенске воде, су представљени изразом:

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{m}_{aux} c_{pw} (T_w - T_{aux}) \quad (144)$$

где је \dot{m}_{aux} масени проток радног медијума из система за загревање воде, T_{aux} је температура долазне воде из система за загревање базенске воде.

5.1.2.1. Исхлапљивање воде са слободне површине базена

Феномен исхлапљивања воде са слободне водене површине затворених пливачких базена се сматра значајним чиниоцем у енергетском билансу зграда са базенима [168, 169, 170, 171]. У случају да је тотални притисак влажног ваздуха изнад слободне водене површине, који је једнак збиру парцијалног притиска засићене водене паре на датој температури и парцијалног притиска ваздуха, већи од притиска засићења водене паре, долази до појаве исхлапљивања са слободне водене површине. Како се ова појава јавља релативно често код многих техничких система, постоји много корелација за предвиђање количине исхлапеле воде са слободне водене површине у јединици времена у ваздух који мирује као и у ваздух који струји изнад воде [154, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179]. Bowen [174] је добио општу релацију којом одређује размену

топлоте конвекцијом и исплапљивањем са водене површине јединице запремине за три различита случаја, при чему је најпре одредио модел дифузије водене паре са јединичне површине. Количина исплапеле воде у јединици времена са неке површине зависи од врсте струјања ваздуха изнад водене површине (ламинарно или турбулентно), на основу чега је могуће одредити који од могућих механизма је доминантан: слободна конвекција или принудна конвекција. Већина корелација за одређивање количине исплапеле водене паре у току времена је базирана на Далтоновој (Dalton) теорији, али такође постоје и покушаји дефинисања корелација које се заснивају на аналогiji транспорта масе и топлоте [174, 179], када се одређује однос између размене топлоте кондукцијом и исплапљивања. Одређивање корелације којом се дефинише исплапљивање са слободне водене површине је значајно чак и за детаљне нумеричке симулације [175, 177], где је потребно најпре дефинисати количину исплапеле воде у јединици времена и коефицијент исплапљивања. Прву једначину за одређивање количине исплапеле воде са слободне водене површине дао је Далтон (Dalton) [171] 1802. године, када је установљена пропорционалност разлике парцијалних притисака водене паре непосредно изнад граничне површине воде и ваздуха p_{sw} [Pa] и у ваздуху изнад водене површине p_{air} [Pa]:

$$-d\dot{E} = K(p_{sw} - p_{air})dA_{sw} \quad (145)$$

где је dA_{sw} елемент водене површине, $d\dot{E}$ је јединично исплапљивање у јединици времена, а K је коефицијент који зависи од карактеристика струјања ваздуха изнад граничне водене површине. Одређивање коефицијента K може се извршити апроксимацијом према табели 16 [164].

Већина једначина из литературе тежи ка унапређењу Далтонове (Dalton) једначине исплапљивања, и садрже функцију апроксимације коефицијента исплапљивања добијене на основу експеримената [168, 172, 173]. Истраживањем и поређењем математичких релација за одређивање количине исплапеле воде у току времена, Сартори (Sartory) [179] долази до закључка да постоји велико неслагање између резултата добијених релацијама из литературе.

Табела 16. Вредности корелационих коефицијената за одређивање коефицијента K [164]

Аутор	Коефицијент $K = A + BV_a$	Примена
McMilan	$A=0,0360; B=0,250$	Језера
Chernecky	$A=0,05053; B=0,06638$	Пливачки базени
Carrier	$A=0,088403; B=0,001296$	Соларне баре
Hahne and Kübler	$A=0,0850 B=0,0508$	Отворени базени
Rohwer	$A=0,0803; B=0,0583$	Лабораторијски модел
Smith et. Al.	$A=0,0888; B=0,0583$	Пливачки базен
Smith et. Al.	$A=0,0638; B=0,0669$	Отворени базен
Himus and Hinchey	$A=0,1538; B=0,06898$	Општа намена
Lurie and Michailoff	$A=0,109; B=0,0859$	Општа намена

Општи математички облик релација за одређивање количине исплапеле воде

\dot{E} [$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$] са слободне водене површине се може написати као [164]:

$$\dot{E} = C \cdot (A + B \cdot V_a)^n (p_{sw} - \varphi p_{s,air}) / r \quad (146)$$

где су A , B , C и n константе, чија се вредност најчешће одређује експериментално, V_a [m/s] је брзина струјања ваздуха изнад водене површине, r [J/kg] је латентна топлота испаравања воде, φ [-] је релативна влажност ваздуха, а $p_{s,air}$ је парцијални притисак засићења (за температуру ваздуха). Израз у другој загради једначине (145) представља разлику притисака водене паре на температури базенске воде и парцијалног притиска водене паре у ваздуху изнад базенске воде.

Са аспекта енергетске ефикасности базенске хале, исплапљивање са водене површине базена би требало одржавати на релативно ниском нивоу, одржавајући притом услове термичког комфора пливача, базенске воде и амбијенталног ваздуха на жељеном нивоу. Препоруке из приручника за пројектовање опреме за грејање и вентилацију [166] предлажу одржавање температуре ваздуха базенске хале на температури која је 2 - 3 °C виша од температуре базенске воде, што је коришћено за дефинисање стратегије аутоматског управљања моделираним грејно-вентилационим системом и у овом раду.

Струјање ваздуха у базенској хали изазива рад система за грејање и вентилацију, а брзина струјања се обично креће у границама 0,035 - 0,2 m/s [166, 168, 175]. Брзинско поље струјања ваздуха у базенској хали није униформно, већ веома сложено, при чему постоји

промена како интензитета брзине тако и смера струјања, што је могуће видети у резултатима нумеричких симулација (CFD) јавног затвореног пливачког базена [175]. Врста струјања ваздуха изнад површине базена одређује се на основу вредности Рејнолдсовог (Reynolds) броја и Шервудов (Sherwood) број, док струјање ваздуха има јак утицај на феномен исхлапљивања [179]. Према другим резултатима мерења из литературе, могу се очекивати брзине струјања ваздуха у опсегу од 0,035 – 0,5 m/s, са просечном вредношћу од 0,15 m/s [168], што су вредности врло блиске препорукама за пројектанте које наводе брзине у опсегу од 0,05 - 0,15 m/s [166].

Преглед једначина из литературе за одређивање исхлапљивања са слободне водне површине и поређење резултата добијених помоћу ових једначина показало је велику разлику између добијених резултата, те је избор адекватне једначине отежан [179]. Сартори (Sartori) је за потребе наведеног поређења резултата користио вредност брзине струјања ваздуха од 3 m/s, релативну влажност 100 % и 45 %, и температуре воде у опсегу од 10-40°C [179]. Услови дефинисани наведеним вредностима утицајних величина се не подударају са вредностима које се сусрећу код затворених пливачких базена [152, 154, 168, 169, 170] где је: (1) температура базенске воде у опсегу 24 - 29 °C; (2) температура ваздуха виша за 1 - 3 °C од температуре базенске воде; (3) релативна влажност ваздуха се креће од 50 % до 80 %; (4) просечна брзина струјања ваздуха се креће у опсегу 0,05 -0,2 m/s. Према томе, за процену резултата добијених помоћу једначина исхлапљивања из литературе требало би користити експерименталне податке добијене у описаним условима који одговарају затвореним пливачким базенима. Резултати које је добио Асдрубали (Asdrubali) [154] мерењем на умањеном лабораторијском моделу затвореног пливачког базена се добрим делом подударају са вредностима параметра једначина исхлапљивања из литературе, те се као такви могу користити за процену рачунских вредности количине исхлапеле воде применом једначина исхлапљивања за затворене базене без посетилаца [164]. Константе једначине испаравања из једначине (145), су за потребе симулације из рада [57] одабране на основу литературе [164] према резултатима који се најбоље подударају са измереним резултатима Асдрубалија (Asdrubali) [154]. У раду [57] за просечне брзине струјања ваздуха у базенској хали у опсегу 0,05 - 0,17 m/s и релативну влажност 50 - 70 %, су усвојене константе једначине (145) $A=0,0163$, $B=3,1$, $C=4,1$, $n=0$, према [154] и [164].

5.1.2.2. Утицај употребе затворених пливачких базена на исхлапљивање

Активности купача у затвореним пливачким базенима утичу на пораст исхлапљивања код пливачких базена [167, 169, 175]. Постоји више приступа за одређивање разлике у количини исхлапеле воде у току времена код пливачких базена у току њихове употребе. Разлика у количини исхлапеле воде зависи од броја купача, њихове активности, али и стања амбијенталног ваздуха базенске хале, стања базенске воде које дефинише намена базена. Препорука америчког ASHRAE стандарда налаже употребу поправних коефицијената, чија се вредност креће од 0,5 до 1,0 за јавна купалишта, у комбинацији са Каријер-овом (Carrier) једначином исхлапљивања [166] (Табела 16. Вредности корелационих **коефицијената за одређивање коефицијента К**) за одређивање количине исхлапеле воде у јединици времена пливачких базена у експлоатацији.

На феномен исхлапљивања код затворених пливачких базена у периоду њихове употребе утичу следећи фактори: (1) поремећаји површине воденог огледала и формирање таласа које за последицу има повећање водене површине (A_{ww}) са које се одвија исхлапљивање; (2) прскање, преливање и капање проузроковано активностима пливача има за последицу квашење површина око базена, што повећава водену површину (A_{sp}) са које се одвија пренос масе; (3) влажна тела пливача су такође изложена утицају амбијенталног ваздуха, што додатно повећава површину (A_b) са које се одвија пренос масе, при чему је интензитет преноса масе са тела пливача већи јер је температура тела пливача већа од температуре базенске воде; (4) преливање и млазеви воде као последица активности пливача додатно повећавају контактну површину (A_{sy}) преко које долази до преноса масе. Ако се занемари варијација броја пливача у току једног временског корака, тада се количина исхлапеле воде базена у употреби може срачунати множењем специфичне количине исхлапеле воде по јединици базенске површине са коригованом површином базена у употреби (A_{pi}):

$$A_{pi} = A_p + A_{ww} + A_{sp} + A_b + A_{ww} + A_{sy} \quad (147)$$

Ауер (Auer) [167] је представио функцију употребе базена, која узима у обзир време отварања и затварања базена за посетиоце, али овај приступ захтева коришћење вредности површина чија је процена отежана за потребе динамичког моделирања у току целе године,

применом једначине (148). Како би се избегла употреба претпостављених вредности, користи се фактор употребе базена, који је дефинисан према [169]:

$$F = \frac{A_{\max}}{A_p / N} \quad (148)$$

где је N број посетилаца у току једног временског корака, а A_{\max} је површина базена по посетиоцу у периоду највеће посећености базена у току године. Смит са коауторима (Smith et al) [180] је предложио једначину исхлапљивања за пливачке базене у употреби као функцију фактора употребе базена, засновану на измереним вредностима. Басин и Круме (Biasin and Krume) [181] предлажу своју корелацију исхлапљивања за пливачке базене у употреби за вредности фактора употребе базена од 0,1 до 0,7, при чему је на резултате утицала водена пара из дела за туширање. Шах (Shah) [169] је представио свој модел за вредности фактора употребе базена веће од 0,1 као и корекције једначина исхлапљивања базена ван употребе. У овом раду су коришћене просечне месечне вредности фактора употребе базена F за сваки месец у току године, а моделирање годишње промене је вршено помоћу TRNSYS Type 14 модела. Количина исхлапеле воде у току једног временског корака симулације \dot{E} [$\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$] се множи линеарном функцијом фактора употребе базена, чиме се добија количина исхлапеле воде базена у периоду употребе \dot{E}_0 [$\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$] [169]:

$$\dot{E}_0 = \begin{cases} \dot{E}(3,3F + 1); F < 0,1 \\ \dot{E}(1,3F + 1.2); 0,1 \leq F \leq 1 \end{cases} \quad (149)$$

5.1.2.3. Одређивање коефицијента исхлапљивања реалног објекта

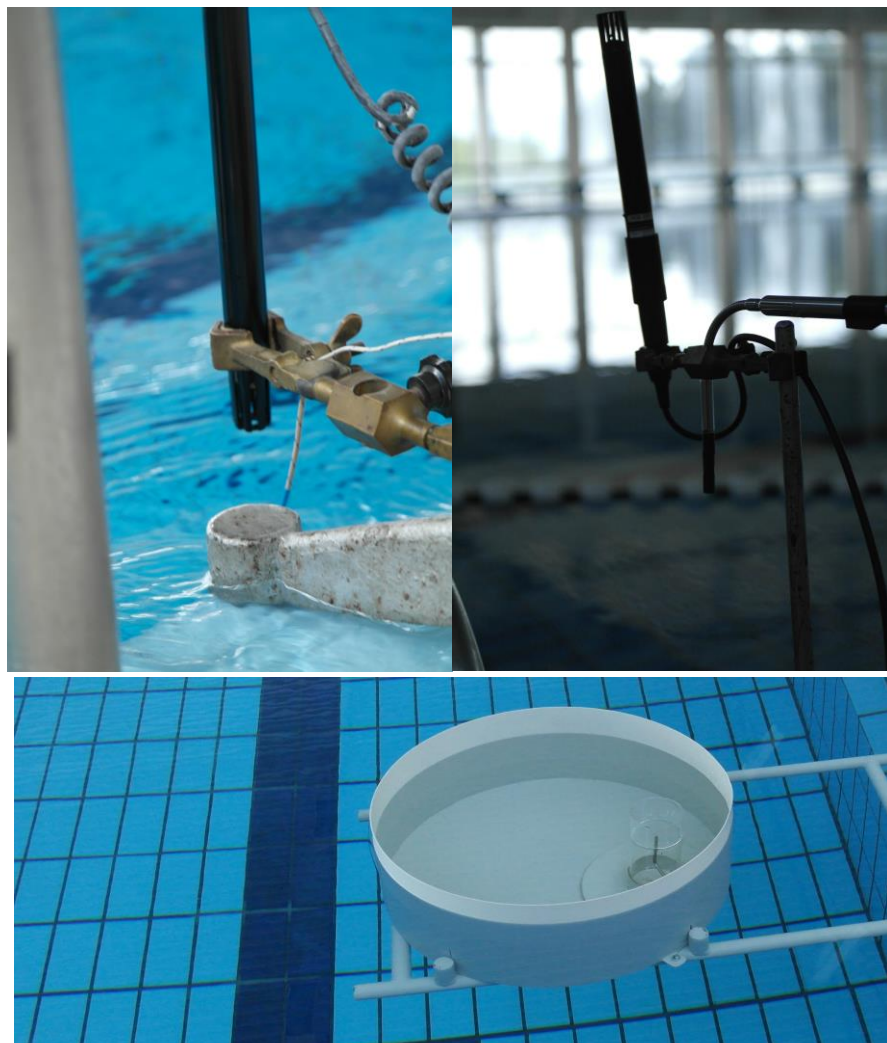
Резултати приказани у овом раду су добијени мерењем брзина струјања ваздуха на 5 тачака дуж границе базена, на 0,65 m изнад нивоа воде у правцу струјања ваздуха из вентилационих канала (слика 40). Просечне брзине струјања ваздуха су у распону од 0,01 m/s, до 0,07 m/s, на супротним крајевима границе базена, и од 0,15 m/s, до 0,34 m/s, на половини границе базена. Температура воде је мерена 1 cm испод нивоа воде помоћу термо пара типа „К“. Релативна влажност и температура ваздуха је мерена 1 cm изнад нивоа воде и 90cm изнад нивоа воде. Стопа испаравања је мерена по сату помоћу посуде за испаравање са иглом, пречника 0,8 m, уроњене у базенску воду на 1,3 m од границе базена. Пречник

посуде за испаравање је изабран тако да буде довољно велик да прикаже колики је утицај комплексног струјања ваздуха изнад површине воде у базенској сали. Испарена вода је мерена са прецизношћу од 1 g по сату.

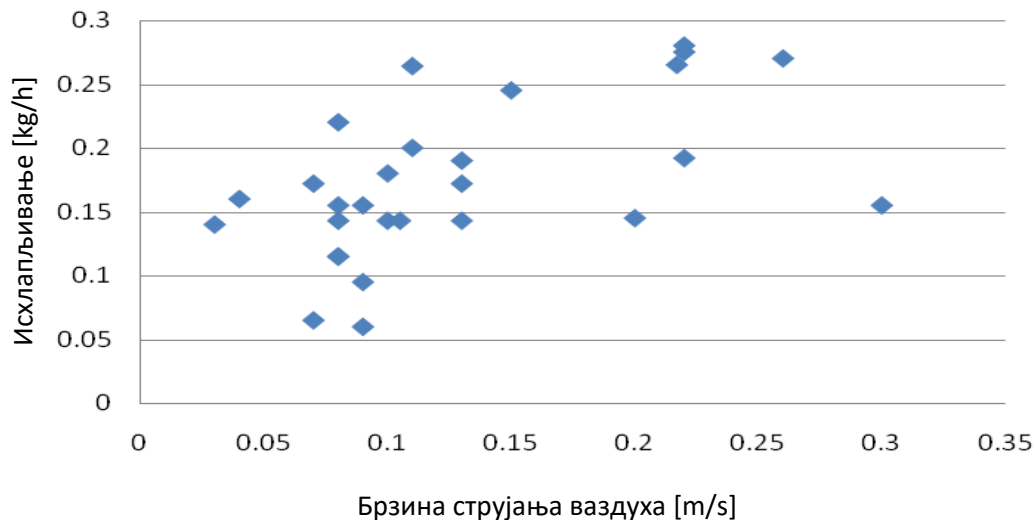
Неки од резултата су одбачани због активности пливача у датом тренутку, који су узроковали продирање воде у посуду за испаравање. Стопа испаравања \dot{E} , као функција брзине струјања ваздуха V_a , је приказана на слици 41.

На слици 41 су приказане измерене стопе испаравања, као функција разлике парцијалних притисака засићене водене паре на температури воде и парцијалног притиска водене паре ваздуха, где су притисци прерачунати у [Pa] према IAPWS-у (Индустријска формулација за термодинамичке карактеристике воде и паре).

Са слике 41 и слике 42. може се уочити да стопе испаравања углавном расту са повећањем брзине струјања ваздуха изнад површине воде, и генерално расту са повећањем разлике парцијалних притисака водене паре на температури воде и парцијалног притиска водене паре у ваздуху базенске хале.

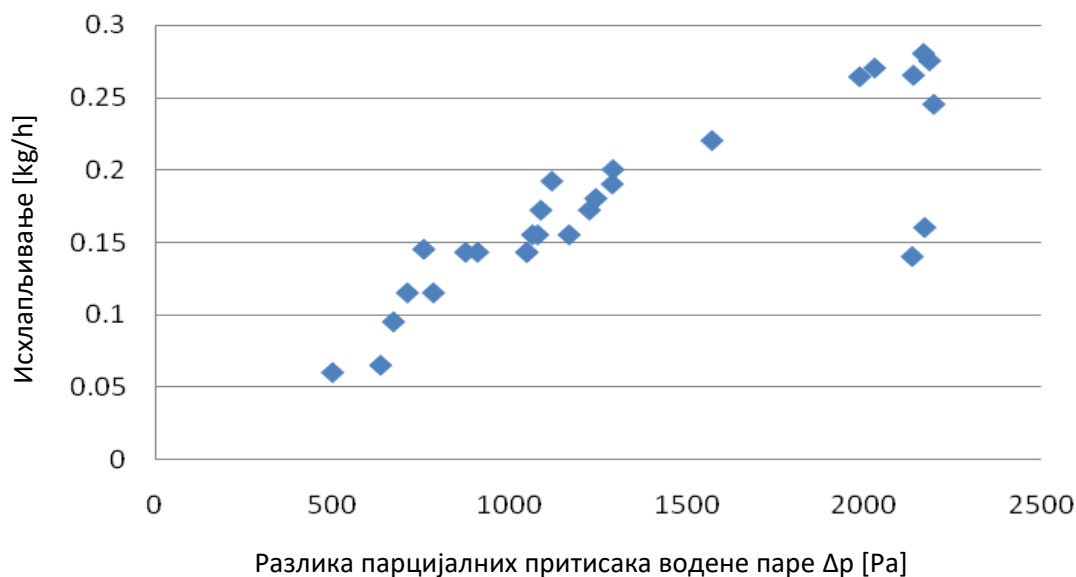


Слика 40. Апаратура за мерење



Слика 41. Измерене стопе испаравања у функцији од измерене брзине ваздуха

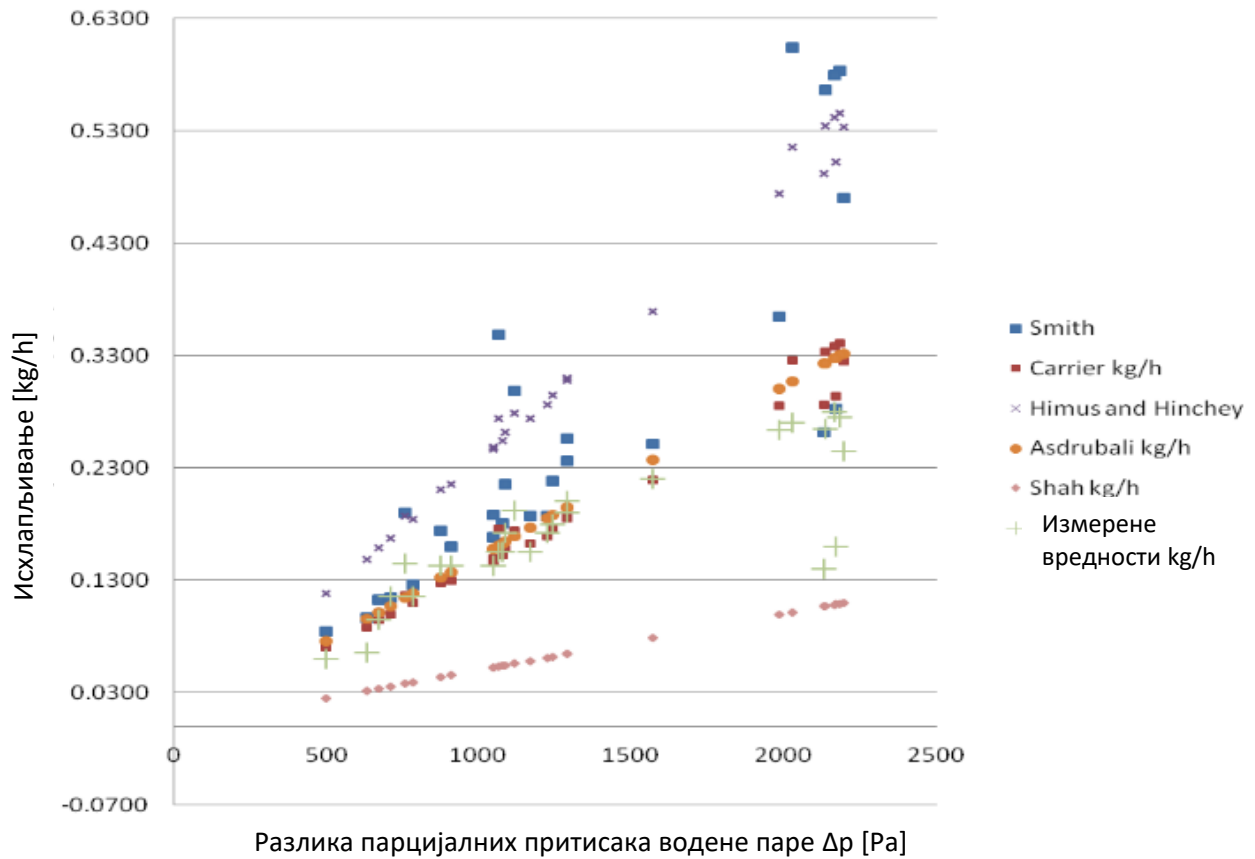
Ова врста односа је у складу са већином корелација које се могу наћи у литератури. Измерени резултати такође показују велику зависност стопе испаравања од брзине струјања ваздуха (слика 41). Значајан пад брзине струјања ваздуха узрокован нпр. гашењем система вентилације, што изазива пад брзине струјања ваздуха до готово нулте вредности (слика 41), доводи до пада вредности стопе испаравања упркос релативно високом градијенту разлике парцијалних притиска. Ово се може уочити на слици 42.



Слика 42. Измерене стопе испаравања као функција разлике парцијалних притисака водене паре ($\Delta p = p_{sw} - p_{air}$)

5.1.3. Евалуација резултата

Резултати добијени мерењем су упоређивани са вредностима из литературе. Већина аутора је поставила корелацију за предвиђање стопе испаравања на основу познатих релевантних параметара воде и ваздуха. Asdrubali [154] је мерио испаравање, за брзине струјања ваздуха од 0,05 m/s, 0,08 m/s и 0,17 m/s, што је слично са брзинама струјања ваздуха у стварним затвореним базенским салама, а добијене стопе испаравања су у распону од 0,07 - 0,15 kg/h за релативну влажност ваздуха између 50 % и 70 %. Његови резултати показују смањење стопе испаравања са повећањем релативне влажности околног ваздуха, која се односи на тренд промене разлике парцијалних притисака водене паре на температури воде и ваздуха изнад нивоа воде. По једна вредност коефицијента испаравања је одређена у [154] за сваки од тестираних случајева, међутим корелација као опште решење проблема у тестираном домену није пронађена.



Слика 43. Измерене стопе испаравања као функција разлике парцијалних притисака водене паре

У истраживању [154], одржавана је константна разлика између температуре воде и температуре ваздуха од 2 °С, што одговара препорученој вредности ове температурне разлике према инжењерским приручницима [166]. Shah [169] [170] је обезбедио корелације за предвиђање стопе испаравања у затвореним базенима, али је користио податке из литературе како би добио корелационе криве. Због тога су у овом раду измерени подаци поређени са вредностима добијеним коришћењем корелација за добијање стопе испаравања из литературе. Резултати добијени коришћењем најчешће коришћених корелација из литературе су упоређени са измереним подацима и приказани на слици 43.

Може се приметити да су неке од корелација, као што су Smith-ова и Himus-ова и Hinchey-јева значајно увећавају стопу испаравања за затворене базене, док Shah-ова корелација умањује стопу испаравања у затвореним базенима.

На основу резултата мерења спроведених у реалним условима у базенској хали зграде затвореног пливачког базена „СРЦ Дубочица“ у Лесковцу, формирана је једначина за математичку апроксимацију испареле воде са слободне водене површине \dot{E} [kg/h]:

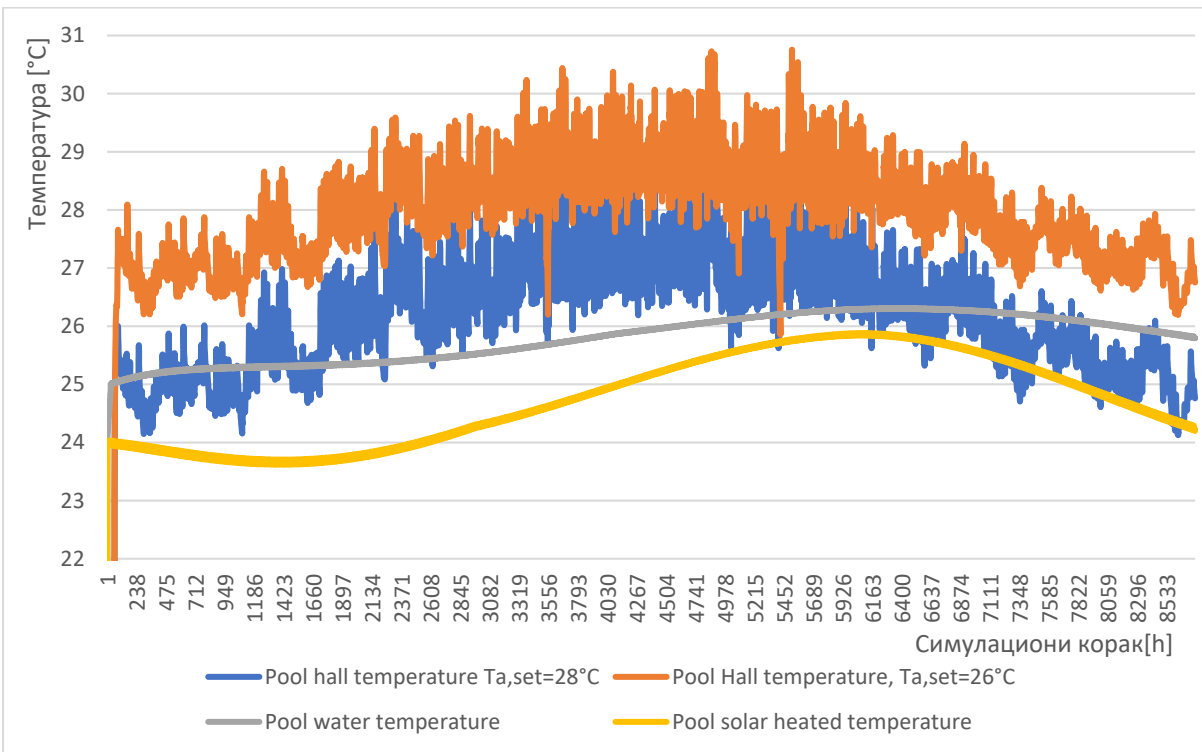
$$\dot{E} = (AV_a^N + B)(p_{sw} - \varphi p_{s,air})/\Gamma \quad (150)$$

при чему су вредности коефицијената у једначини следеће: $A=0,019895125$, $B=0,089299066$, and $N=0,786$. Ове вредности одређене су као апроксимација измерених вредности.

5.1.4. Нумеричка симулација затворених пливачких базена

У овом раду је анализирано понашање Спортско рекреационог центра „Дубочица“ у Лесковцу, са 55000 посетилаца у току године, укупне површине базенске воде 1480 m². Услови термичког комфора у базенској хали и осталим просторијама се одржавају помоћу система за грејање и вентилацију, при чему је укупна инсталисана снага размењивача топлоте 3,35 MW [161, 164]. На основу пројектоване снаге размењивача топлоте, може се видети да се 45,08 % губитака топлоте у пројектним условима доводи у везу са губицима топлоте базенске хале, док 31,93 % чине губици топлоте остатка објекта, а пројектована снага за загревање санитарне топле воде (STV), чини свега 4,33 % укупних губитака топлоте [161, 164].

У овом раду је извршено моделирање базенске хале као више-зонског објекта применом софтвера TRNSYS, при чему је омотач зграде моделиран као масиван, типичне грађевинске конструкције од опекарског блока са термоизолационим слојем од минералне камене вуне дебљине 5 cm. Кровна конструкција је челична, са кровним панелима испуњеним каменом минералном вуном дебљине 10 cm, док је спољашња столарија двоструко застакљена са челичним рамом. С обзиром на специфичности моделиране зграде, највећа пажња је посвећена симулацији и анализи базенске хале и базенске воде, као и њиховој међусобној интеракцији.



Слика 44. Годишња промена температуре ваздуха базенске хале и воде, у различитим симулираним радним режимима

Математички модел пливачког базена представљен у овом раду је коришћен заједно са вишезонским Туре 56 моделом објекта и моделом система за грејање и вентилацију, како би се испитало понашање базенске воде и базенске хале. Прорачун парцијалног притиска zasiћене водене паре као функција температуре је вршен према [182]. Грејање базенске хале се врши ваздушним каналским системом. По претпоставци, брзина струјања ваздуха је константна и износи 0.08 m/s. Температура ваздуха у базенској хали се мења у току

симулације, а зависи од одзива моделираног система управљања и од запремине ваздуха у базенској хали чија се температура одржава на жељеној вредности (слика 44). Утицај климатских услова је урачунат употребом Метеонорм (Meteonorm) часовних климатских података, који поред промене температуре и влажности спољног ваздуха садрже и податке о промени температуре воде из водоводне мреже. Годишња промена температуре амбијенталног ваздуха базенске хале и базенске воде добијена као резултат симулације представљена је на слици 44. Симулација је указала на потребе за радом грејно вентилационог система у режиму грејања чак и у летњем периоду, што се доводи у везу са највећим бројем посетилаца у овом периоду, те највећим потребама за грејањем STV, али и са потребама загревања базенске воде и вентилације базенске хале (табела 17). Постојање потреба за грејањем у летњем периоду оправдава употребу соларних система за загревање, као што је предложено у овом раду. Како би се испитао утицај промене температуре на феномен исхлапљивања, те на губитке топлоте базена и базенске хале, урађено је више симулација при чему је жељена температура ваздуха коју регулише моделирани управљачки систем ($T_{a,set}$) варирана од 26 °C до 28 °C, док је жељена температура воде одржавана на температури 1-3 °C нижој од ове (табела 17). Годишњи биланс енергије базенске хале, показао је да је се око 60 % енергије користи за потребе грејања и вентилације базенске хале (табела 17), око 20 % се користи за загревање базенске воде, док се укупна потрошња енергије за загревање базенске хале и базенске воде може смањити до 10,3 % избором адекватне радне стратегије система грејања и вентилације.

Годишња симулирана промена температуре ваздуха базенске хале са подешавањем жељене температуре ваздуха на моделираном систему управљања грејањем и вентилацијом ($T_{a,set}$) од 26 °C и 28 °C и жељена температура базенске воде у сценарију грејања соларним системом са и без додатних загрејача, приказани су на слици 44. Разлика температуре базенске воде у симулираном сценарију загревања помоћу додатног загрејача и без додатног загрејача, указује да се већина потреба за грејањем базенске воде може задовољити помоћу соларног система. С обзиром на препоручене температуре базенске воде, може се закључити да су самостални соларни системи без додатних загрејача довољни за загревање базенске воде пливачких базена намењених професионалним спортским активностима и тренинзима, где је температуру воде потребно одржавати на нешто нижем температурном нивоу.

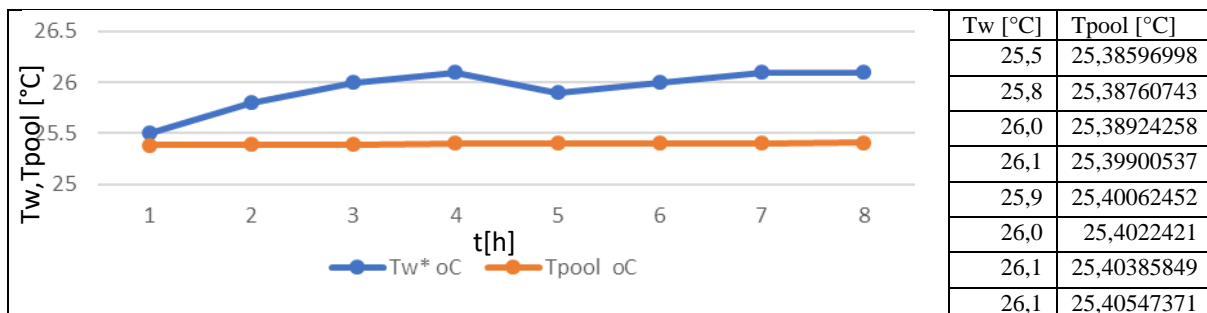
Табела 17. Губици топлоте базенске воде и базенске хале

Губитак топлоте	Јединица	T _{air} =28°C; T _w = 24°C	T _{air} =28°C; T _w = 25°C	T _{air} =28°C; T _w = 26°C	T _{air} =26°C; T _w = 24°C	T _{air} =26°C; T _w = 25°C	T _{air} =26°C; T _w = 26°C
Температурна разлика	[°C]	ΔT=4	ΔT=3	ΔT=2	ΔT=2	ΔT=1	ΔT=0
Загревање СТВ	[%]	15,93	15,80	15,80	17,03	17,23	16,94
Грејање б. воде	[%]	21,20	21,34	21,34	22,12	21,79	22,08
Грејање и вент. баз. х.	[%]	62,86	62,86	62,86	60,85	60,98	60,98
Укупни губици топлоте	[MWh]	95,4	94,5	92,4	87,4	88,5	85,5

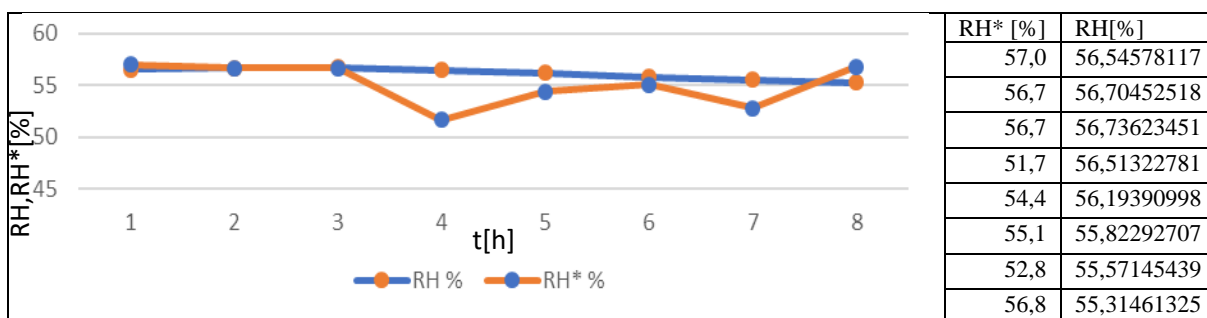
Губици топлоте услед исхлапљивања (\dot{Q}_{evap}) су значајно већи од осталих губитака топлоте базенске воде, и крећу се у опсегу 46 - 54 % укупних губитака енергије базена [57]. Симулације показују да су губици енергије услед радијације (\dot{Q}_{rad}) занемарљиво мали. Губици топлоте конвекцијом са површине базена (\dot{Q}_{conv}) расте са разликом температуре између базенске воде и ваздуха базенске хале, од 4,7 % до 15,9 % укупних губитака топлоте базена. Симулације су показале повећање губитака топлоте са повећањем жељених температура базенске воде и температуре ваздуха базенске хале.

Када базенска вода достигне задату температуру, струјање радног медијума кроз круг за загревање базенске воде престаје, до наредног временског корака када се температура воде довољно промени. У периоду када нема струјања радног медијума кроз круг за загревање базенске воде, соларни систем се користи само за загревање STV. Моделирани систем претпоставља могућност додатног загревања како базенске воде, тако и резервоара STV. Вода из резервоара STV се меша са водом из водоводне мреже, тако да излазна температура воде за туширање буде 40 °C, чиме се симулира потрошња топле воде за потребе туширања. Пројектни услови за одређивање снаге загрејача STV дефинисани су за 650 купача, колика је посећеност у летњем периоду, док се број купача у току године постепено смањује, до минималне вредности од 10 % у зимском периоду. Ови подаци су коришћени како за моделирање профила потрошње санитарне топле воде, тако и за промену вредности фактора употребе базена F.

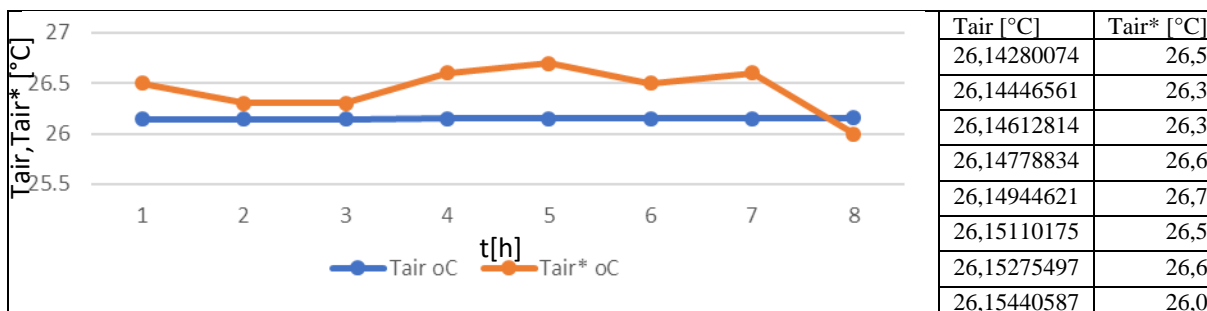
Поређење резултата симулације са мереним вредностима за исте температуре спољашњег ваздуха дате су на сликама 45, 46 и 47.



Слика 45. Поређење промене измерене температуре базенске воде (T_w) и симулиране температуре базенске воде (T_{pool})



Слика 46. Поређење промене измерених вредности релативне влажности ваздуха у базенској хали (RH^*) и симулираних вредности релативне влажности ваздуха базенске хале (RH^*)



Слика 47. Поређење вредности симулиране температуре ваздуха базенске хале (T_{air}) и измерених вредности температуре ваздуха базенске хале (T_{air}^*)

5.1.5. Модел суперструктуре полигенерационог система

Укупна номинална снага/капацитет за грејање затворених пливачких базена $P_{h,POLY}$, хлађење затворених пливачких базена $P_{c,POLY}$ и производњу електричне енергије $P_{e,POLY}$ једнака је суми номиналних капацитета компонената са активним учешћем у разматраној конфигурацији:

$$P_{h,POLY} = P_{h,B} + P_{h,CHP} + P_{h,GSHp} + P_{h,STC} + P_{h,AUX} \quad (151)$$

$$P_{c,POLY} = P_{c,GSHp} + P_{c,VCC} + P_{c,ADS} \quad (152)$$

$$P_{e,POLY} = P_{e,CHP} + P_{e,PV} \quad (153)$$

где су: $P_{h,B}$ [kW] номинална снага топловодног котла, $P_{h,CHP}$ [kW] номинални капацитет грејања когенерационог модула, $P_{h,GSHp}$ [kW] номинални капацитет грејања топлотне пумпе, $P_{h,STC}$ [kW] максимална снага соларних топлотних колектора (STC), $P_{h,AUX}$ [kW] снага постојећих додатних електричних загрејача; $P_{c,GSHp}$ [kW] номинални капацитет хлађења топлотне пумпе, $P_{c,VCC}$ [kW] номинални капацитет хлађења ваздухом хлађеног чилера, $P_{c,ADS}$ [kW] номинални капацитет хлађења адсорпционог чилера; $P_{e,CHP}$ [kW] номинална снага когенерационог модула на вратилу генератора, $P_{e,PV}$ [kW] номинална снага система фотонапонских колектора.

Рад полигенерационог система у сваком временском кораку симулације дефинишу тренутно топлотно и расхладно оптерећење, које зависи од задатих унутрашњих температура у току симулације у базенској хали, холу зграде затворених пливачких базена и свлачионицама, као и од температуре базенске воде и резервоара санитарне топле воде. Модел подразумева симулацију ангажовања топловодног котла, само уколико модули полигенерационог система не могу да подмире тренутно топлотне потребе конзума. Номинални капацитет вентилатора и пумпи система снабдевања енергијом је по претпоставци константан, док се снаге напојних пумпи полигенерационих модула мењају са номиналном снагом/капацитетом одговарајућег модула. Управљање полигенерационим системом подразумева ангажовање модула система према приоритету ангажовања ради достизања следећих параметара: температура акумулатора хладне воде 7 °C, температура акумулатора топле воде 50 °C и температура резервоара санитарне топле воде 60 °C. Управљање системом за снабдевање потрошача топлотном и расхладном енергијом

подразумева непрекидно праћење унутрашњих температура и непрекидан рад система у току типичне метеоролошке године (број радних сати у току године 8760).

Капацитет за грејање и хлађење суперструктуре полигенерационог система без постојеће опреме (котлова и чилера) ограничен је пројектним условима. Понашање полигенерационих модула је моделирано употребом нормализованих података о понашању модула из литературе: когенерациони модул са мотором са унутрашњим сагоревањем [52, 183, 184], соларни сорпциони системи [185, 186, 187], компресорска топлотна пумпа [34, 129], фотонапонски соларни колектори [188, 189]. Моделирање осталих модула суперструктуре полигенерационог система је извршено на основу података произвођача опреме, и то: соларних топлотних колектора [190], расхладних компресорских чилера [191]. Годишње енергетске перформансе сваког од модула који чине полигенерациони систем одређене су променом понашања модула (излазних променљивих моделираног уређаја) при делимичном оптерећењу, промену ефикасности модула или коефицијента перформанси (коефицијента грејања и хлађења), који су зависни од температура и протока радних медијума у систему у току сваког временског корака симулације i .

Укупна испоручена топлотна енергија полигенерационог система систему потрошње енергије може се срачунати на основу испоручене топлотне енергије сваке од активних компонената које чине суперструктуру полигенерационог система. Укупна годишња испоручена топлотна енергија $Q_{h,POLY}$, расхладна енергија $Q_{c,POLY}$ и електрична енергија $W_{e,POLY}$ се може срачунати као сума испоручених количина енергије топлотне енергије $q_{hK,i}$, расхладног ефекта $q_{cK,i}$ и $w_{eK,i}$ електричне енергије у току временског корака i сваке од компонената K које чине полигенерациони систем за n временских корака у току типичне метеоролошке године:

$$Q_{h,POLY} = \sum_{i=1}^n (q_{hCHP,i} + q_{hB,i} + q_{hSTC,i} + q_{hSTC,i} + q_{hGSHP,i} + q_{hAUX,i}) \quad (154)$$

$$Q_{c,POLY} = \sum_{i=1}^n (q_{cVCC,i} + q_{cGSHP,i} + q_{cADS,i}) \quad (155)$$

$$W_{e,POLY} = \sum_{i=1}^n (w_{eCHP,i} + w_{ePV,i}) \quad (156)$$

Годишња нето испоручена електрична енергија $W_{net,POLY}$ полигенерационог система се може се срачунати одузимањем симулиране сопствене потрошње модула који користе електричну енергију за свој рад $W_{uCHP,i}$ од укупне годишње производње. Електрична

енергија коју користе уређаји мањих снага попут вентилатора и пумпи може се сматрати занемаривом.

$$W_{net,POLY} = \sum_{i=1}^n (w_{eCHP,i} + w_{ePV,i}) - \sum_{i=1}^n (w_{uVCC,i} + w_{uGSHP,i}) \quad (157)$$

Перформансе полигенерационог система се пореде са перформансама постојећег енергетског система, који чине топоводни котао и компресорски расхладни чилер, и електрични грејач за загревање санитарне топле воде:

$$Q_{h,a} = \sum_{i=1}^n (q_{hBa,i} + q_{hAUXa,i}) \quad (158)$$

$$Q_{c,a} = \sum_{i=1}^n (q_{cVCCa,i}) \quad (159)$$

Смањење потрошње примарне енергије за грејање $Q_{h,a}$ и хлађење $Q_{c,a}$ које се може остварити применом полигенерационог система у поређењу са конвекционалним постојећим системом, се може срачунати према:

$$Q_{h,r} = Q_{c,POLY} - Q_{h,a} \quad (160)$$

$$Q_{c,r} = Q_{c,POLY} - Q_{c,a} \quad (161)$$

5.1.6. Оптимизација полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена

Капацитет за грејање и хлађење полигенерационог система искључујући постојећу опрему у згради базена еквивалентан је снази пројектоване опреме што износи 3500 kW за грејање и 2000 kW за хлађење. Капацитети соларних топлотних и фотонапонских система су ограничени према реално расположивом простору за уградњу соларних система. Како кровна површина зграде није повољна за монтажу соларних панела, максимална дозвољена површина која може да буде покривена фотонапонским панелима или соларним топлотним колекторима се одређује према слободном околном земљишном простору и износи 3000 m². Ова површина представља максималну укупну површину за инсталацију соларних панела, што представља додатни услов оптимизације. Запремине резервоара топле воде и хладне воде су ограничене на 300 m³.

5.1.6.1. Примењени критеријуми оптимизације

Примена високо интегрисаних полигенерационих система може захтевати високе почетне капиталне инвестиције. Доносиоци одлука ће вероватно бити најзаинтересованији за економске перформансе инвестиције овог типа из тог разлога.

Нето садашња вредност полигенерационог пројекта је коришћена као критеријум економске оптимизације у оквиру ове анализе. Усвојен је економски век пројекта од 12 година што одговара периоду трајања експлоатације уговора за повлашћене произвођаче електричне енергије [8, 10]. Функција циља је дефинисана максималном вредношћу нето садашње вредности, која представља функцију почетне капиталне инвестиције B_0 која се по претпоставци дешава на почетку пројекта (у години 0), и динамичке вредности годишњег новчаног тока пројекта B_t у години $t = (1, 2, 3 \dots 12)$, и дисконтне стопе d :

$$NPV = -B_0 + \sum_0^{12} B_t / (1 + d^t) \quad (162)$$

Дисконтна стопа је функција стопе промене цена, инфлационе стопе и цене извора финансирања [192] или опортунитетног трошка. Укупни годишњи трошкови се срачунавају као сума енергетских трошкова за грејање $B_{h,r}$, хлађење $B_{c,r}$ и производњу електричне енергије B_e :

$$B_t = B_{h,r} + B_{c,r} + B_e \quad (163)$$

Годишња сена енергије се срачунава као функција потрошње енергије K -тог полигенерационог модула Q_{fK} , и специфичне цене рада модула и C_{fK} и годишњег одржавања $B_{Ko\&m}$. Годишњи трошак Q_{fK} се добија као функција симулираног понашања $q_{fK,i}$ полигенерационог модула K у току временских корака i , где $K, [K \in (B, CHP, GSHP, STC, VCC, ADSC, VCC, PV)]$:

$$Q_{fK} = \sum_{i=1}^n (q_{fK,i}) \quad (164)$$

$$B_{h,r} = Q_{fB}C_{fb} + Q_{fAUX}C_{fAUX} + B_{Bo\&m} - \sum_K (Q_{hfK}C_{fK} + B_{Ko\&m}) \quad (165)$$

$$B_{c,r} = Q_{fVCC}C_{fb} + B_{Bo\&m} - \sum_K (Q_{cfK}C_{fK} + B_{Ko\&m}) \quad (166)$$

Специфичне цене рада полигенерационих модула добијене су на основу просечне цене електричне енергије јавног објекта затворених пливачких базена [€/kWh] [39], цене природног гаса [€/kWh], док се цена оперативних трошкова и одржавања по претпоставци срачунава као удео набавне цене опреме (3-5%). По претпоставци, усвојена је константна

промена годишње цене енергије од 2,5 %. Профит који се оствари продајом енергије применом полигенерационог система по повлашћеној цени B_e се срачунава на основу прописане цене електричне енергије за повлашћене произвођаче као функција инсталисане снаге система [8, 10] и за анализирану конфигурацију суперструктуре једнак је суми добити остварене применом фото напонског и когенерационог система:

$$B_e = B_{eCHP} + B_{ePV} = \sum_{i=1}^n (W_{eCHP,i} C_{eCHP} + W_{ePV,i} C_{ePV}) \quad (167)$$

Капитална почетна инвестиција сваке од компонената које чине полигенерациони систем је функција номиналне снаге тј. капацитета, функција површине соларног система (PV и STC) или функција запремине акумулатора топлоте [193]. Укупна капитална инвестиција модула K суперструктуре може се срачунати као:

$$I_K = \begin{cases} C_{pK} P_K (1 + C_{sc}), & \text{за } K \in (CHP, VCC, GSHP, ADSC, HWST, CWST, PV) \\ C_{pK} A_K (1 + C_{sc}), & \text{за } K \in (STC) \end{cases} \quad (168)$$

где је C_{pK} [€/kW] фактор набавне цене уређаја/опреме, а C_{sc} , ($C_{sc} < 1$) цена интеграције модула у систем који представља одређени удео набавне цене. Вредности фактора C_{pK} и C_{sc} су доступни у литератури. Специфични инвестициони трошкови набавке опреме су усаглашени према подацима из литературе, као што је приказано у табели 18. Трошкове опреме из литературе је могуће конверговати на садашњу вредност помоћу индекса набавне цене опреме [193, 194]

Потрошња примарне енергије (РЕС) се користи као индикатор енергетских перформанси полигенерационих система. Стога, се минимална вредност РЕС користи као функција циља тј критеријум оптимизације. РЕС полигенерационог система на годишњем нивоу рачуна као збир потрошње примарне енергије његових модула K , [$K \in (B, CHP, GSHP, STC, VCC, ADSC, VCC, PV)$] у складу са [195].

$$PEC_{poly} = \sum_K (E_{hK,PE} + E_{cK,PE}) - \sum_K E_{wK,PE} \quad (169)$$

где је PEC_{poly} потрошња примарне енергије система, а $E_{hK,PE}$ и $E_{cK,PE}$ су потрошње примарне енергије полигенерационих модула K за грејање и хлађење, респективно, $E_{wK,PE}$

уштеда примарне енергије која одговара локално произведеној електричној енергији од стране модула K .

Табела 18. Одређивање фактора набавне цене опреме C_{pK}

Полигенерациони модул	Јединица	Фактор набавне цене уређаја, C_{pK}	Литература
CHP	[€/kW _e]	800	[27]
ADSC	[€/kW _c]	1050	[196]
GSHP	[€/kW _h]	$-0,113P_{hp} + 638,406$	[197]
STC	[€/m ²]	265	[198]
PV	[€/m ²]	120	[199] [200]
HWST,CWST, SHWT	[€/m ³]	1050	[201]

Критеријум оптимизације са аспекта животне средине је представљен еквивалентном емисијом CO₂ која се односи на рад полигенерационог система. Минимална вредност емисије CO₂ у току рада полигенерационог система се користи као функције циља за оптимизацију. Емисија CO₂ полигенерационог система $C_{CO_2,poly}$ се може срачунати као [195]:

$$C_{CO_2,poly} = \sum_K (C_{K,CO_2} - w_{K,CO_2}) , \quad (170)$$

где је C_{K,CO_2} годишња емисија CO₂ која проистиче из рада полигенерационог модула K , а w_{K,CO_2} је редукација емисије CO₂ услед локалне производње електричне енергије употребом модула K .

5.1.7. Резултати оптимизације полигенерационог система

Резултати оптимизације добијени су применом TRNSYS софтвера и GenOpt [146] оптимизационих алгоритама према описаној методи. Коришћени су следећи оптимизациони алгоритми:

- (1) Општа шаблонска претрага (Generalized Pattern Search (GPS)),
- (2) Хук Џивс алгоритам (Hooke Jeeves algorithm (HJ)),
- (3) Оптимизација методом ројева честица (Particle Swarm Optimization (PSO)) и

(4) Хибридни алгоритам Опште шаблонске претраге са PSO (Hybrid General Pattern Search with Particle Swarm Optimization (GPS-PSO)).

Табела 19. Резултати оптимизације – вредности функције циља

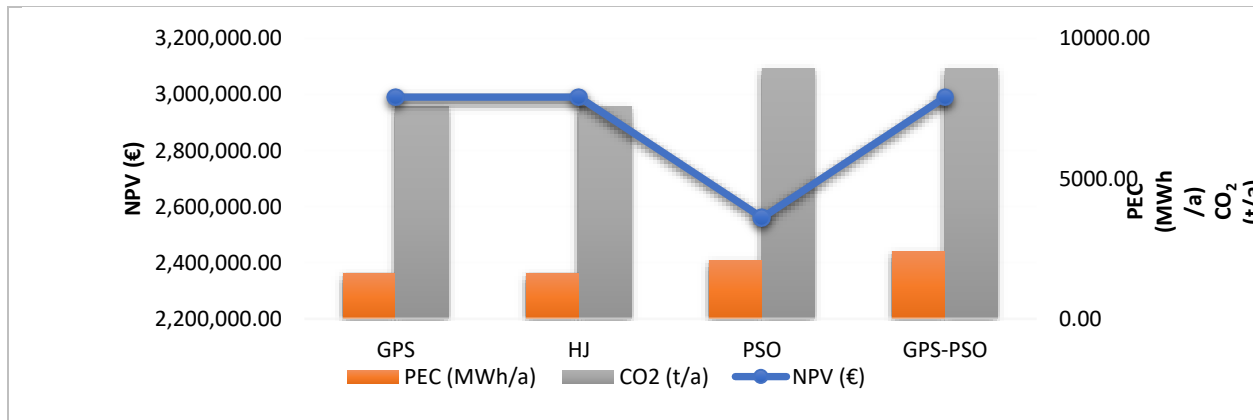
Резултати	NPV [€]	PEC [MWh/a]	CO ₂ [t/a]
GPS	2.990.479,02		
HJ	2.990.479,19		
PSO	2.560.421,42		
GPS-PSO	2.990.480,23		
GPS (PEC)		1610,83	
HJ (PEC)		1610,83	
PSO (PEC)		2094,08	
GPS-PSO (PEC)		2398,39	
GPS (CO ₂)			7558,83
HJ (CO ₂)			7559,20
PSO (CO ₂)			8908,60

Решење оптимизације добијено на основу функција циља за срачунавање нето садашње вредности пројекта NPV, еквивалентне емисије CO₂ полигенераиционог система у току типичне метеоролошке године и потрошње примарне енергије PEC је приказано на сликама у продужетку (Прилог 1: од слике 58 до слике 69). Вредности функције циља добијене по задатим критеријумима применом изабраних оптимизационих алгоритама су приказани у табели 19.

У табели 20 су приказани капацитети полигенераиционих модула који улазе у оптималну конфигурацију полигенераиционог система за потребе анализиране зграде затворених пливачких базена. Оптимално решење (табела 20) састоји се од когенераиционог модула (CHP) са мањом површином соларних топотних колектора (STC) већом површином фотонапонских колектора (PV) и адсорпционим чилером. Конфигурација оптималног полигенераиционог система је иста по свим критеријумима оптимизације добијених применом свих изабраних оптимизационих алгоритама, али постоје разлике у погледу оптималног капацитета појединих полигенераиционих модула (Прилог 1: од слике 70 до слике 81).

Табела 20. Резултати оптимизације – снаге и капацитети полигенерационих модула оптималне конфигурације.

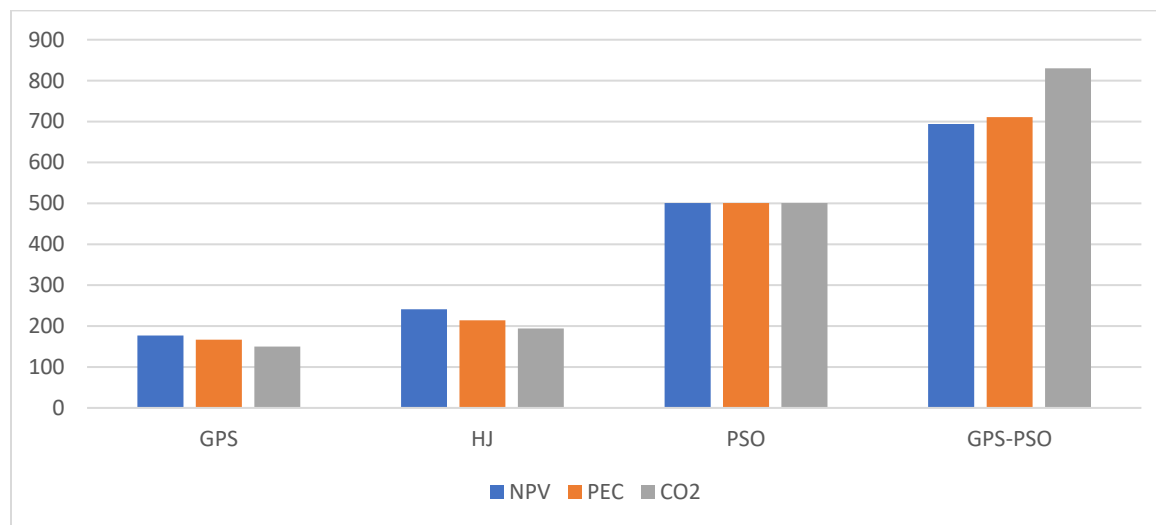
Метода	ADS [kW]	CHP[kW]	HWST [m ³]	STC [m ²]	CWST [m ³]	PV [m ²]
GPS (NPV)	827,5	2000	32,69	3	165,5	3000
HJ(NPV)	827,5	2000	126,44	3	165,5	3000
PSO(NPV)	1475,729	1743,84	84,64	262,9	209,7	2678,5
GPS-PSO(NPV)	1600	2000	125	250	225	3000
GPS (PEC)	1112,125	1900	3	3	71,8	3000
HJ (PEC)	1112,125	1900	3	3	71,8	3000
PSO (PEC)	1511,135	1775,44	88,96	260,1	211,3	2563,5
GPS-PSO (PEC)	2000	2000	125	300	225	3000
GPS (CO ₂)	498,1458	2000	3	3	29,6	3000
HJ (CO ₂)	488,2187	2000	3	3	29,6	3000
PSO (CO ₂)	1599,99	2000	300	0	225	3000
GPS-PSO (CO ₂)	1200	2000	15,63	250	300	2750



Слика 48. Поредица вредности функције циља добијених различитим оптимизационим алгоритмима : вредности функције циља NPV, $CO_{2,poly}$ и PEC_{poly} .

Поредица вредности функције циља добијених применом тестираних оптимизационих алгоритама може се видети да GPS и HJ метода дају скоро идентичне резултате, али се брзина конвергенције незнатно разликује (слика 48, слика 49), при чему HJ метода конвергира са мањим бројем оптимизационих корака. Најбоља екстремна вредност

функције циља добија се применом хибридне GPS-PSO методе, при чему GPS метода даје сличне резултате али је за добијање резултата потребно више оптимизационих корака.



Слика 49. Поређење броја итерација у току оптимизације применом тестираних алгоритама

5.2. Оптимизација полигенерационог система за потребе сточарске фарме

У овом раду се разматра пример интегрисане фарме свиња са годишњим капацитетом од 32000 товљеника, са 1350 крмача. У току производног процеса, животиње се смештају у одговарајуће зграде, у зависности од фазе одгоја. Преко решеткастих подова у зградама одводи се стајњак и други органски отпад до прихватних резервоара и лагуна, одакле се даље користи као органско ђубриво. Зграде са животињама се греју у складу са условима захтева фазе одгоја животиња у згради [202]. Од укупно 6 зграда за смештај животиња на фарми, неопходно је загревање три за очување здравственог стања смештених животиња. Поред тога, на фарми постоји управна зграда која се греје у зимском и хлади у летњем периоду. У управној згради постоји резервоар за санитарну топлу воду (STV) капацитета 3000 l, који се загрева до температуре од 60 °C. За потребе грејања објеката на фарми, према пројекту, инсталирана су 2 топоводна котла укупне инсталисане снаге 1500 kW. Према резултатима енергетског билансирања фарме, вредности индикатора енергетске ефикасности су блиске референтним вредностима [124, 202]. Потребе за топлотном енергијом чине 69,63 % енергетских потреба, док потребна електрична енергија чини

преосталих 30,47 %. [124]. Фарма има следеће комуналне потребе: грејање простора, загревање санитарне топле воде, хлађење управне зграде и потрошња електричне енергије. Поред ових потреба, фарма користи органско ђубриво 120-180 kg/ha на својим обрадивим земљаним површинама, према процени.

Избору фарме за тестирање оптимизационих метода, поред разноврсних енергетских потреба и разноврсности доступних извора енергије, је и значај сточарства у пољопривредном тржишту Србије, са значајним потенцијалом за извоз [203] и производним потенцијалом у Централној и Југоисточној Србији [204]. Једна петина светске производње свињетине оствари се у ЕУ, те се овај сектор сматра социолошко-економским фактором [205].

Имплементацијом нових технологија, попут енергетски ефикасних технологија, поспешује се конкурентност домаће сточне производње [205]. На основу литературе, производња биогаса и његова употреба за погон когенерационих постројења сматра се најбољом праксом са аспекта смањења трошкова, енергетског аспекта и смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште (GHG). Најефикаснијим сточним фармама сматрају се интегрисане фарме, где се висока продуктивност комбинује са ниском потрошњом енергије, што за последицу има вишу додату бруто вредност по јединици производа [206]. Истраживања потрошње енергије на фармама у Данској, показало је потрошњу енергије од 20 MJ по kg произведене животиње, али су уочене знатне варијације потрошње међу фармама [207]. Према процени потенцијала за уштеду енергије у ЕУ, највећи потенцијал од 47 % је у употреби стајњака за производњу енергије, до 28 % у редукцији употребе хране и до 25 % редукцијом складиштења стајњака [205]. Иако употреба стајњака за производњу енергије има највећи потенцијал у погледу уштеде енергије и редукције емисије гасова са ефектом стаклене баште, употреба других технологија за снабдевање енергијом није разматрана. У овом раду се разматра употреба обновљивих извора енергије, поред употребе органског отпада генерисаног на фарми за добијање енергије. На основу резултата модела за процену потрошње фосилних горива у пољопривреди, утврђено је да органска производња утиче на мању потрошњу горива, али такође утиче и на продуктивност [208]. Производња биогаса на животињским фармама се сматра мером унапређења менаџмента отпадом и снабдевања енергијом са најбољом економском [209 - 216]. Данско искуство са

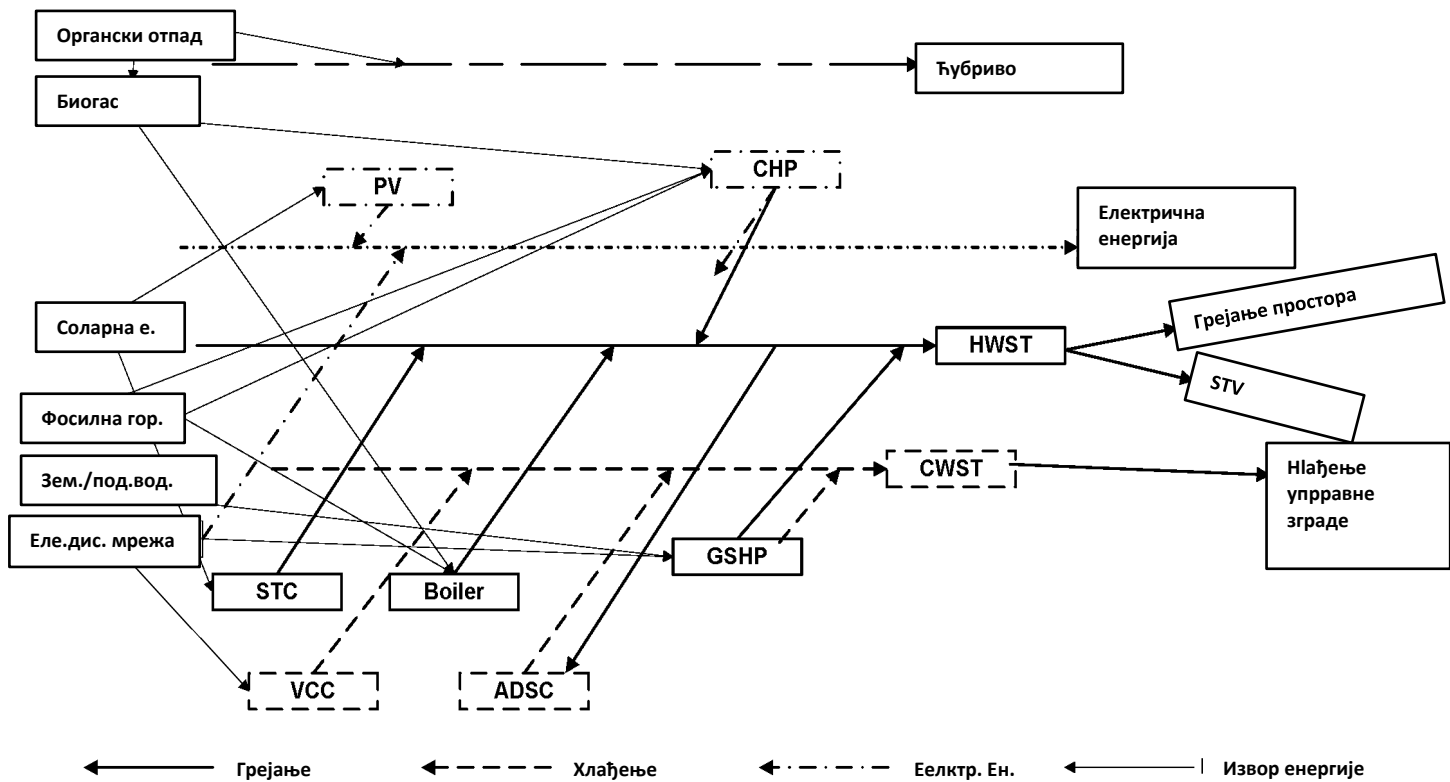
децентрализованим биогазним постројењима које датира још од седамдесетих, указује на вишеструке користи по животну средину: употреба обновљивог извора енергије, рециклирање органског отпада, улога у дистрибуцији и складиштењу стајњака, унапређење ветеринарских аспеката стајњака, смањена потрошња органског отпада, редукција емисије метана као гаса са ефектом стаклене баште [210]. Удео метана у произведеном биогазу зависи од улазног супстрата, а произведени метан се може користити за производњу топле воде, паре и електричне енергије [211]. Економска анализа доступних технологија за производњу и примену биогаза у Шведској за производњу топлотне енергије и комбиновану производњу топлотне и електричне енергије и употребу за погон возила, издвојила је комбиновану производњу топлотне и електричне енергије као економски најрентабилнију опцију [27]. Истовремено, ова опција је показала и највећу осетљивост на промену тестираних улазних параметара. На могућност производње биогаза и употребу других ОИЕ могу да утичу и не-техничке баријере [213, 214], међутим то није предмет овог рада. Поређењем осам технологија за добијање енергије употребом отпада са савременим енергетским системима, показало је да примена органског отпада и стајњака за производњу биогаза представља представља јефтинију меру редукције емисије CO₂ од спаљивања, да се највећа редукција емисије CO₂ остварује употребом биогаза за потребе транспорта, међутим употреба биогаза у когенерационим системима пружа најнижу цену редукције емисије CO₂ [215]. Студија економске исплативости производње електричне енергије употребом горивог биогаза на малим фармама свиња показала је да период повратка инвестиције зависи од примењене опреме за третман H₂S, али је процена рађена са уделом подстицајних средстава од 45 % [61], која нису доступна код нас. Подаци о токовима материја и енергије фарме свиња која се анализира у овом раду, искоришћени су за израду стационарног енергетског биланса фарме, при чему су у биланс укључени главни токови материје и енергије, а резултати су искоришћени за предлог профитабилних опција унапређења система снабдевања енергијом [122, 123, 124]. Наведена анализа укључила је прикупљање података не само о потрошњи енергије на фарми, већ и о доступним ресурсима и изворима енергије, на основу чега су одређени услови интеграције полигенерационог система и домен.

5.2.1. Интеграција суперструктуре полигенерационог система за потребе сточарске фарме

Модел суперструктуре полигенерационог система садржи моделе постојеће опреме, котлова на угаљ са аутоматским дозирањем горива пужним транспортером. У току симулације понашања разматраних конфигурација овог система овим уређајима додељује се секундарни приоритет – постојећа опрема се ангажује само у случају да опрема са већим приоритетом ангажовања није у могућности да задовољи симулирано оптерећење у датом временском кораку симулације. Највећи приоритет ангажовања у оквиру суперструктуре имају модули који могу да користе обновљиве изворе енергије (ОИЕ): равним застакљеним соларним топлотним колекторима (STC), топлотној пумпи земља-вода (вода-вода) (GSHP) и модулима који користе отпадну топлоту попут адсорпционог чилера (ADSC). Поред тога, претпоставља се и могућност употребе електричних грејача (AUX) постојећег резервоара санитарне топле воде који се користи за загревање санитарне топле воде (STV), при чему ангажовање електричних грејача има мањи приоритет од примене топлоте добијене полигенерационим модулима. Претпоставља се употреба когенерационог модула заснованог на употреби мотора са унутрашњим сагоревањем са сагоревањем биога са произведеног на фарми (BSHP) и употреба фотонапонских соларних колектора (PV). Претпостављено је да је фарма повезана на електро-дистрибутивну мрежу, те да има статус повлашћеног произвођача електричне енергије, при чему је могуће остварити добит од продаје локално произведене електричне енергије по условима дефинисаним домаћом регулативом [8, 10]. На основу услова интеграције представљених у поглављу 4.2.1, добија се физички модел суперструктуре полигенерационог система за потребе анализираних сточарске фарме (слика 38). На основу овог физичког модела, дефинисана је конфигурација суперструктуре, чије се математичко моделирање, нумеричка симулација и оптимизација по задатим критеријумима врши помоћу софтвера TRNSYS/GenOpt. Дакле, полигенерациони модули који улазе у састав суперструктуре за фарме су (слика 50):

- Поље фотонапонских колектора (PV),
- Топлотна пумпа вода-вода (GSHP),
- Поље равних соларних колектора (STC),
- Топловодни адсорпциони чилер (ADSC),

- Когенерациони модул заснован на мотору са унутрашњим сагоревањем са генератором, са погонном на природни или биогаз (CHP),
- Топловодни котао са погонном на природни или биогаз (B),
- Компресорски расхладни чилер (VCC),
- Акумулатор (резервоар) топле воде (HWST),
- Акумулатор (резервоар) хладне воде (CWST).



Слика 50. Суперструктура полигенерационог система за потребе сточарске фарме

Модел суперструктуре полигенерационог система је формиран модуларно помоћу Trnsys софтвера, тако да је могуће вршити симулацију понашања различитих конфигурација система у току типичне метеоролошке године, са варијацијом учешћа свих модула који чине суперструктуру и варијацијом снаге/капацитета активних модула суперструктуре полигенерационог система.

За потребе оптимизације, уведена су ограничења снаге тј. капацитета полигенерационог система, тако да капацитет грејања и хлађења не прелази капацитет опреме усвојене према пројектним условима, не узимајући у обзир капацитет модула који користе обновљиве

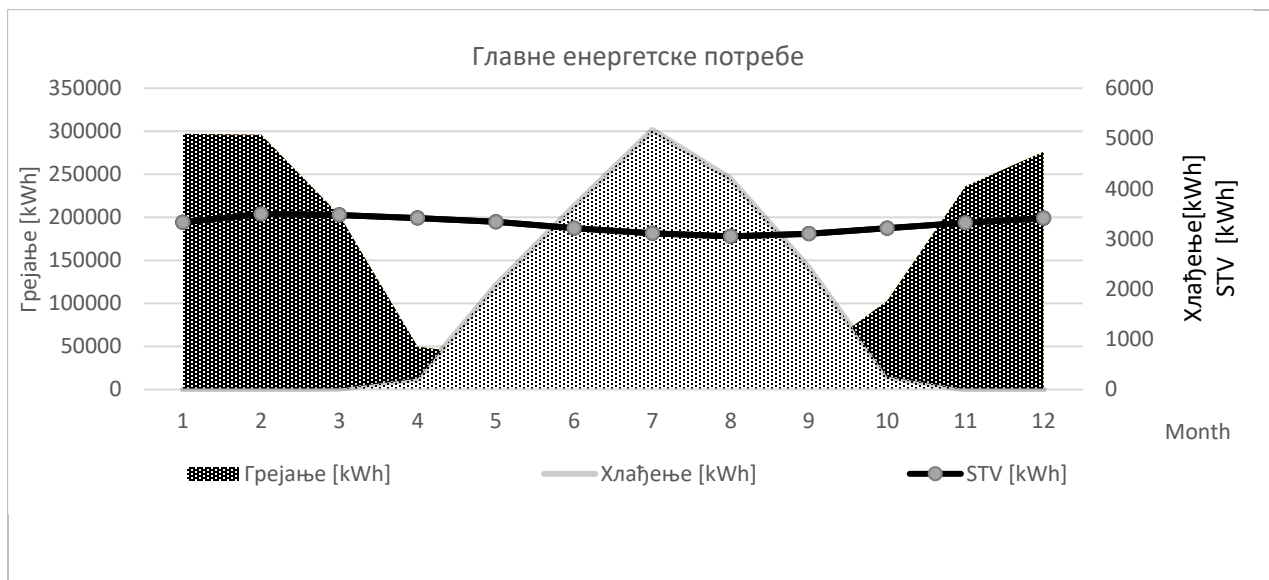
изворе енергије. По претпоставци, полигенерациони систем има својство хибридности, тако да се вршна оптерећења у току рада или оптерећења које није могуће подмирити употребом модула који користе ОИЕ, подмирују употребом модула заснованих на конвенционалним технологијама (котао, компресорски чилер и сл.). Систем је по претпоставци повезан на електро дистрибутивну мрежу, тако да може да користи електричну енергију када сопствена производња електричне енергије није довољна да подмири сопствене потребе.

5.2.2. Математичко моделирање и нумеричка симулација сточарске фарме

Математичко моделирање и нумеричка симулација вршена је применом TRNSYS софтвера. Зграде за смештај животиња на фарми и управна зграда моделиране као вишезонски објекат, тако да свака од зграда представља једну зону, а управна зграда је подељена на део са грејањем и хлађењем и део без грејања и хлађења. Резултати симулације потрошње енергије за грејање на фарми у току типичне метеоролошке године (слика 51) [127] показују 6,34 % већу потрошњу топлотне енергије од евидентиране потрошње енергије горива у години прикупљања података [39].

5.2.2.1. Математичко моделирање и нумеричка симулација енергетског конзума

Модел потрошње санитарне топле воде направљен је на основу претпоставке о профилу потрошње санитарне топле воде у току типичног дана у току године. Прикупљени подаци о потрошњи електричне енергије представљају збирну потрошњу свих електричних уређаја на фарми, тако да није могуће идентификовати појединачне профиле потрошње сваког од уређаја, што није ни предмет овог рада. Метеонорм часовни климатски подаци [121] се користе како би се урачунао утицај температуре и влажности амбијенталног ваздуха и температуре воде из водоводне мреже на промену топлотног оптерећења за грејање и хлађење објеката, и загревање санитарне топле воде.



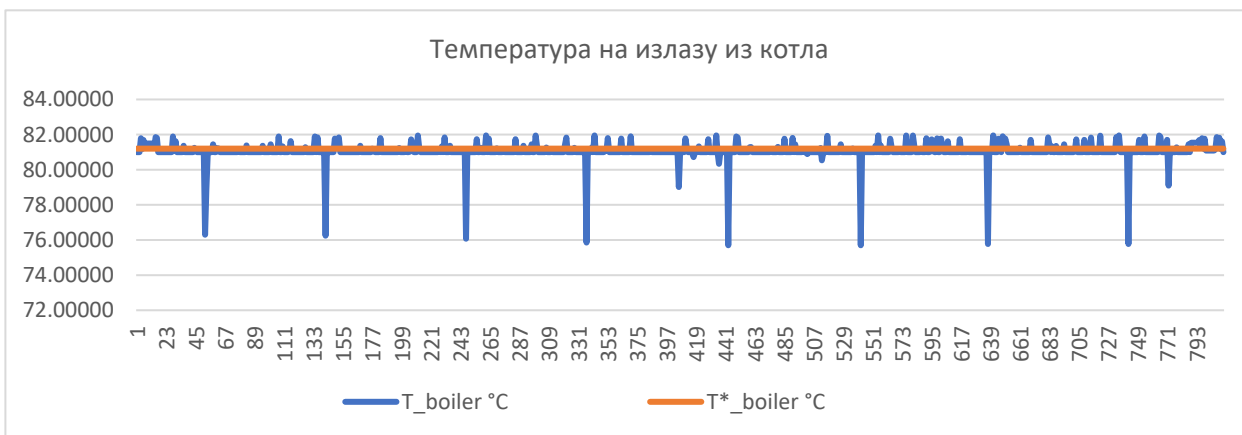
Слика 51. Резултати симулације – месечна потрошња енергије: грејање, хлађење и енергије за загревање санитарне топле воде (STV) [127]

Енергетски биланс стационарног режима топоводног система анализирани фарме приказан је у раду [217]. Енергетско билансирање у овом раду извршено је на основу измерених вредности температура и протока радног медијума у изабраним тачкама топоводног система фарме. Мерења су вршена употребом уређаја за ултразвучно мерење протока PORTAFLOW Greyline PT400, док су температуре мерене помоћу уређаја TESTO 831 [217]. Прецизност мерења наведеним уређајима на основу спецификације произвођача је $\pm 0,5\%$ до $\pm 2\%$ и $\pm 1,5\%$, респективно. С обзиром на то да су мерења вршена на реалном објекту у току рада топоводног система, коришћене су неинвазивне методе. Измерена температура површине цевовода без изолационог слоја кроз који струји радни медијум се може сматрати приближно једнаком температури радног медијума. Температура топле воде на излазу из котлова је очитана са постојећег термометра, тачности $\pm 2,5\%$. Масени проток радног медијума од $4,98 \text{ kg/s}$ је утврђен у главном воду. На основу измереног протока, задата је вредност масеног протока радног медијума у симулационом моделу. Температура у главном топоводу који снабдева топлим водом зграде за смештај животиња у тренутку мерења износила је $81,2^\circ\text{C}$, температура радног медијума на цевоводу за грејање управне зграде је $75,5^\circ\text{C}$, док је температура повратног вода главног топовода износила $71,5^\circ\text{C}$ [217]. Наведене вредности важе за температуру амбијенталног ваздуха од 5°C .

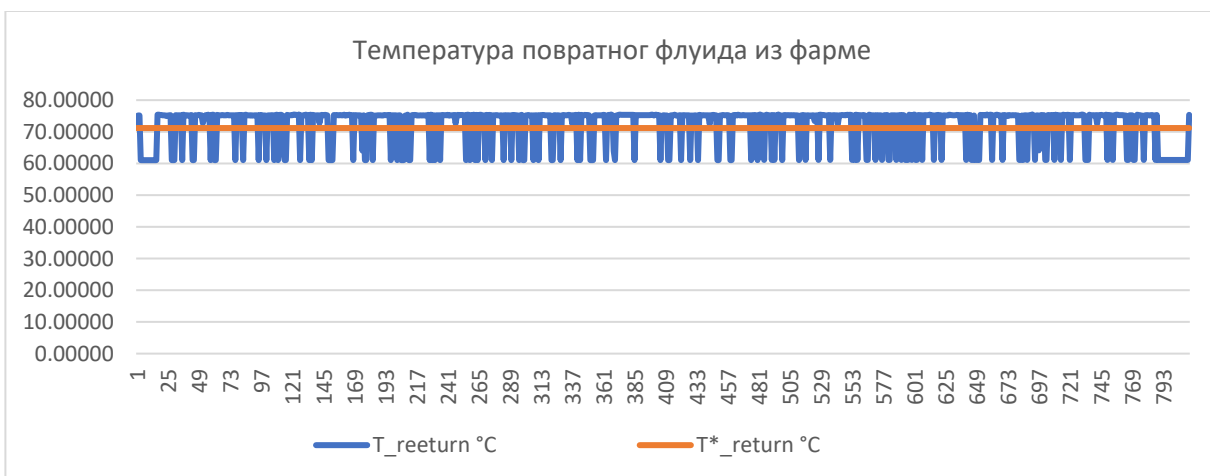
Месечне вредности потрошње енергије за грејање, хлађење и загревање санитарне топле воде добијене као резултат симулације приказане су на слици 55. Са слике се јасно види да најзначајније топлотно оптерећење потиче од зграда за смештај животиња, које се не хладе. Ред величине потрошње енергије за хлађење је значајно мањи од потрошње енергије за грејање. Слична је ситуација и са потрошњом енергије за загревање санитарне топле воде (слика 55).

5.2.2.1.1. Евалуација резултата

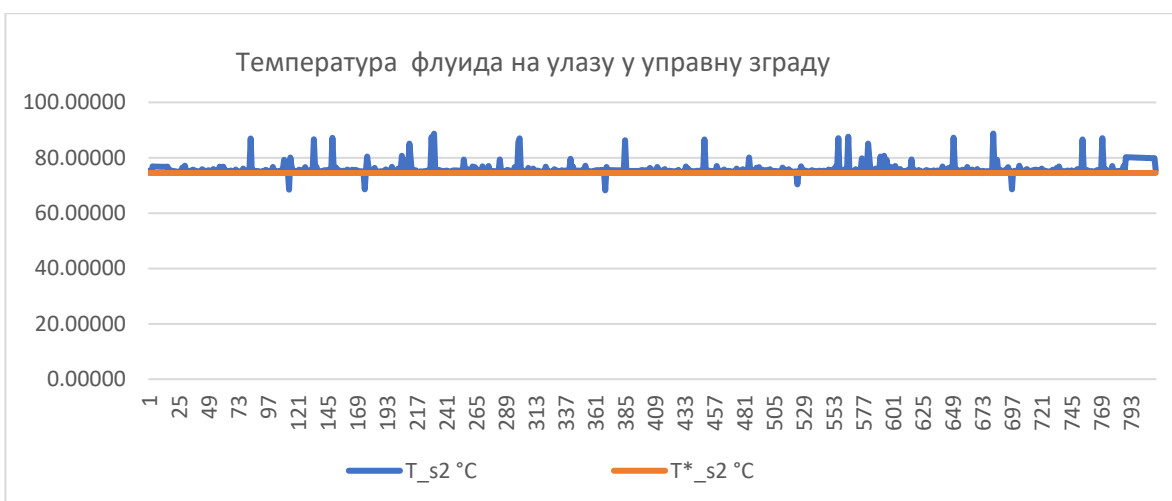
Валидација симулације потреба конзума извршена је на основу мерених вредности [217] поређењем са симулираним вредностима. Мерења изабраних величина у појединим тачкама система грејања фарме вршена су истог дана при спољашњој температури од 5 °С. Како су мерене вредности доступне само за један временски корак и познату спољашњу температуру, издвојени су резултати симулације за типичну метеоролошку годину који важе за температуру амбијента од $5 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Одговарајуће мерене величине упоређене су са симулираним величинама на местима симулираног модела која одговарају мерним тачкама реалног објекта за све временске кораке у којима се температура амбијента поклапа са измереном спољашњом температуром за време мерења на реалном објекту. Поређење резултата показало је задовољавајуће поклапање са мереним резултатима (слика 52, слика 53, слика 54).



Слика 52. Поређење мерене (T^*_boiler) и симулиране (T_boiler) температуре на излазу из котла за спољашњу температуру од $5 \pm 0,1^\circ\text{C}$.



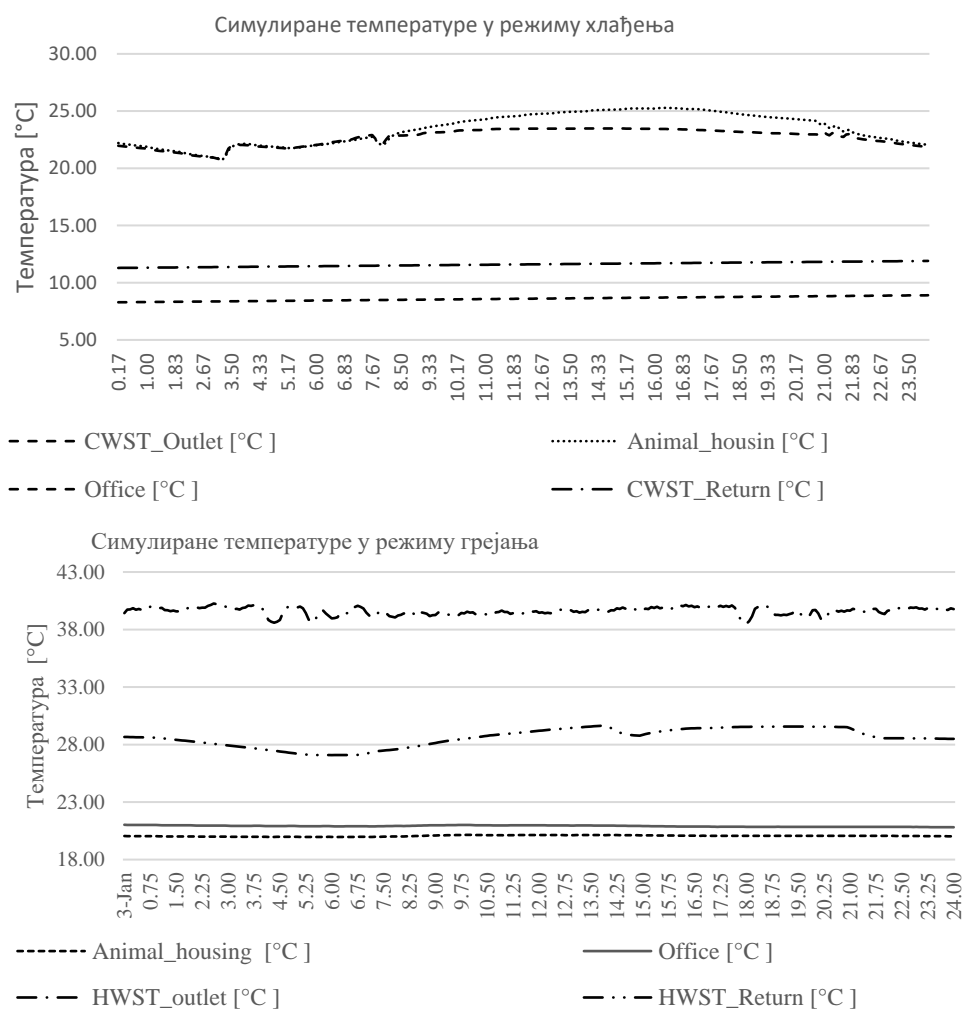
Слика 53. Поређење мерене (T_{return}^*) и симулиране (T_{return}) температуре на излазу из зграде фарме за спољашњу температуру од $5 \pm 0,1^\circ\text{C}$.



Слика 54. Поређење мерене (T_{s2}^*) и симулиране (T_{s2}) температуре на улазу у управну зграду за спољашњу температуру од $5 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Управљање системом грејања зграда за смештај животиња врши се на основу жељене унутрашње температуре дефинисане на основу препорука за фарме свиња у [202]. Физички модел снабдевања ових зграда топлотном енергијом подразумева употребу вентилатор конвектора као и удео свежег ваздуха до 30 % у режиму грејања. Претпостављено је да се у летњем режиму вентилација ових објеката врши механички применом свежег ваздуха, док се за потребе управне зграде користи компресорски чилер. На основу наведених претпоставки, извршено је моделирање и нумеричка симулација применом TRNSYS

софтвера. Унутрашња температура једне од грејаних и вентилираних зграда за смештај животиња и температура у просторијама управне зграде у току једног зимског и летњег дана представљена је на слици 55. Промена унутрашње температуре у току симулације није значајно одступала од жељене унутрашње температуре дефинисане при моделирању система управљања.



Слика 55. Симулирана температура у зимском и летњем режиму: HWST_outlet – температура радног медијума на излазу из акумулатора топлоте ка конзуму, HWST_return – температура повратног радног медијума на улазу у акумулатор топлоте, Office – Температура у управној згради, Animal housing – температура у згради за смештај животиња.

5.2.2.2. Математичко моделирање суперструктуре полигенерационог система

Модел суперструктуре полигенерационог система има својство флексибилности (тј. модуларности), тако да сваки од модула који чине суперструктуру може да допринесе делимичном или потпуном подмирењу једне или више комуналних потреба. Поред тога, у случају разматране фарме, по претпоставци, полигенерациони систем може да производи биогаз са константним приносом, и органско ђубриво као нуспроизвод процеса производње биогаза. Произведено ђубриво се може применити на сопственим обрадивим површинама, што се сматра побољшањем у односу на типичне методе ђубрења земљишта [122]. Укупна номинална снага/капацитет за грејање $P_{h,POLY}$, хлађење $P_{c,POLY}$ и производњу електричне енергије $P_{e,POLY}$ једнак је суми номиналних капацитета компонената са активним учешћем у разматраној конфигурацији:

$$P_{h,POLY} = P_{h,B} + P_{h,BCHP} + P_{h,GSHP} + P_{h,STC} + P_{h,AUX} \quad , \quad (171)$$

$$P_{c,POLY} = P_{c,GSHP} + P_{c,VCC} + P_{c,ADS}, \quad (172)$$

$$P_{e,POLY} = P_{e,BCHP} + P_{e,PV}, \quad (173)$$

где су: $P_{h,B}$ [kW] номинална снага топловодног котла, $P_{h,BCHP}$ [kW] номинални капацитет грејања биогазног когенерационог модула, $P_{h,GSHP}$ [kW] номинални капацитет грејања топлотне пумпе, $P_{h,STC}$ [kW] максимална снага соларних топлотних колектора (STC), $P_{h,AUX}$ [kW] снага постојећих додатних електричних загрејача, $P_{c,GSHP}$ [kW] номинални капацитет хлађења топлотне пумпе, $P_{c,VCC}$ [kW] номинални капацитет хлађења ваздухом хлађеног чилера, $P_{c,ADS}$ [kW] номинални капацитет хлађења адсорпционог чилера, $P_{e,BCHP}$ [kW] номинална снага биогазног когенерационог модула на вратилу генератора, $P_{e,PV}$ [kW] номинална снага система фотонапонских колектора.

Рад полигенерационог система у сваком временском кораку симулације дефинишу тренутно топлотно и расхладно оптерећење, које зависи од задатих унутрашњих температура у зградама за чување животиња и у управној згради. Уколико модули суперструктуре полигенерационог система анализирани конфигурације и капацитета не могу да подмире тренутно топлотно оптерећење и унутрашња температура у зградама за

смештај животиња падне испод 16 °C, модел подразумева употребу гасног котла за вршна оптерећења. Номинални капацитет вентилатора и пумпи система снабдевања енергијом је по претпоставци константна, док се снаге напојних пумпи полигенерационих модула мењају са номиналном снагом/капацитетом одговарајућег модула. Управљање полигенерационим системом подразумева ангажовање модула система према приоритету ангажовања ради достизања следећих параметара: температура акумулатора хладне воде 7 °C, температура акумулатора топле воде 50 °C и температура резервоара санитарне топле воде 60 °C. Управљање системом за снабдевање потрошача топлотном и расхладном енергијом подразумева непрекидно праћење унутрашњих температура и непрекидан рад система у току типичне метеоролошке године (број радних сати у току године 8760).

Поред номиналног капацитета за грејање и хлађење суперструктуре полигенерационог система без постојеће опреме (котлова и чилера), ограничен је пројектним условима. Понашање полигенерационих модула је моделирано употребом нормализованих података о понашању модула из литературе: биогасни когенерациони модул са мотором са унутрашњим сагоревањем [52, 183, 184], соларни сорпциони системи [185, 186, 187] компресорска топлотна пумпа [34, 129], фотонапонски соларни колектори [188, 189] Моделирање осталих модула суперструктуре полигенерационог система је извршено на основу података произвођача опреме, и то: соларних топлотних колектора [190], расхладних компресорских чилера [191]. Годишње енергетске перформансе сваког од модула који чине полигенерациони систем узима у обзир промену понашања (излазних променљивих моделираног уређаја) при делимичном оптерећењу, промену ефикасности модула или коефицијента перформанси (коефицијента грејања и хлађења), који су зависни од температура и протока радних медијума у систему у току сваког временског корака симулације i .

Укупне количине топлотне енергије $Q_{h,POLY}$, расхладне енергија $Q_{c,POLY}$ и електричне енергија $W_{e,POLY}$ које у току године полигенерациони систем испоручи за подмирење енергетских потреба фарме одређене су као суме испоручених количина енергије свих полигенерационих модула који чине анализирану суперструктуру полигенерационог система за n временских корака i у току типичне метеоролошке године:

$$Q_{h,POLY} = \sum_{i=1}^n (q_{hBCHP,i} + q_{hB,i} + q_{hSTC,i} + q_{hSTC,i} + q_{hGSHP,i} + q_{hAUX,i}) \quad (174)$$

$$Q_{cool,POLY} = \sum_{i=1}^n (q_{cVCC,i} + q_{cGSHP,i} + q_{cADS,i}) \quad (175)$$

$$W_{e,POLY} = \sum_{i=1}^n (w_{eBCHP,i} + w_{ePV,i}) \quad (176)$$

Годишња колилина нето испоручене електричне енергије $W_{net,POLY}$ применом анализираних суперструктура полигенерационог система се може сачунати одузимањем симулираних сопствених потрошњи модула који користе електричну енергију за свој рад $W_{uBCHP,i}$ од укупно произведене електричне енергије типичне метеоролошке године.

$$W_{net,POLY} = \sum_{i=1}^n (w_{eBCHP,i} + w_{ePV,i}) - \sum_{i=1}^n (w_{uVCC,i} + w_{uGSHP,i}) \quad (177)$$

Перформансе анализираних конфигурација полигенерационог система се пореде са перформансама постојећег енергетског система на фарми, који чине топловодни котлоу, компресорски расхладни чилер и електрични грејач за загревање санитарне топле воде. Годишња потрошња енергије постојећег система на фарми је:

$$Q_{h,a} = \sum_{i=1}^n (q_{hBa,i} + q_{hAUXa,i}) \quad (178)$$

$$Q_{c,a} = \sum_{i=1}^n (q_{cVCCa,i}) \quad (179)$$

Смањење потрошње примарне енергије за грејање $Q_{h,a}$ и хлађење $Q_{c,a}$ које се остварује применом анализираних конфигурација суперструктура полигенерационог система у поређењу са конвенционалним постојећим системом на фарми, се може сачунати према:

$$Q_{h,a} = Q_{c,POLY} - Q_{h,a} \quad (180)$$

$$Q_{c,a} = Q_{c,POLY} - Q_{c,a} \quad (181)$$

Количина доступног стајњака за производњу метана на фарми процењена је на 74,6 t дневно, а принос биогаза на 27,5 m³ по t стајњака, чиме је остварива годишња производња од 450242,1 m³. За процену, претпостављен је удео метана у биогазу од 60 %, док је когенерација на бази мотора са унутрашњим сагоревањем одабрана као најбоља [39, 122]. По претпоставци, модел подразумева да когенерациони модул користи локално

произведени биогаз, осим у случају да потрошња горива превазиђе дневну стопу локалне производње биогаза када се користи природни гас.

Количина биогаза која сагори у когенерационом модулу одређује се према:

$$Q_{ng} = \begin{cases} 0 & , \text{ за } Q_{hfCHP} + Q_{hfB} < Q_{bio} \\ Q_{hfB} + Q_{hfCHP} - Q_{bio} & , \text{ за } \text{for } Q_{hfCHP} \geq Q_{bio} \end{cases} \quad (182)$$

где је Q_{hCHPg} годишња потрошња биогаза, Q_{hfB} годишња потрошња гасног котла, Q_{hfCHP} је годишња потрошња гаса когенерационог модула, а Q_{bio} је годишња локална производња биогаза.

5.2.3. Оптимизација полигенерационог система за потребе сточарске фарме

Оптимизација конфигурације и номиналног капацитета полигенерационог система за потребе интегрисане фарме свиња врши се на основу наведених економских, енергетских и еколошких критеријума. Капацитету за производњу ђубрива додељен је секундарни значај, и сматра се могућом последицом рада одређене конфигурације полигенерационог система који обухвата когенерацију са погоном на биогаз [122, 123, 124]. Иако је продајом произведеног ђубрива могуће остварити финансијске користи, за одређивање тржишне цене ђубрива као и потреба тржишта за овим производом потребно је урадити анализу тржишта [107], што није предмет овог рада. Како фарма у свом саставу има значајну количину обрадивог земљишта на коме аплицира стајњак са фарме свиња и друге врсте ђубрива, може се сматрати да је комплетну производњу ђубрива добијену у току производње биогаза могуће искористити на пољопривредним површинама фарме. Аплицирањем овако добијеног ђубрива остварује се боља контрола количине азота и фосфора у складу са потребама земљишта и култура које се гаје на пољопривредном земљишту око фарме.

Капацитет за грејање и хлађење полигенерационог система искључујући постојећу опрему на фарми и соларне системе еквивалентан је снази пројектоване опреме што износи 1500 kW за грејање и 20 kW за хлађење. Капацитети соларних топлотних и фотонапонских система су ограничени према реално расположивом кровном простору за уградњу тих система: максимална дозвољена површина која може да буде покривена фотонапонским панелима се одређује према крову за смештај животиња и износи 9000 m², док је

максимална дозвољена површина соларног топлотног система ограничена простором на крову пословне зграде 150 m². Запремина резервоара топле воде и хладне воде су ограничене на 300 и 10 m³, респективно.

5.2.4. Примењени критеријуми оптимизације

Вредност нето садашње вредности полигенериционог пројекта је коришћена као критеријум економске оптимизације, са економским веком трајања пројекта од 12 година који одговара периоду трајања експлоатације уговора за повлашћене произвођаче електричне енергије [8, 10]. Функција циља је дефинисана максималном вредношћу нето садашње вредности, која представља функцију почетне капиталне инвестиције B_0 која се по претпоставци дешава на почетку пројекта (у години 0), и динамичке вредности годишњег новчаног тока пројекта B_t у години $t = (1, 2, 3 \dots 12)$, и дисконтне стопе d :

$$NPV = -B_0 + \sum_0^{12} B_t / (1 + d^t) \quad (183)$$

Укупни годишњи трошкови се срачунавају као сума енергетских трошкова за грејање $B_{h,r}$, хлађење $B_{c,r}$ и производњу електричне енергије B_e :

$$B_t = B_{h,r} + B_{c,r} + B_e \quad (184)$$

Годишњи трошкови енергије су функција потрошње енергије K -тог полигенериционог модула Q_{fK} , специфичне цене рада модула и C_{fK} и годишњег одржавања $B_{Ko\&m}$. Према претпоставци, локално прозведено ђубриво у току рада конфигурације са биогасним постројењем се користи на обрадивим површинама фарме, те не утиче на годишње новчане токове фарме. Годишњи трошак Q_{fK} се добија као функција симулираног понашања $q_{fK,i}$ полигенериционог модула K у току временског корака i , где је K , [$K \in (B, CHP, GSHP, STC, VCC, ADSC, VCC, PV)$].

$$Q_{fK} = \sum_{i=1}^n (q_{fK,i}) \quad (185)$$

$$B_{h,r} = Q_{fB}C_{fb} + Q_{fAUX}C_{fAUX} + B_{Bo\&m} - \sum_K (Q_{hfK}C_{fK} + B_{Ko\&m}) \quad (186)$$

$$B_{c,r} = Q_{fVCC}C_{fb} + B_{Bo\&m} - \sum_K (Q_{cfK}C_{fK} + B_{Ko\&m}) \quad (187)$$

Специфична цена рада полигенерационих модула је добијена на основу просечне цене електричне енергије на фарми [€/kWh] [39], цене природног гаса [€/kWh], док се цена оперативних трошкова и одржавања по претпоставци срачунава као удео набавне цене опреме (3-5 %). По претпоставци, усвојена је константна промена годишње цене енергије од 2,5 %. Профит који се оствари продајом енергије по повлашћеној цени B_e се срачунава на основу прописане цене електричне енергије за повлашћене произвођаче као функција инсталисане снаге система [8, 10] а за анализирану конфигурацију полигенерационог система једнак је суми годишњих добити остварене применом фотонапонског и биогасног когенерационог система:

$$B_e = B_{eBCHP} + B_{ePV} = \sum_{i=1}^n (W_{eBCHP,i} C_{eBCHP} + W_{ePV,i} C_{ePV}) \quad (188)$$

Укупна капитална инвестиција анализиране конфигурације полигенерационог система одређује се на основу цена модула који чине анализирану конфигурацију. Цене полигенерационих модула су одређене као линеарне функције капацитета датог модула (снаге, капацитета, површине соларног система или запремине акумулатора топлоте [193]). Укупна капитална инвестиција модула K суперструктуре може се срачунати као:

$$I_K = \begin{cases} C_{pK} P_K (1 + C_{sc}), & \text{for } K \in (BCHP, VCC, GSHP, ADSC, HWST, CWST, PV) \\ C_{pK} A_K (1 + C_{sc}), & \text{for } K \in (STC) \end{cases}, \quad (189)$$

где је C_{pK} [€/kW] фактор набавне цене уређаја, а C_{sc} , ($C_{sc} < 1$) цена интеграције модула у систем дата као удео набавне цене. Специфични инвестициони трошкови набавке опреме полигенерационог система за потребе анализиране фарме се могу одредити на основу фактора набавне цене уређаја из табеле 21. Садашња вредност уређаја и опреме из литературе се одређује помоћу вредности индекса набавне цене опреме [193, 194].

Табела 21. Одређивање фактора C_{pK}

Полигенерациони модул	Јединица	фактор набавне цене уређаја, C_{pK}	Литература
BCHP	[€/kW _e]	$-1.09P_{CHPe} + 3602$	[218]
ADSC	[€/kW _e]	1050	[196]
GSHP	[€/kW _h]	$-0.116P_{hp} + 218.325$	[197]
STC	[€/m ²]	265	[198]
PV	[€/m ²]	120	[199] [200]
HWST, CWST, SHWT	[€/m ³]	1050	[201]

Минимална вредност потрошње примарне енергије (PEC) анализирани конфигурације полигенерационог система у току типичне метеоролошке године, енергетски критеријум оптимизације, одређује се као збир потрошње примарне енергије његових модула K , [$K \in (B, CHP, GSHP, STC, VCC, ADSC, VCC, PV)$] у складу са [195]:

$$PEC_{poly} = \sum_K (E_{hK,PE} + E_{cK,PE}) - \sum_K E_{wK,PE}, \quad (190)$$

где је PEC_{poly} потрошња примарне енергије система, а $E_{hK,PE}$ и $E_{cK,PE}$ су потрошње примарне енергије полигенерационих модула K за грејање и хлађење, респективно, а $E_{wK,PE}$ уштеда примарне енергије која одговара локално произведеној електричној енергији применом полигенерационог модула K .

Минимална вредност емисије CO_2 , анализирани конфигурације полигенерационог система $C_{CO_2,poly}$ у току типичне метеоролошке године анализирани конфигурације полигенерационог система је трећи критеријум оптимизације система [195]:

$$C_{CO_2,poly} = \sum_K (C_{K,CO_2} - w_{K,CO_2}), \quad (191)$$

где је C_{K,CO_2} годишња еквивалентна емисија CO_2 настала као последица рада полигенерационог модула K , а w_{K,CO_2} је редукција емисије CO_2 услед локалне производње електричне енергије употребом модула K .

5.2.5. Резултати оптимизације полигенерационог система

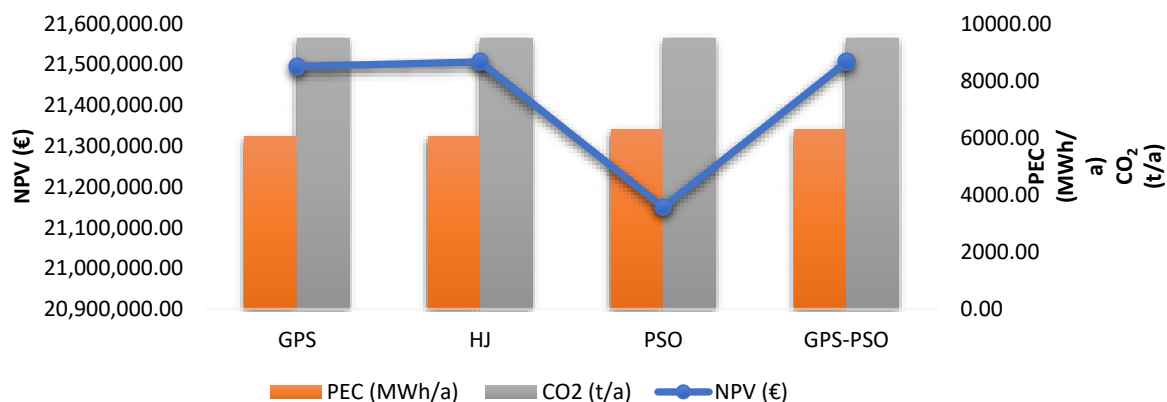
Резултати оптимизације су добијени су применом TRNSYS софтвера и Genopt [94] оптимизационих алгоритама према описаној методи. Коришћени су следећи оптимизациони алгоритми:

- (1) Општа шаблонска претрага (Generalized Pattern Search (GPS)),
- (2) Хук Џивс алгоритам (Hooke Jeeves algorithm (HJ)),
- (3) Оптимизација методом ројева честица (Particle Swarm Optimization (PSO)), и
- (4) Хибридни алгоритам Опште шаблонске претраге са PSO (Hybrid General Pattern Search with Particle Swarm Optimization (GPS-PSO)).

Табела 22. Резултати оптимизације

Критеријум		P_{CHP} (kW)	P_{GSHP} (kW)	P_{ADSC} (kW)	A_{STC} (m ²)	A_{PV} (m ²)	V_{HWST} (m ³)	V_{CWST} (m ³)
NPV	GPS	1500,0	0,00	20,00	150,00	8910,00	300,00	10,00
	HJ	1500,0	0,00	20,00	150,00	8910,00	300,00	10,00
	PSO	1500,0	0,00	20,00	150,00	8910,00	300,00	10,00
	GPS-PSO	1500,0	0,00	20,00	150,00	8910,00	300,00	10,00
PEC	GPS	1462,5	0,00	20,00	148,13	8910,00	287,50	10,00
	HJ	1462,5	0,00	20,00	145,31	8910,00	257,81	10,00
	PSO	1479,5	12,00	8,00	147,80	8910,00	300,00	10,00
	GPS-PSO	1484,9	15,05	4,95	150,00	8910,00	297,83	9,51
CO ₂	GPS	1500,0	0,00	20,00	149,06	8910,00	300,00	10,00
	HJ	1500,0	0,00	20,00	149,06	8910,00	300,00	10,00
	PSO	1500,0	0,00	20,00	148,13	8910,00	300,00	10,00
	GPS-PSO	1500,0	0,00	20,00	150,00	8910,00	300,00	10,00

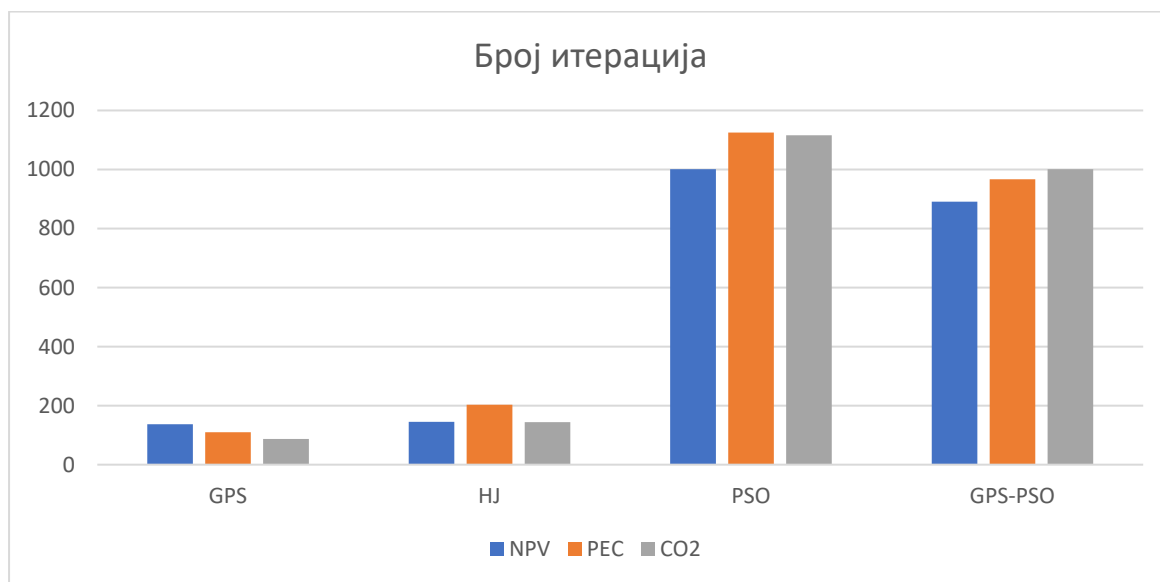
Решење оптимизације добијено на основу функција циља за срачунавање нето садашње вредности пројекта NPV, емисије CO₂ полигенераиционог система у току типичне метеоролошке године и уштеде примарне енергије PEC су приказан у табели 22. Промена вредности функције циља у току оптимизације применом тестираних оптимизационих алгоритама приказани су у Прилогу 2 на сликама 82 – 93.



Слика 56. Поредица вредности функције циља добијених различитим оптимизационим алгоритмима : вредности функције циља NPV , $C_{CO_2, poly}$ и PEC_{poly}

У табели 22 су приказани капацитети полигенераиционих модула који улазе у оптималну конфигурацију полигенераиционог система за потребе анализиране фарме (Прилог 2: од слике 94 до слике 105) Оптимално решење састоји се од биогазног

когенерационог модула (CHP) са соаларним топотним колекторима (STC) и фотонапонским колекторима (PV). Поређењем резултата добијених различитим методама јасно је да су решења врло слична, али се добијена вредност функције циља применом различитих алгоритама незнатно разликује (слика 56). На основу тога, може се закључити да тестирани оптимизациони алгоритми указују на исто решење у погледу оптималне конфигурације полигенерационог система, са занемаривом малом разликом капацитета модула који улазе у састав оптималног решења. Са друге стране, на основу разлике вредности функције циља у оптималној тачки, може се упоредити поузданост тестираних метода за налажење екстремне вредности функције циља у задатом домену. Резултати оптимизације према функцији циља дефинисаној PEC критеријумом указује на разлику у капацитетима следећих модула у оптималном решењу: на употребу топотне пумпе назнатног капацитета, промену капацитета акумулатора топле воде (HWST) до 14 % и капацитета хладне воде (CWST) до 5 %.



Слика 57. Поређења броја итерација у току оптимизације применом тестираних алгоритама

Тестирани оптимизациони алгоритми показали су сличне резултате у погледу рачунских вредности функције циља (слика 56). Применом PSO алгорита добијена је 1,7% нижа вредност максималне добијене вредности NPV функције у односу на вредности добијене HJ и GPS-PSO алгоритама. Једнака вредност PEC функције у оптималној тачки је добијена применом HJ и GPS алгоритама, при чему је та вредности за 3,6 % виша од

оптималне вредности добијене PSO алгоритмом. Вредности емисије CO₂ оптималног решења биле су једнаке применом сваког од наведених алгоритама.

Насупрот незнатне разлике у вредностима функције циља тестираних алгоритама, постоји велика разлика у брзини конвергенције тестираних алгоритама (слика 57). На основу броја итерација потребних да се дође до оптималног решења. GPS алгоритам се може сматрати најбржим. За добијање решења применом овог алгоритма потребно је свега 9,7 - 13,6 % итерација у односу на најспорији PSO алгоритам. Ипак, при коришћењу овог алгоритма потребно је водити рачуна о подешавању почетних параметара оптимизације, нарочито корака претраге, јер употреба премалог корака може да утиче да алгоритам укаже на локалну оптималну тачку. Како тестирани НЈ алгоритам представља модификацију GPS алгоритма, он такође захтева пажњу у избору корака претраге. Употребом НЈ алгоритма, добијене су вредности функције циља које се разликују за до 3,6 % од најбољег решења, при чему је број итерација за добијање решења износио 12,9 до 18 % потребних итерација применом PSO алгоритма. Хибридни GPS-PSO алгоритам је за сваку од коришћених функција циља показао најбоље екстремне вредности, међутим број итерација потребан за добијање оптималног решења био је свега 11 до 14 % мањи од броја итерација за добијање решења применом најспоријег PSO алоритма.

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљена је методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на ОИЕ. Представљен је преглед доступних полигенерационих технологија, са поређењем њихових главних карактеристика. На основу прегледа литературе о полигенерационим технологијама, дефинисане су технологије које су даље разматране у раду. Критеријуми избора полигенерационих модула који су разматрани у раду су висина трошкова почетне капиталне инвестиције, перформанси, флексибилности интеграције и доступности на домаћем тржишту. Како је реч о техно-економској оптимизацији, посебна пажња посвећена је економској анализи полигенерационих система и економским параметрима који се могу користити за њихову оцену. Извршен је избор методе и алата за математичко моделирање и нумеричко решавање математичких модела који описују понашање енергетског конзума и понашање полигенерационих система. За ове потребе изабран је софтвер TRNSYS, на основу поређења могућности и перформанси са сличним софтверима. За потребе решавања проблема оптимизације изабран је GenOpt софтвер због своје компатибилности са изабраним симулационим софтвером, оптимизационих алгоритма који се могу користити и квалитета резултата из литературе. У раду су представљени услови интеграције полигенерационих система, на основу којих се може дефинисати суперструктура полигенерационог система. Суперструктура се састоји од полигенерационих модула заснованих на унапред дефинисаним полигенерационим технологијама. Формирани су физички и математички модели енергетског конзума (модел потрошње енергије), суперструктуре полигенерационог система (производње енергије) и система за дистрибуцију енергије од произвођача до конзума. У оквиру методологије, извршен је преглед критеријума оптимизације сложених енергетских система из литературе. Успостављени су критеријуми оптимизације полигенерационих система заснованих на ОИЕ. На основу изабраних енергетских, економских и еколошких критеријума, формирана је функција циља за квантитативну оцену полигенерационих система. Извршена је анализа утицајних параметара и дефинисане су оптимизационе променљиве, које дефинишу конфигурацију и снагу полигенерационог система. На тај начин, дефинисан је оптимизациони проблем и представљена је методологија и алгоритам за његово решавање. Представљена методологија је тестирана на примеру зграде затворених пливачких базена СРЦ „Дубочица“

у Лесковцу и сточарске фарме „ Халово“ код Зајечара. За наведене објекте, извршена је интеграција суперструктуре полигенерационог система, физичко моделирање и математичко моделирање и нумеричка симулација енергетског конзума и суперструктуре полигенерационог система. Због феномена исхлапљивања и његовог утицаја на енергетско понашање зграда затворених пливачких базена, извршено је унапређење постојећих модела симулације ове врсте објеката у складу са изабраним методама моделирања и симулације. Формирана је корелација за апроксимацију количине исхлапеле воде са јединичне површине затвореног пливачког базена, на основу резултата спроведених вишедневних мерења у базенској хали СРЦ „Дубочица“. Применом формираног модела базена, и базенске хале, добијени су резултати симулације са задовољавајућим поклапањем са измереним вредностима. Слично, у раду су представљени и физички и математички модели енергетског конзума фарме. Извршена је интеграција полигенерационог система за потребе фарме, као и физичко и математичко моделирање и нумеричка симулација годишњег понашања полигенерационог система. Валидација модела енергетског конзума фарме извршена је на основу мерења карактеристичних величина у систему грејања фарме, у складу са могућностима, на основу којих је поређењем са симулираним вредностима извршена валидација модела.

Нумеричко решавање оптимизационих проблема извршено је применом изабраних GenОрт алгоритама, који су описани у раду. Резултати техно-економске оптимизације по изабраним критеријумима добијени применом изабраних метода су искоришћени за поређење ефикасности изабраних оптимизационих метода за проблеме оптимизације полигенерационих система. На основу анализе резултата, може се закључити да GPS и HJ методе значајно брже конвергирају у односу на PSO и хибридну GPS-PSO методу. Ипак, треба нагласити да наведене методе са бржом конвергенцијом не дају увек глобално решење. Код примене ових метода, потребно је посветити посебну пажњу код дефинисања оптимизационог корака и проверити решења применом различитих временских корака како би се повећала поузданост добијеног решења. Иако се применом PSO и хибридне GPS-PSO методе до конвергенције решења долази знатно спорије, ове методе се могу сматрати поузданијим. Хибридна GPS-PSO метода се може сматрати најбољом, јер је за разматране проблеме давала решења тачке глобалне екстремне вредности функције циља.

Представљена методологија техно-економске оптимизације коришћена је за анализу јавног и пољопривредног објекта, где су енергетске потребе грејање и хлађење простора, потрошња санитарне топле воде и употреба електричне енергије. Поред јавних објеката, методологија је применљива и за техно-економску оптимизацију друге врсте објеката и индустријских система. Такође, интеграција суперструктуре вршена је помоћу модула који су применљиви за производњу топле и хладне воде, али не и производњу паре и потребе замрзавања. С тим у вези, могуће је унапређење методологије укључивањем модула за наведене потребе (пара, замрзавање) које су биле ван области истраживања представљеног у оквиру овог рада.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Risto L., Aiyang R., Role of polygeneration in sustainable energy system development challenges and opportunities from optimization viewpoints 2016, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, pp. 363–372.
- [2] Khan E. U. , Martin A. R., Optimization of hybrid renewable energy polygeneration system with membrane distillation for rural households in Bangladesh, 2015, *Energy* 93, pp. 1116–1127.
- [3] Adams T. A., Ghouse J. H., Polygeneration of fuels and chemicals, 2015, *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 10, pp. 87–93.
- [4] Lior N., Thoughts about future power generation systems and the role of exergy analysis in their development, 2002, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2069-2077.
- [5] Gianfranco C., Pierluigi M., A unified model for energy and environmental performance assesment of natural gas-fueled poly-generation systems, 2008, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2069-2077.
- [6] Henning D., Shahnaz A., Holmgren K., Modeling and optimization of electricity steam and district heating production for local Swedish utility, 2006, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, pp. 1224-1247.
- [7] Ortiga Guillen J., Modelling Environment for the Design and Optimization of Energy Polygeneration Systems. Tarragona : Universitat Rovira i Virgili, Department of Mechanical Engineering, 2010. Vol. Doctoral thesis.
- [8] Uredba o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije, na osnovu člana 59. stav 6, Zakona o energetici. s.l. : lužbeni glasnik RS, br. 57/11, 80/11 - ispravka 93/12 i 124/12.
- [9] Živković D., Milčić D., Mančić M., Moderne tehnologije za male i mikro trigeneracione sisteme, 2011. Četrdeset i drugi međunarodni kongres i izložba o grejanju, hlađenju i klimatizaciji.
- [10] Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije, na osnovu člana 56 zakona o energetici. s.l. : Službeniglasnik RS, br. 57/11, 80/11 - ispravka 93/12 i 124/12.

- [11] Chicco G., Mancarella P., Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: Models and indicators, 2011, Applied Thermal Engineering, 31, pp. 2292-2300.
- [12] Chicco G., Mancarella P., Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: Analysis techniques and application cases, 2008, Energy, 33, pp. 418–430.
- [13] Capata R., Saracino G. Foz do Iguaçu, Paraná , The Ultra-Micro Gas Turbine Generator Project at UDR1: Experimental Assessment of the Compressor Map and of the Pressure Losses at the Regenerative Combustion Chamber, Brazil, 2009. Proceedings of the 2nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. pp. 2069-2078.
- [14] Pilavachi P.A., Mini and micro-gas turbines for combined heat and power. 2002, Applied Thermal Engineering, 22, pp. 2003–2014.
- [15] Onovwionaa H.I., Ugursal V.I., Residential cogeneration systems: review of the current technology, 2006, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10, pp. 389-431.
- [16] Pongsid S., Satha A., Supachart C., A review of absorption refrigeration Technologies, 2001, Renewable and Sustainable Energy Reviews 5, pp. 343–372.
- [17] Wongsuwan W., Kumar S., Neveu P., Meunier F., A review of chemical heat pump technology and applications, 2001, Applied thermal Engineering 21, pp. 1489 – 1519.
- [18] K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, Advances in heat pump systems: A review, 2010, Applied Energy 87, pp. 3611–3624.
- [19] Ziegler F., Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems. 1999, International Journal of Thermal Science, 38, pp. 191-208.
- [20] Anyanwu, E.E., Review of solid adsorption solar refrigerator I: an overview of the refrigeration cycle, 2003, Energy Conversion and Management 44, pp. 301–312.
- [21] Srivastava N.C., Eames I.W, Review of adsorbents and adsorbates in solid±vapour adsorption heat pump systems, 1998, Applied Thermal Engineering 18 , pp. 707-714.
- [22] Stanek W., Gazda W., Exergo ecological evaluation of adsorption chiller system, 2014, Energy , p. 7.
- [23] Kalogirou S., Recent Patents in Solar Energy Collectors and Applications, 2007, Recent Patents on Engineering 1 , 23, pp. 23-33.

- [24] Milosavljević D., Proučavanje energetske efikasnosti solarnih elektrana u Republici Srbiji i Republici Srspkaj, Niš : Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, 2013. Doktorska disertacija.
- [25] Lukić N., Babić M. Solarna Energija. Kragujevac : Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.
- [26] Debruyne A.B., Integration of Combined heat and power generators into small buildings A transient Analysis approach, Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2006. A theses presented to University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- [27] Piacentino A., Cardona F., EABOT – Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming, 2008, Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 3006–3016.
- [28] Hasnain, S. M., Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques, 1998, Energy Conversion and Management 39, 11, pp. 1127-1138.
- [29] Persson J., Westermark M., Low energy buildings and seasonal thermal energy storages from a behavioural perspective, 2013, Applied energy 112, pp. 975-980.
- [30] Šamšalović S., Toplotna Pumpa Tehnologija održive proizvodnje energije. Beograd, SMEITS, 2009.
- [31] Kasuda T., Arhcnbach Pr., Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United states, 1965, ASHRAE Transactions , p. 71.
- [32] Cleasson J., Eskilson. P., Conductive heat extraction to a deep borehole: thermal analyses and dimensioning rules, 1988, 13, Energy, pp. 509-527.
- [33] Biagio M., Gaetano C., Vincenzo Raucci, Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different Climates, 2014, Energy conversion and Management 88, pp. 189-198.
- [34] Aste N, Adhikari R.S., Manfren M., Cost optimal analysis of heat pump technology adoption in residential reference buildings. 2013, Renewable Energy, Vol. 60, pp. 615-624.
- [35] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., Thermal Design and Optimization. New York : John Wiley & Sons, INC., 1995.
- [36] Grković V., Jovanović A., Termoenergetska postrojenja - projektovanje, tehnologija rada i upravljanje rizicima. Novi Sad : FTN izdavaštvo, 2011.

- [37] Mitrović D., Tehno-ekonomska optimizacija postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije. Niš : Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, 2004. doktorska disertacija.
- [38] Stojiljkovic M., Stojiljkovic M., Blagojevic B., Multi-Objective Combinatorial Optimization of Trigeneration Plants Based on Metaheuristics. 12, 2014, ENERGIES, Vol. 7, pp. 8554-8581.
- [39] Mančić M., Živković D., Vukadinović B., Čosović A., Techno-economic optimization of energy supply of a livestock farm, 2, 2015, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Working and Living Environmental Protection, Vol. 12, pp. 199-216.
- [40] Sudipta D., Kuntal J., Sustainable polygeneration design and assessment through combined thermodynamic, economic and environmental analysis, 2015, Energy 91, pp. 540-555.
- [41] Gowtham M., Uday K., Manoj K. P., Andrew Martin, A novel solar thermal polygeneration system for sustainable production of cooling, clean water and domestic hot water in United Arab Emirates: Dynamic simulation and economic evaluation, 2015, Applied Energy, p. (in press).
- [42] Zhang B., Qibin L., Jing L., Hongqiang L. Bai Z., Hongguang Jin, A polygeneration system for the methanol production and the power generation with the solar–biomass thermal gasification., 2015, Energy Conversion and Management, Vol. 102, pp. 190–201.
- [43] Kuntal J., Sudipta D., Techno-economic evaluation of a polygeneration using agricultural residue – A case study for an Indian district, 2015, Bioresource Technology, Vol. 181, pp. 163–173.
- [44] Kuntal J., Sudipta D., Polygeneration using agricultural waste: Thermodynamic and economic feasibility study, 2015, Renewable Energy, Volume 74, pp. 48–660.
- [45] Lythcke-Jørgensen C., Haglind F., Design optimization of a polygeneration plant producing power, heat, and lignocellulosic ethanol, 2015, Energy Conversion and Management, Volume 91, pp. 353–366.
- [46] Raymond R. T., Cayamanda C. D., Kathleen B. A., P-graph approach to optimal operational adjustment in polygeneration plants under conditions of process inoperability, Volume 135, Applied Energy, pp. 402–406.
- [47] Serra M. L., Lozano M., Ramos J., Ensinas A. V., Nebra S. A., Polygeneration and efficient use of natural resources, 2009, Energy 34, pp. 575–586.

- [48] Piacentino A., Barbaro C., Cardona F., Promotion of polygeneration for buildings applications through sector- and user-oriented “high efficiency CHP” eligibility criteria, 2014, *Applied Thermal Engineering*, Volume 71, pp. 882–894.
- [49] Jianyun Z., Pei L., Zhe Z., Linwei M., Zheng L., Weidou N., A mixed-integer nonlinear programming approach to the optimal design of heat network in a polygeneration energy system, 2014, *Applied Energy*, Vol. 114, pp. 146-154.
- [50] Glavan I., Prelec Z., The analysis of trigeneration energy systems and selection of the best option based on criteria of GHG emission, cost and efficiency, 3, 2012, *Engineering Review*, Vol. 32, pp. 131-139.
- [51] Mančić M., Živković D., Đorđević M., Todorović M., Pavlović S., Comparison of performances of micro hybrid trigeneration systems for energy demands of a small residential building, Zrenjanin, 2013. *The Proceedings of the III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection*. pp. 388-393.
- [52] Tora A. E., Mahmoud M. E.H., Integrated conceptual design of solar-assisted trigeneration systems, 2011, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 35, pp. 1807-1814.
- [53] Tora A. E., Integration and optimization of trigeneration systems with solar energy, biofuels, process heat, and fossil fuel, Texas A&M University, 2010.
- [54] Amir H. Nosrat, Lukas G. Swan, Joshua M. Pearce, Improved performance of hybrid photovoltaic-trigeneration systems over photovoltaic-cogen systems including effects of battery storage, 2013, *Energy*, Vol. 49, pp. 366-374.
- [55] Sau M. L., Chi W. H., Integration of trigeneration system and thermal storage under demand uncertainties, 2010, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 2868–2880.
- [56] Mago P.J., Chamra L.M., Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations, 2009, *Energy and Buildings*, Vol. 41, pp. 1099–1106.
- [57] Mančić M., Živković D., Milosavljević P., Todorović M., Mathematical Modeling and Simulation of the Thermal Performance of a Solar Heated Indoor Swimming Pool, 3, 2014, *Thermal Science*, Vol. 18, pp. 999-1010.
- [58] Jovanović G., Živković D., Mančić M., Stanković S., Stanković D., Stefanović V., Mitković P., A model of a Serbian energy efficient house for decentralized electricity production, 2013, *Journal of Renewable Sustainable Energy*, Vol. 5, p. 14.

- [59] Mančić M., Živković D., Stefanović V., Đorđević M., Review of Software for Simulation And Optimization Of Energy Systems, Soko Banja, Serba, 2011. Proceedings, 15th Symposium on Thermal Engineering in Serbia, Simterm 2011. pp. 113-126.
- [60] Arosio S., Guilizzoni M., Pravettoni F., A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy, 14-15, 2011, Applied Thermal Engineering (2011), Vols. Volume 31,, pp. 2292–2300.
- [61] Rong A., Lahdelma R., An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration, 2005, Applied Energy, Vol. 82, pp. 40–63.
- [62] Liu P., Pistikopoulos E., Li Z., A multi-objective optimization approach to polygeneration energy systems design: Process Systems Engineering, Vol 56, 5, pp 1218-1234, 2009, Vol 56, 5, pp 1218-1234.
- [63] Reini M., Buoro D., Covassin C., Nardi A. D., Pinamonti P., Optimization of a distributed trigeneration system with heating micro-grids for an industrial area, 2011, 2nd European Conference on Polygeneration, 2011 – Tarragona, Spain.
- [64] Lozano M.A., Ramos J. C., Serra L. M., Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints, 2010, Energy, Vol. 35, pp. 794–805.
- [65] Carvalho M., Lozano M.A., Serra L.M., Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects, 2012, Applied Energy, Vol. 91, pp. 245–254.
- [66] Lozano M. A., Carvalho M., Serra L. M., Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems. 2009, Energy, Vol. 34, pp. 2001–2008.
- [67] Carvalho M., Serra L.M., Lozano M. A., Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints, 2011, Energy, Vol. 36, pp. 3779-3790.
- [68] Buoro D., Casisi M., Pinamonti P., Optimization of Distributed Trigeneration Systems Integrated with Heating and Cooling Micro-grids, 2, 2011, Distributed Generation and Alternative Energy Journal, Vol. 26, pp. 7-33.
- [69] Lozano M. A., Ramos J.C., Carvalho M., Serra L. M., Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings, 2009, Energy and Buildings, Vol. 41, pp. 1063–1075.

- [70] Hongwei L., Razi N., Haldi P. A, Thermal-economic optimization of a distributed multi-generation energy system—A case study of Beijing, 2006, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 709-719.
- [71] Liu P., Gerogiorgis D., Pistokopoulos E., Modeling and optimization of polygeneration energy systems, Catalysis Today, Volume 127, 1–4, 2007.
- [72] Ghaebi H., Saidi M.H., Ahmadi P., Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm, 2012, Applied Thermal Engineering, Vol. 36, pp. 113-125.
- [73] Rentizelas A., Tatsiopoulou I.P., Tolis A., An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply, 2009, biomass and bioenergy, Vol. 33, pp. 223 – 233.
- [74] Kavvadias K.C., Maroulis Z.B., Multi-objective optimization of a trigeneration plant, 2010, Energy Policy, Vol. 38, pp. 945–954.
- [75] Jiangjiang W., Zhiqiang (J.) Z., Youyin J., Chunfa Z., Optimization design of BCHP system to maximize to save energy and reduce environmental impact, 2010, Energy, Vol. 35, p. 3388e3398.
- [76] Pistokopoulos E. N., Liu P., Georgiadis M.C., Modelling and Optimization Issues of the Energy Systems of the Future, 2010, Chemical Engineering Transactions 21.
- [77] Savola T., Fogelhom C.-J., MINLP optimization model for increased power production in small scale CHP plants, 2007, Applied Thermal Engineering 27, pp. 89-99.
- [78] Sevilgen S. H., Sancar O., Economical analysis of trigeneration system, 5, 2011, International Journal of the Physical Sciences, Vol. 6, pp. 1068-1073.
- [79] Wang J., Jing Y., Zhang C., Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm, 2010, Applied Energy, Vol. 87, pp. 1325–1335.
- [80] Vallianou V. A., Frangopoulos C. A., Dynamic Operation Optimization of a Trigeneration System, 4, 2012, International Journal of Thermodynamics (IJoT), Vol. 15, pp. 239-247.
- [81] Fahad A. Al-Sulaiman, Ibrahim Dincer, Feridun Hamdullahpur, Thermo-economic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II – Applications, 2013, Energy Conversion and Management, Vol. 69, pp. 209-216.
- [82] Cardona E., Piacentino A., Cardona F., Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems, 2006, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 3530–3542.

- [83] Mančić M., Živković D., Stefanović V., Todorović M., Research of micro-trigeneration systems based on renewable energy sources, Beograd : SMEITS, 2013. 43. International congress on Heating, Ventilation and Climatization. pp. 33-42.
- [84] Piacentino A., Cardona F., EABOT - Energetic analysis as a basis for robust optimisation of trigeneration systems by linear programming, 2008, Energy conversion and management 49, pp. 3006-3016.
- [85] Elmegaard B., Simulation of Boiler Dynamics – Development, Evaluation and Application of General energy Symulation Tool. s.l. : Technical university of Denmark, 1999. PhD thesis.
- [86] Elmegaard B., Houbak N., Software for the Simulation of Power Plant Processes - Part A, Berlin : s.n., 2002. Proceedings of ECOS 2002.
- [87] Elmegaard B., Houbak N., Robust Implementation of Process Simulators and Their Associated Models. Enschede, The Netherlands : s.n., 2000. Proceedings of ECOS 2000.
- [88] ASHRAE. ASHRAE Handbook -

- [95] Živkovic D., Software for the simulation processes in CHP plants, Soko Banja, Serbia : Simterm, 2007. Proceedings 13th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia – SIMTERM 2007.
- [96] Živkovic D., Simulation of the cogeneration plant “Avedoreverket” – Unit 1 with DNA, Gate Cycle and United Cycle programmes Soko Banja, Serbia : Simterm, 2007. Proceedings 13th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia – SIMTERM 2007.
- [97] Crawley D.B., Lawrie L.K., Pedersen C.O., Liesen R.J., Fisher D.E., Strand R.K., ENERGYPLUS, A New-Generation Building Energy Simulation Program, R.D. 1, 99, Proceedings of Building Simulation, Vol. 1, pp. 81-88.
- [98] Lucas L., Hybrid heating and cooling system optimization with TRNSYS, MSc thesis, University of Strathclyde Engineering, 2008.
- [99] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. [Online] [04. 20. 2011.]
- [100] Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Curtis O. Pedersen, Frederick C. Winkelmann, EnergyPlus: Energy Simulation Program., 4, 2000, ASHRAE Journal online, Vol. 42, pp. 49-56.
- [101] <http://www.homerenergy.com/software.html/>. [Online] [3. 15. 2011.]
- [102] Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R., Simulation and Optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, 1, 2009, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 2111-2118.
- [103] Klein S.A., Beckman W.A., Mitchell J.W., Duffie J.A., Duffie N.A., Freeman T.L., Mitchell J.C, Braun J.E., Evans B.L., Kummer J.P., Urban R.E., Fiksel A., Thornton J.W., Blair N.J., Williams P.M., Bradley D.E., McDowell T.P., Kummert M., Arias D.A., TRNSYS 17, a Transient System Simulation program. Wisconsin-Madison : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2014.
- [104] Breckman W., Broman L., Fiksel A., Klein S., Lindberg E., Schuler M., Thornton J., Trnsys the most complete solar energy system modeling and simulation software. 1, 1994, Renewable Energy, Vol. 5, pp. 486-488.
- [105] Jeff S. Haberl, P.E. Sooyeon Cho. Literature review of uncertainty of analysis methods (DOE-2 Program). s.l. : Texas Commission on Environmental Quality, 2011.

- [106] Duffy M. J., Hiller M., Bradley D. E., Keilholz W., Thornton J.W., TRNSYS – features and functionality for building simulation, Glasgow, Scotland, 2009. Eleventh International IBPSA Conference Glasgow.
- [107] Paunović B., Zipovski D., Poslovni plan, vodič za izradu. Beograd : Centar za izdavačku delatnost Ekonomskog faklteta u Beogradu, 2011.
- [108] Short W., Packey D. J., Hold T., A manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. Golden, Colorado : Natianal Renewable Energy Laboratorz, A nataional laboratory of the U.S. Department of Energy, 1995.
- [109] Karamarkovic V., Matejić M., Brdarevic Lj., Stamenić M., Ramić B., Uputstvo za pripremu projekata u oblasti energetske efikasnosti u opštinama. Beograd : Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, 2008.
- [110] Mirasgedis S., Tourkolias C., Pavlakis E., Diakoulak D., A methodological framework for assessing the employment effects associated with energy efficiency interventions in buildings, 2014, Energy and Buildings, pp. 275-286.
- [111] Khoshogftar M. M.H., Khamis A. S., Midpour M. A., Hamedi M.H., A new targeting method for estimation of cogeneration potential and annualized cost in process industries, 2013, Chemical engineering research and design 9,1, pp. 1039-1049.
- [112] Duffie J.A., Beckman W.A., solar engineering of thermal processes, Willey and Sons, Inc., 2013.
- [113] Krasulja D., Ivanišević M., Poslovne Finansije. Boagrad: Ekonomski fakultet Beograd, 2000.
- [114] Petrović A., Budimir N., Vasović D., Stanković M., Stefanović N., Procena usluga u planiranju i izgradnji, Beograd : ETA, 2009.
- [115] Petković Lj., Numerička analiza. Niš : Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2003.
- [116] Sandberg P., Soderstrom M., Industrial energy efficiency: the need for investment decision support from a manager perspective, 2003, Energy Policy, Vol. 31, pp. 1623–1634.
- [117] Breale R.A. , Myers S. C., Allen F., Principles of Corporate Finance, New York, USA : McGraw-Hill/Irwin, 2011.
- [118] Pearce D., Atkinson G., Mourato S. C., Cost-benefit Analysis and the Environment - Recent developments, Paris, France, Organisation for Economic co-operation and development - OECD Publishing, 2006.

- [119] Hanley N., Spash C. L., Environment and the Cost-Benefit Analysis, Massachusetts, USA : Edward Elgar Publishing Inc., 2003.
- [120] Santos G. H. , Mendes N., Analysis of numerical methods and simulation time step effects on the prediction of building thermal performance, 2004, Applied Thermal Engineering 24, 8, pp. 1129–1142.
- [121] Meteororm. Global Meteorological Database Handbook version 7, The meteorological Reference for Solar Energy Applications, Building Design, Heating & Cooling Systems, Education Renewable Energy System Design, Agriculture and Forestry, Environmental Research, Meteororm, 2015.
- [122] Živković D., Mančić M., Todorović M., Stojanović A., Application of biogas based cogeneration to improve energy efficiency and competitiveness of agricultural farms, Sokobanja, Serbia, 2015. Proceedings of the 17th , Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia SIMTERM 2015. pp. 305-319.
- [123] Slobodan C. M., Kaluđerović-Radoičić T. S., Kragić R. B., Kijevčanin M. Lj., Electricity production from biogas in Serbia - assessment of emissions reduction, OnLine-First Issue 00, 2015, Thermal Science, pp. 189-189.
- [124] Mančić M., Živković D., Todorović M. Techno-Economic Optimization of a Biogas Cogeneration System, Nis, 2015. Proceedings of the 3rd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century. pp. 67-70.
- [125] Liu P., Georgiadis M.C., Pistokopoulos E. N., Advances in Energy Systems Engineering, 2011, Industrial & Engineering Chemistry Research, 50, 9, pp. 4915-4926.
- [126] Stefanović V., Mančić M., Pavlović S., Ilić M., Đorđević M., Eksperimentalno hibridno laboratorijsko poligeneraciono postrojenje sa primenom solarne energije. Niš : Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, 2016, Novo laboratorijsko postrojenje razvijeno u okviru projekta III42006: Istraživanje i razvoj energetske i ekonomske visokoefektivne sistema poligeneracije zasnovanih na obnovljivim izvorima energije.
- [127] Mančić M., Živković D., Milan Đorđević, Rajić M., Optimization of a polygeneration system for energy demands of a livestock farm, 2016, Thermal science, 20, Suppl. 5, pp. S1285-S1300.

- [128] Loutzenhieser P., Manz H., Maxwell G., Empirical Validations of Shading/Daylighting/Load Interactions in Building Energy Simulation Tools. International Energy Agency, 2007. SHC Task 34 / ECBCS Annex 43 Project C.
- [129] Banister C.J., Wagar W. R., Collins M. R., Validation of a single tank, multi-mode solar-assisted heat pump TRNSYS model, 2014, Energy Procedia, Vol. 48, pp. 499-504.
- [130] Safa A. A., Fung A. S., , Kumar R., Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation, 2015, Renewable Energy, 83, pp. 565 - 575.
- [131] Massaguer E., Massaguer A., Montoro L., Gonzalez J.R., Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of thermoelectric generators, 2014, Applied Energy, 134, pp. 65-74.
- [132] Vuong E., Kamel R. S., Fung A.S., Modelling and Simulation of BIPV/T in EnergyPlus and TRNSYS, 2015, Energy Procedia, 78, pp. 1883-1888.
- [133] Guarino F. , Celluraa M., Longoa S., Gulotta T., Mistretta M., Tumminia G., Ferraro M., Antonucci V., Integration of Building Simulation and Life Cycle Assessment: A TRNSYS Application, 2016, Energy Procedia, 101, pp. 360-367.
- [134] Junliang C., Jing L., Xiaoxin M., A united WRF/TRNSYS method for estimating the heating/cooling load for the thousand-meter scale megatall buildings, 2017, Applied Thermal Engineering, 114, 5, pp. 196-210.
- [135] Ming L., , Wasim S., Frank B., Computer simulation with TRNSYS for a mobile refrigeration system incorporating a phase change thermal storage unit, 2014, Applied Energy, 132, pp. 226-235.
- [136] Asim M., , Dewsbury J., Kanan S., TRNSYS Simulation of a Solar Cooling System for the Hot Climate of Pakistan, 2016, Energy Procedia, 91, pp. 702-706.
- [137] Pärtscha P., Merckera O., Oberdorferb P., Bertrama E., Tepea R., Rockendorf G., Short-term experiments with borehole heat exchangers and model validation in TRNSYS, 2015, Renewable Energy, 74, pp. 471-477.
- [138] Chargui R., Sammouda H., Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software, 2014, Energy Conversion and Management, 81, pp. 384-399.

- [139] Chargui R., Sammouda H., Farhat A., Numerical simulation of a cooling tower coupled with heat pump system associated with single house using TRNSYS, 2013, *Energy Conversion and Management*, 75, pp. 105-117.
- [140] Shrivastava R.L., Vinod K., Untawaleb S.P., Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective, 2017, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 126-143.
- [141] Bruno R., Pizzuti G., Arcuri N., The Prediction of Thermal Loads in Building by Means of the EN ISO 13790 Dynamic Model: A Comparison with TRNSYS, 2016, *Energy Procedia*, 101, pp. 192–199.
- [142] Wetter M., GenOpt(R) Generic Optimization Program. s.l. : University of California, Simulation Research Group, Building Technologies Department, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, 2011.
- [143] Directive 2004/8/EC of the European parliament and of the council on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. The European Parliament and Council. 2004, *Official Journal of the European Union*.
- [144] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. The European Parliament and Council. 2012, *Official Journal of the European Union*.
- [145] Chapra R.P., Canale S.C., *Numerical Methods for Engineers with Personal Computer*. New York : McGraw-Hill, 1985.
- [146] Witter, M., GenOpt, Generic Optimization Program. Berkeley, CA94720 : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [147] Wetter, M., Design Optimization with GenOpt, 2000, *Building Energy Simulation User News*, Vol. Vol. 21, pp. 19-28.
- [148] Trianti-Stourna, E., Spyropoulou, K., Theofylaktos, C., Droutsas, K., Balaras, C.A., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.N., Lazaropoulou, G., Papanikolaou, N., *Energy Conservation Strategies for Sports Centers: Part B. Swimming Pools*, 27, 1998, *Energy and Buildings*, pp. 123-135.

- [149] Lam, C. J., Chan, W.W., Life Cycle Cost Analysis of Heat Pump Application for Hotel Swimming Pools, 42, 2001, Energy Conversion and Management, pp. 1299-1306.
- [150] Hahne E., Kübler R., Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools, 1, 1994, Solar Energy, Vol. 53, pp. 9-19.
- [151] Heiselberg Z., P Li, CFD Simulations for Water Evaporation and Airflow Movement in Swimming Baths. Aalborg, Denmark : Aalborg University, 2005.
- [152] Sun P., Wu Y. J., Xu X. Y., Analysis of Indoor Environmental Conditions and Heat Pump Energy Supply Systems in Indoor Swimming Pools, 43, 2011, Energy and Buildings, pp. 1071-1080.
- [153] Lee W. S., Kung, C. K, Optimization of Heat Pump System in Indoor Swimming Pool Using Particle Swarm Algorithm, 28, 2008, Applied Thermal Engineering, pp. 1647-1653.
- [154] Asdrubali, F., A Scale Model to Evaluate Evaporation from Indoor Swimming Pools, 41, 2009, Energy and Buildings, pp. 311-319.
- [155] Czernecki, J. T., A Method of Heating Swimming Pools by Solar Energy, 7, 1963, Solar Energy, Vol. 1, pp. 3-7.
- [156] Szeicy, G., McMonagle, R. C., Heat Balance of Urban Swimming Pools, 3, 1983, Solar Energy, Vol. 30, pp. 247-259.
- [157] Ilić S., Lepotić B., Building Solar Heating Systems in Republic of Serbia, Beograd : Ministry of Energy, Development and Environment, Report of the UNDP - United Nations Development Program, 2012.
- [158] Rehau Solect, System Design for Solar Thermal Technique, Technical information 897600 RS. Belgrade, Serbia : Rehau, 2010.
- [159] Todorović, B., Klimatizacija. Beograd : SMEITS, 1998.
- [160] Recknagel, H., Sprenger, E., Grejanje i Klimatizacija. Belgrade, : Građevinska knjiga, 1982.
- [161] Živković D., Milčić D., Stefanović V., Mančić M., Pavlović S., Analysis of Energy Efficiency of Indoor Swimming Pools Using the Energy Balance Method. Belgrade, 2012. Proceedings, 43th International Congress on Heating, Ventilation and Air Conditioning KGH 2012, .

- [162] Živković D., Mančić M., Milosavljević P., Todorović M., Pejović D., Stanković B., Energy Efficiency Increasing of Indoor Swimming Pools Using Solar Technology, Soko Banja, Srbija, 2013. Proceedings 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia.
- [163] Biermayr P., Weiss W., Potential of Solar Thermal in Europe, Report. Vienna : AEE – Institute for Sustainable Technologies, Vienna University of Technology, Report prepared within the 6th framework of the EU-funded project RESTMAC, REN/05/FP6EN/S07.58365, 2005.
- [164] Mančić M., Živković D., Manojlović J., Todorović Mi., Mathematical Models for Evaluating Evaporation Rates from Free Water Surface of Indoor Swimming Pools, Soko Banja, 2013. Proceedings 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia.
- [165] Solar Energy Laboratory. Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild. Wisconsin, Madison, USA : University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [166] ASHRAE (HVAC Application Handbook. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1999.
- [167] Auer T., Assesment of an indoor or outdoor swimming pool, TRNSYS-TYPE 144. s.l. : Transsolar, Energietechnik GMBH, 1996.
- [168] Smith C. C., Lof, G., Jones, R., Measurement and Analysis of Evaporation from an Inactive Outdoor Swimming Pool, 1, 1994, Solar Energy, Vol. 68, pp. 77-89.
- [169] Shah, M., Prediction of Evaporation from Occupied Indoor Swimming Pools, 2003, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 707-7013.
- [170] Shah, M., Improved Method for Calculating Evaporation from Indoor Water Pools, 2012, Energy and Buildings, Vol. 49, pp. 306-309.
- [171] Dalton, J., Experimental Essays on the Constitution of Mixed Gases; on the Force of Steam or Vapor from Water and Other Liquids in Different Temperatures , Both in a Torricellian Vacuum and in Air.
- [172] Ruiz, E., Martinez P. J., Analysis of an Open-Air Swimming Pool Solar Heating System by Using an Experimentally Validated TRNSYS Model, 2010, Solar Energy, Vol. 84, pp. 116-123.
- [173] Tang, R., Etzion, Y., Comparative Studies on the Water Evaporation Rate from a Wetted Surface and that from a Free Water Surface, 2004, Building and Environment, Vol. 84, pp. 77-86.

- [174] Bowen, I. S., The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from Any Water Surface, 1926, *Physical Review*, Vol. 27, pp. 779-787.
- [175] Li Y., Heiselberg P., CFD Simulations for Water Evaporation and Airflow Movement in Swimming Baths, Report for the project "Optimization of Ventilation System in Swimming Bath". Aalborg : Aalborg University, Denmark, 2005.
- [176] Moghiman M., Jodat A., Effect of Air Velocity on Water Evaporation Rate in Indoor Swimming Pools, 2007, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 8.
- [177] Vinnichenko N. A., Uvarov A. V., Vetukov D. A., Plaksina Y. Y, Direct Computation of Evaporation Rate at the Surface of Swimming Pool, Corfu island, Greece, 2011. In *Recent Research in Mechanics, Proceedings 2nd International Conference on Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer*.
- [178] Mareka, R., Straub J., Analysis of the Evaporation Coefficient and the Condensation Coefficient of Water, 2001, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 39-53.
- [179] Sartori E., A critical review on equations employed for the calculation of the Evaporation rate from free water surfaces, 1, 2000, *Solar Energy*, Vol. 68, pp. 77-89.
- [180] Smith C. C., Lof G., Jones R. W., Rates of evaporation from swimming pools in active use, 1999, *Transactions of ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers)* , pp. 514-523.
- [181] Biasin, K., Krumme W., Die Wasserverdunstung in einem Innenschwimmbad, 3, 1974, *Electrowaerme International*, Vol. 32, pp. 115-129.
- [182] Tetens, O., Über einige meteorologische Begriffe, 1930, *Zeitschrift für Geophysik*, Vol. 6, p. 297.
- [183] Hycienth I., Onovwiona, V., Ugursal I., Alan S. Fung, Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications, 2007, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 848-861.
- [184] Fu L., Zhao X.L., Zhang S.G., Jiang Y., Li H., Yang W.W., Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems. 2009, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 977-982.

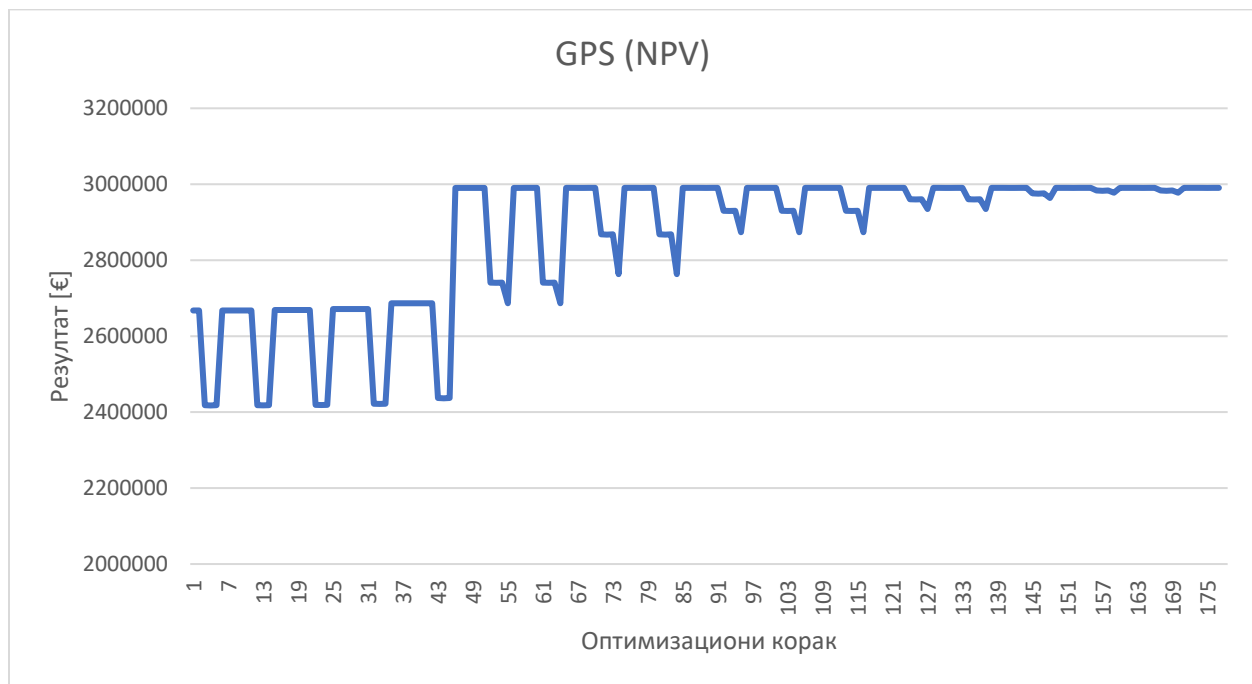
- [185] Pastakkaya B., Yamankaradeniz N., Kaynakli O., Coskun S., Yamanakaradeniz R., Experimental analysis of a solar absorption system with interior energy storage, 2, 2012, Journal of Energy in Southern Africa, Vol. 23, pp. 39-49.
- [186] Thomas S, André P., Numerical simulation and performance assessment of an absorption solar air-conditioning system coupled with an office building, 2012, Building Simulation, Vol. 5, pp. 243-255.
- [187] Hassan Z., Performance Evaluation of a Continuous Operation Adsorption Chiller Powered by Solar Energy Using Silica Gel and Water as the Working Pair, 2014, Energies, Vol. 7, pp. 6382-6400.
- [188] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. Photovoltaic array performance model, Albuquerque, New Mexico 87185-0752 : Sandia National Laboratories, 2003.
- [189] Skoplaki E., Palyvos J.A., Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. 2009, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 23-29.
- [190] Viessmann. Solar Thermal Systems Technical Guide. D-35107 Allendorf : Viessmann Werke, 2009.
- [191] Wesper, Technical Brochure TM VLH-W.3GB. 17800 Pons, France : Wesper S.A.S., 2005.
- [192] Karamarković V., Matejić M., Brdarević Lj., Stamenić M., Ramić B., Handbook for preparing energy efficiency projects in municipalities. Belgrade : Ministry for mining and energy of Republic of Serbia, 2008.
- [193] Petrović A., Jarić M., Budimir N., Vasović D., Stanković M., Stefanović N., procena usluga u planiranju i izgradnji, Belgrade : ETA, 2009.
- [194] Yee B. T., Runner S. G., Steel M., Horton J. E, Chiang J., Equipment And Fixtures Index, Percent Good And Valuation Factors, Assessors' Handb. s.l. : Marshall & Swift/Boeckh, LLC and the U.S. Bureau of Labor Statistics, 2014.
- [195] Rulebook on energetic certification of buildings. Ministry of environment, mining and space planning of the Republic of Serbia. 2009, Official Gazzete of the Republic of Serbia, Vol. 61/11.
- [196] Clean Air Technology Center. CATC Technical Bulletin, Choosing an Adsorption system for VOC: Carbon, Zeolite, or Polymers Research Triangle Park, Nort Carolina 27711 : U.S. Environmental Protection Agency, 1999.

- [197] Aste N., Adhikari R.S., Manfren M., Cost optimal analysis of heat pump technology adoption in residential reference buildings, 2013, *Renewable Energy*, Vol. 60, pp. 615-624.
- [198] Lof G.O.G., Tybout R. A., Cost of house heating with solar energy, 1973, *Solar Energy*, Vol. 14, pp. 253-278.
- [199] Calise F., Dentice d'Accadia M., Vanoli L., Design and dynamic simulation of a novel solar trigeneration system based on hybrid photovoltaic/thermal collectors (PVT), 2012, *Energy Conversion and Management*, Vol. 60, pp. 214-225.
- [200] Darghouth N. R., Barbose G., Wiser R. H., Customer-economics of residential photovoltaic systems(Part1):The impact of high renewable energy penetrations on electricity bill msavings with net marketing, 2014, *Energy Policy*, Vol. 67, pp. 290-300.
- [201] Sebzali M.J., Ameer B., Hussain H.J., Comparison of energy performance and economics of chilled water thermal storage and conventional air-conditioning systems, 2014, *Energy and Buildings*, Vol. 69, pp. 237-250.
- [202] European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry and Pigs. 2013.
- [203] Aleksić S., Pantelić V., Radović Č. , Livestock Production -Present Situation And Future Development Directions In Republic Of Serbia, 5-6, 2009, *Biotechnology in Animal Husbandry*, Vol. 25, pp. 267-276.
- [204] Bošković Nj. Z. O., Agriculture of Serbia and Montenegro, 2, 2006, *Agora Without Frontiers*, Vol. 12, pp. 110-145.
- [205] Lan T. N., Hermansen J. E., Mogensen L., Fossil energy and GHG saving potentials of pig farming in the EU. 2010, *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 2561–2571.
- [206] Meul M., Nevens F., Reheul F., Hofman G., Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders, 2007, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 119, pp. 135-144.
- [207] Halberg, N., Indicators of resource use and environmental impact for use in a decision aid for Danish livestock farmers, 1999, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 76, pp. 17-30.
- [208] Dalgaard T., Halberg N., Porter J. R., A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming, 2001, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 87, pp. 51-65.

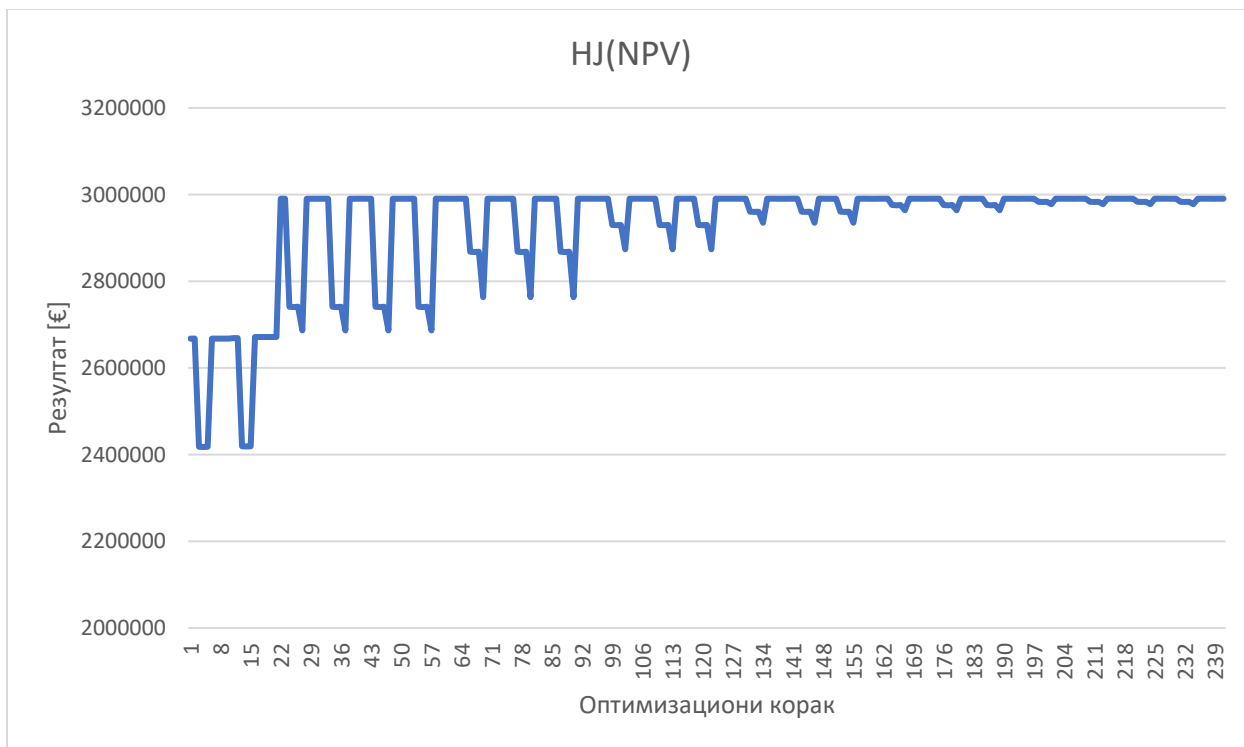
- [209] Poritosh R., Daisuke N., Takahiro O., Qingyi X., Hiroshi Okadome, Nobutaka Nakamura, Takeo Shiina, A review of life cycle assessment (LCA) on some food products, 2009, *Journal of Food Engineering*, Vol. 90, pp. 1-10.
- [210] Raven R.P.J.M., Gregersen .H., Biogas plants in Denmark: successes and setbacks, 2007, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 116-132.
- [211] Weiland P., Biogas production: current state and perspectives 2010, *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 85, pp. 849-860.
- [212] Svensson L. M., Christensson K., Bjornsson L., Biogas production from crop residues on a farm-scale level: is it economically feasible under conditions in Sweden, 2005, *Bioprocess Biosyst Eng*, Vol. 28, pp. 139-148.
- [213] Prasertsana S., Sajjakulnukitb B., Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers, 2006, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 599-610.
- [214] Živković D., Mančić M., Stefanović V., Pavlović S., Biomass In Serbia – Resources, Barriers And Possible Solutions, Zrenjanin, 2012, *Proceedings IEEP 2012*.
- [215] Münster M., Lund H., Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis, 2010, *Waste Management*, Vol. 30, pp. 1251–1263.
- [216] Pipatmanomai S., Kaewluan S., Vitidsant T., Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm, 2009, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 669-674.
- [217] Mančić M., Živković D., Vukadinović B., Čosović A., Techno-economic optimisation of energy supply of a livestock farm, 2, 2015, *FACTA UNIVERSITATIS Series: Working and Living Environmental Protection*, Vol. 12, pp. 199-216.
- [218] Nill M., Wilfert R. Kurzfassung des Endberichtes für da DBU Projekt 15071: Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Leipzig : Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2004.

ПРИЛОГ 1 – РЕЗУЛТАТИ GENOPT ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНОГ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ ЗАТВОРЕНИХ ПЛИВАЧКИХ БАЗЕНА

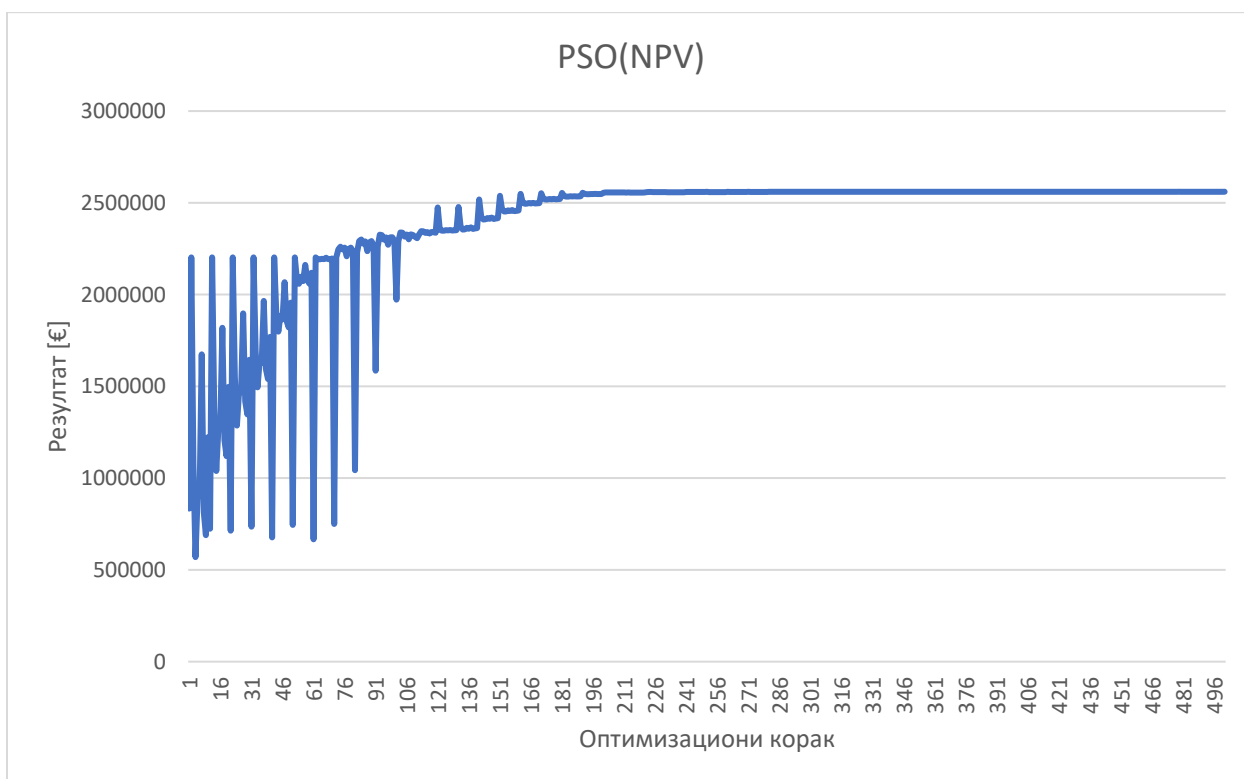
У прилогу 1. представљени су резултати GenOpt оптимизације полигенерационог система са коришћењем ОИЕ за потребе затворених пливачких базена добијени методологијом представљеном у поглављу 4 овог рада.



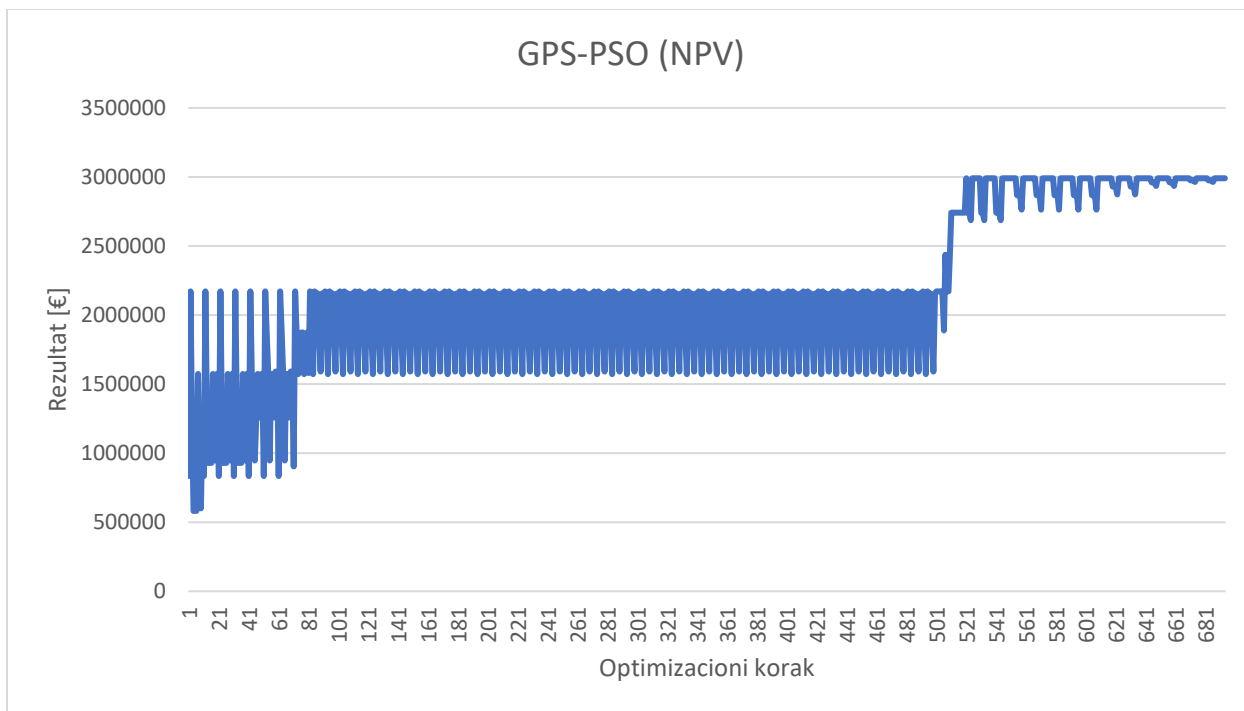
Слика 58. Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



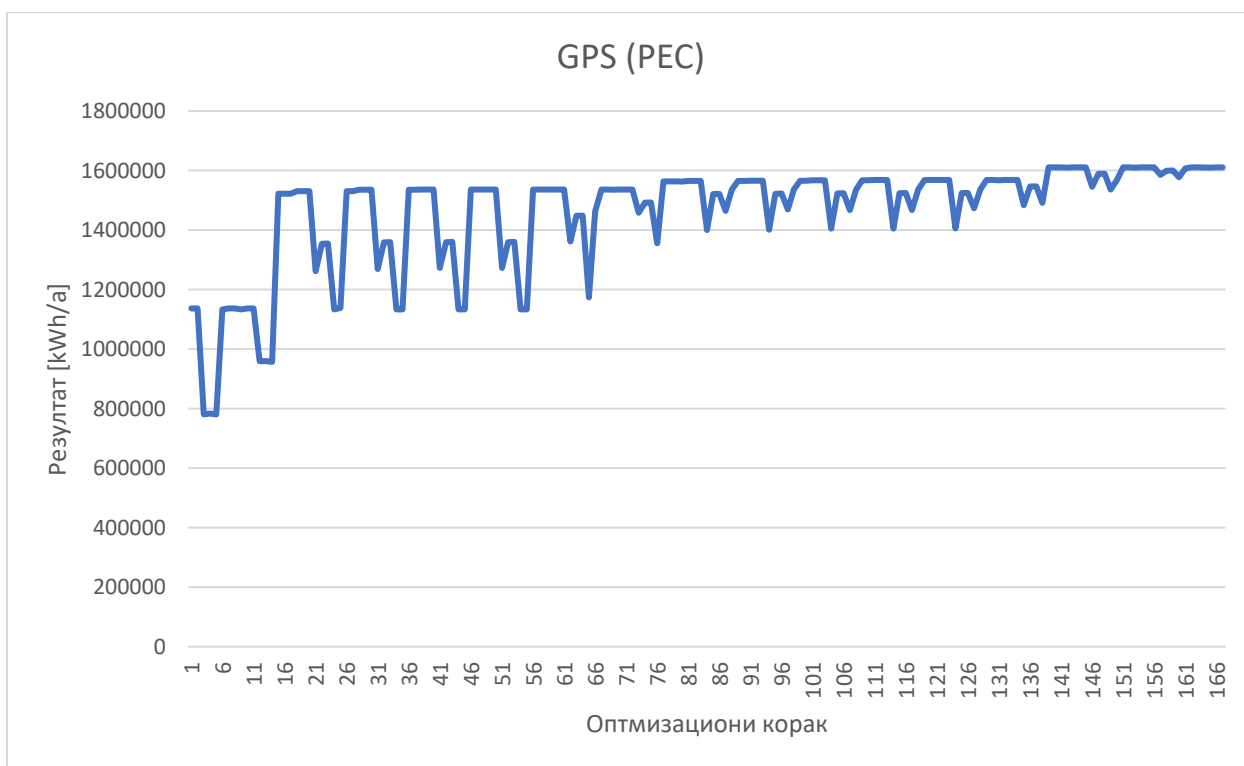
Слика 59. Резултати HJ оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



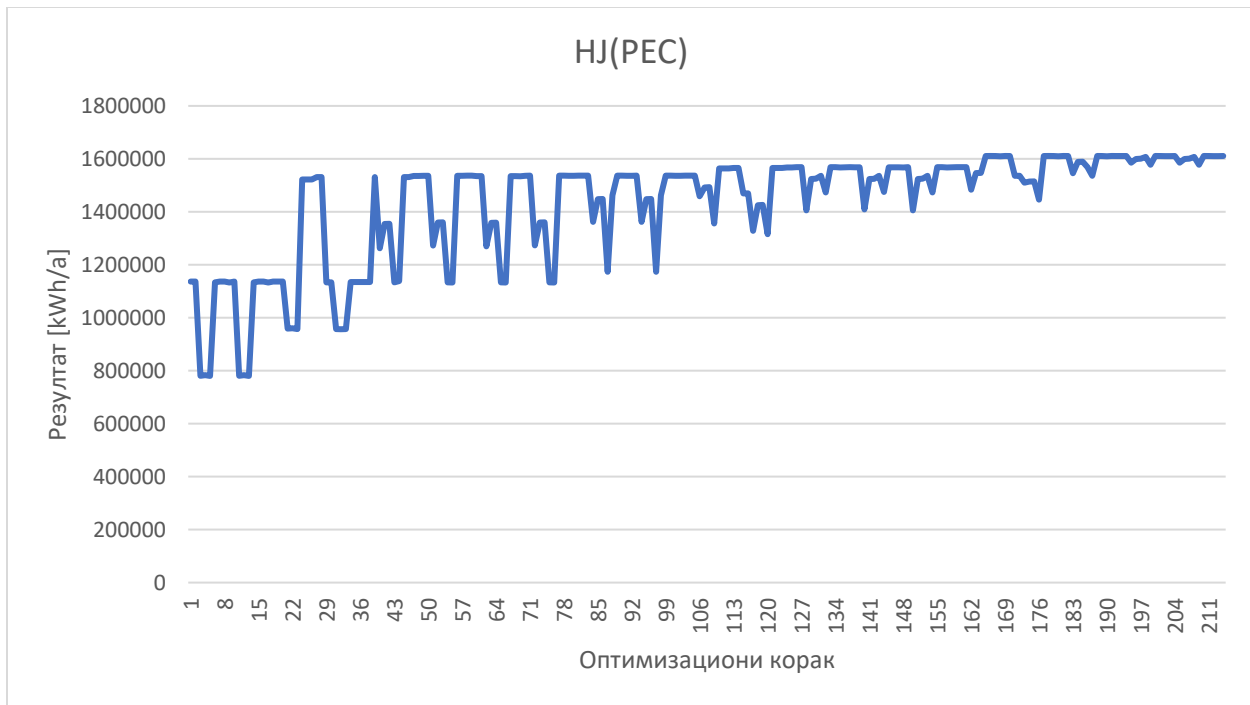
Слика 60. Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



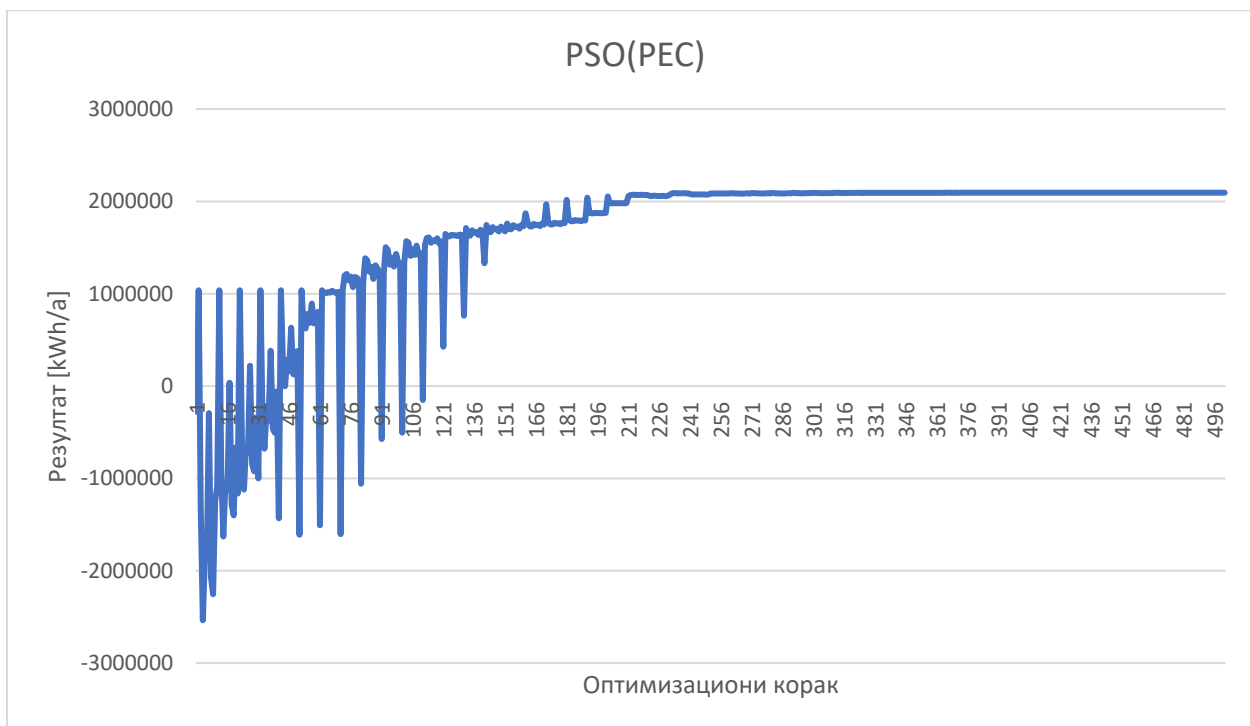
Слика 61. Резултати GPS- PSO оптимизационог алгорита за критеријум NPV



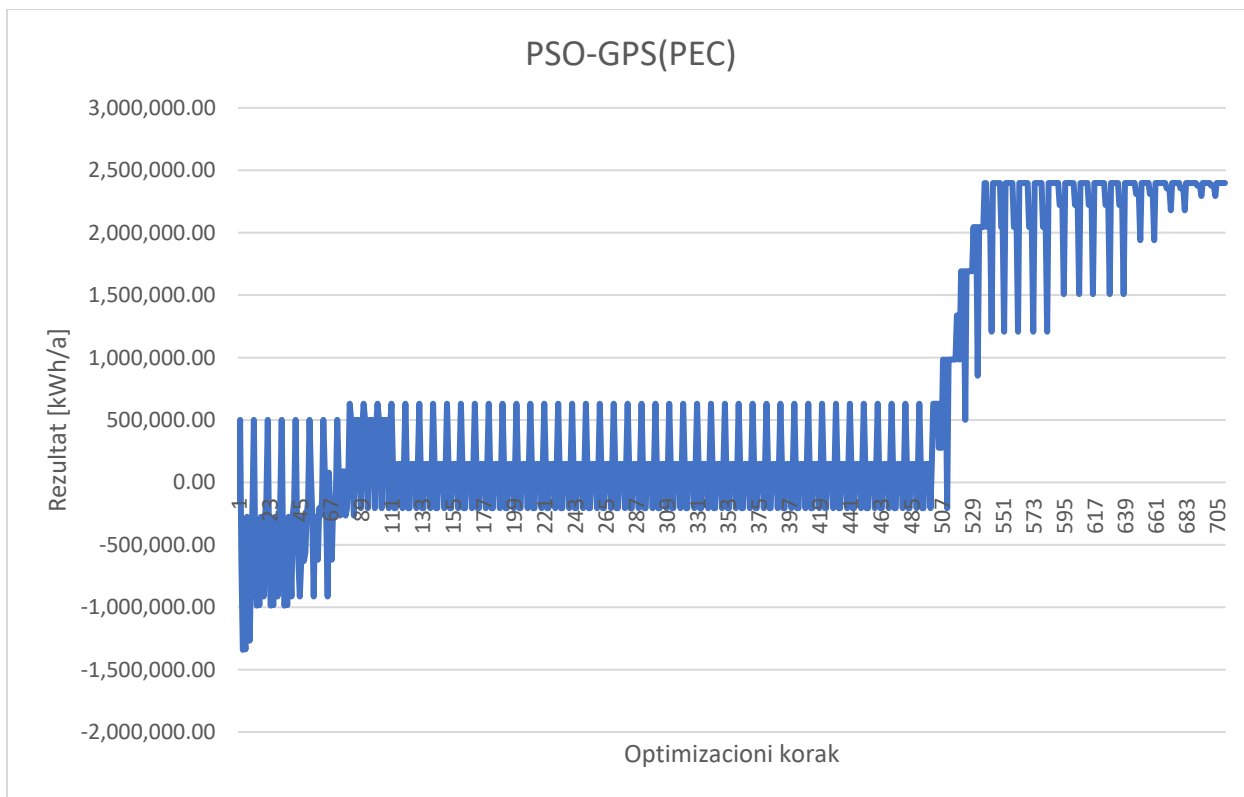
Слика 62. Резултати GPS оптимизационог алгорита за критеријум PEC



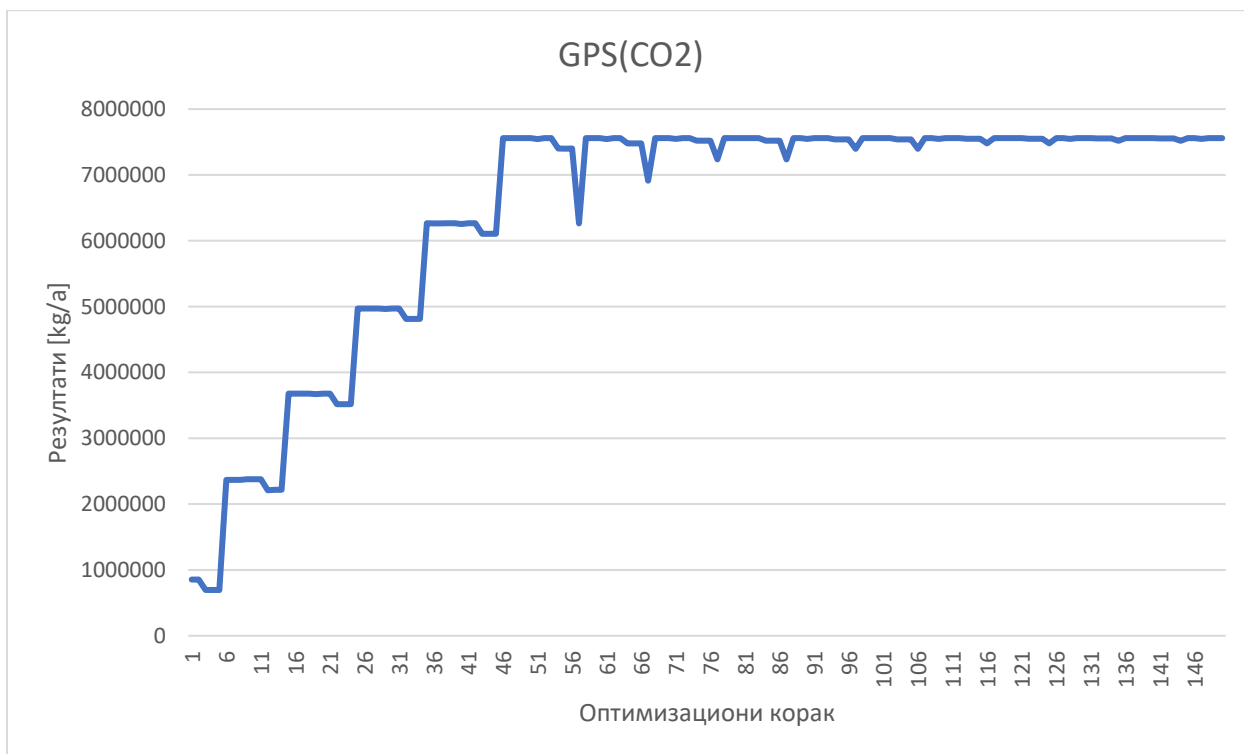
Слика 63. Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PEC



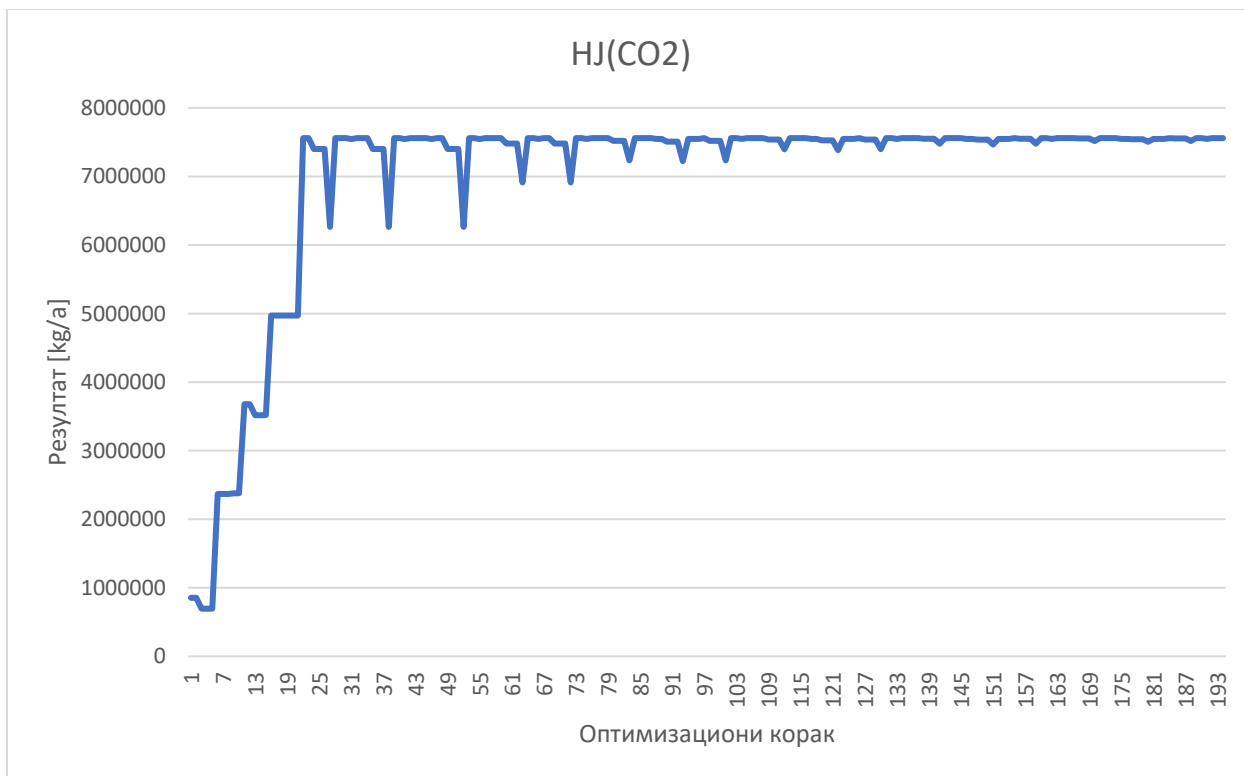
Слика 64 . Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PEC



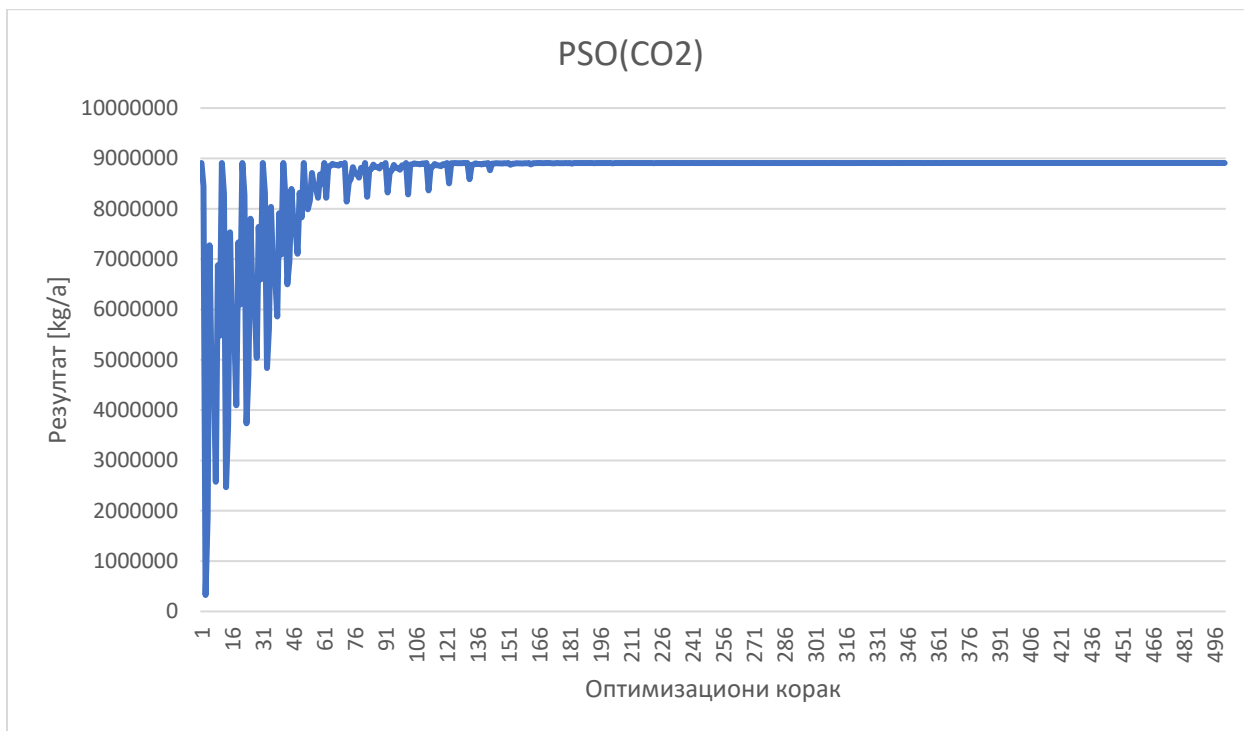
Слика 65. Резултати GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PEC



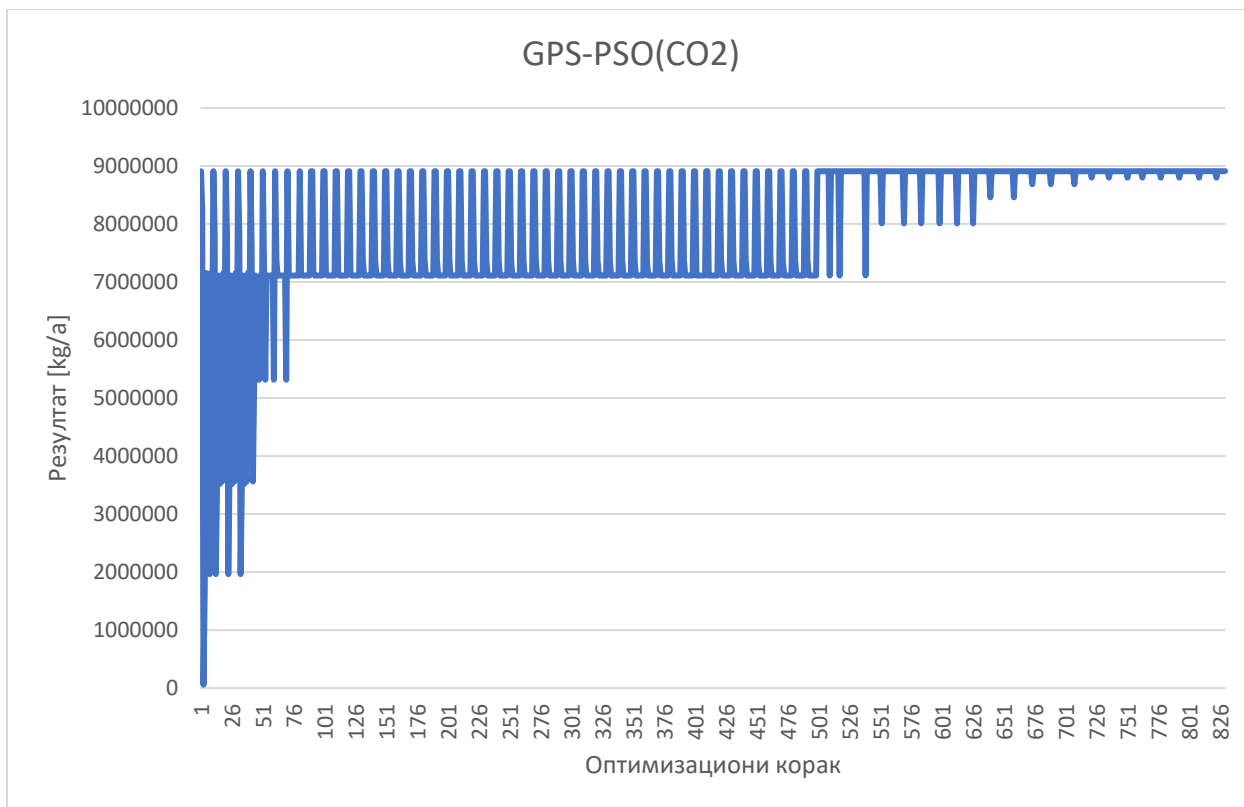
Слика 66. Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



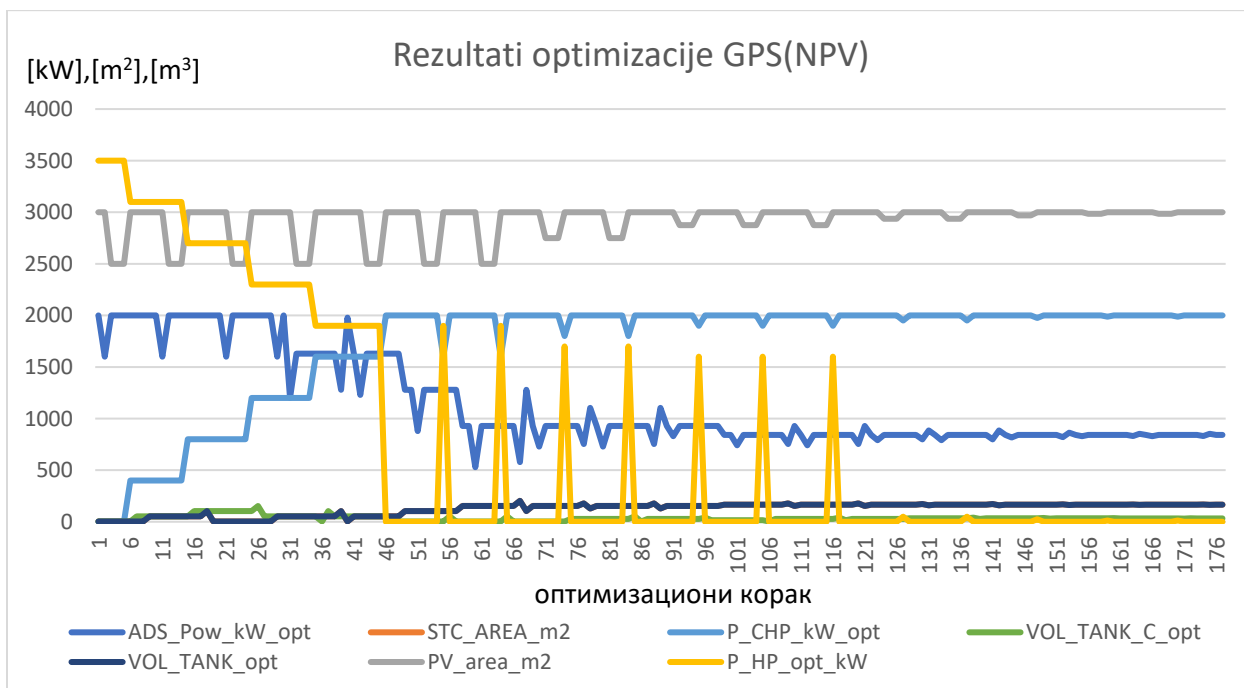
Слика 67. Резултати HJ оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



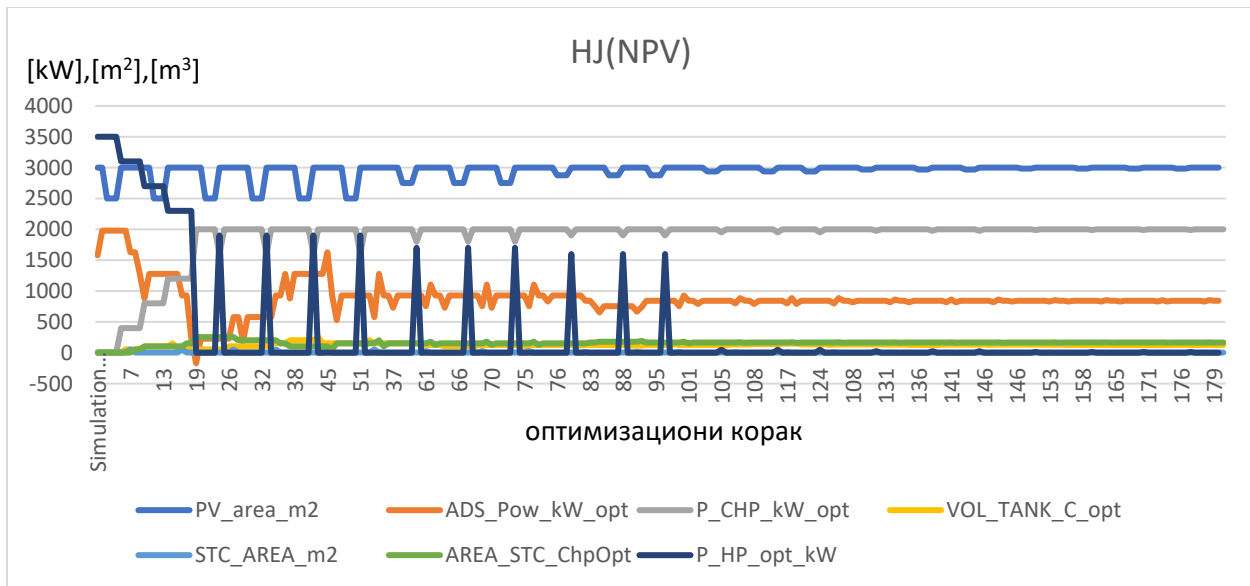
Слика 68. Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



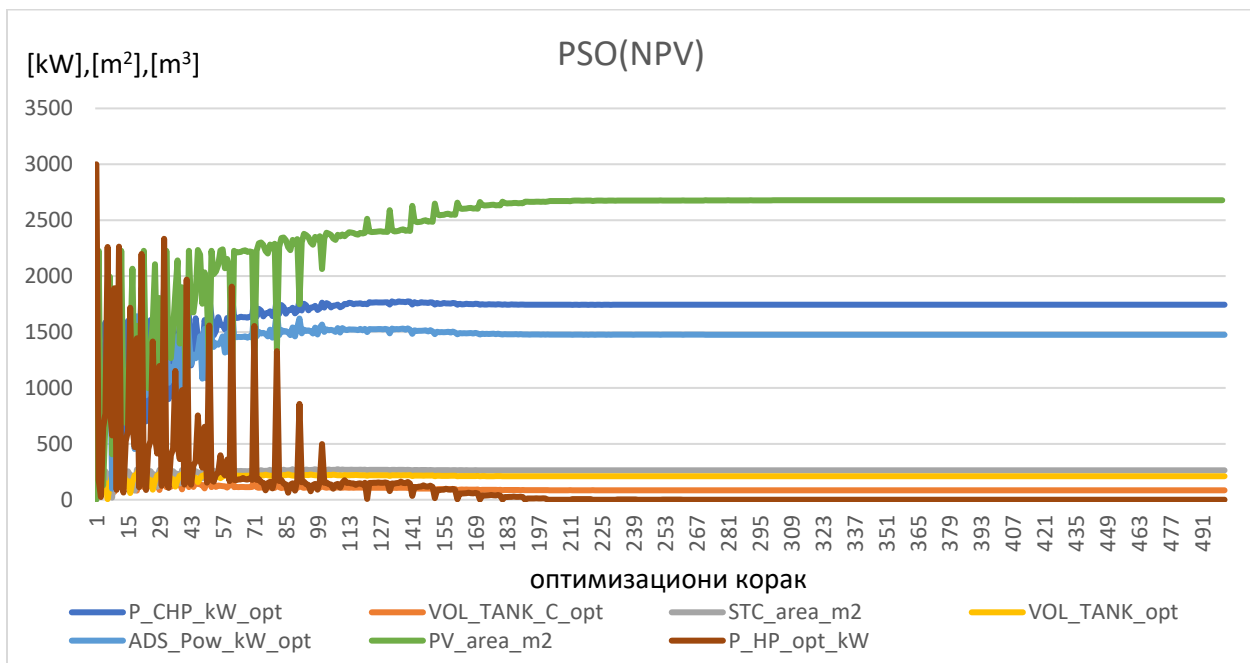
Слика 69 . Резултати GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



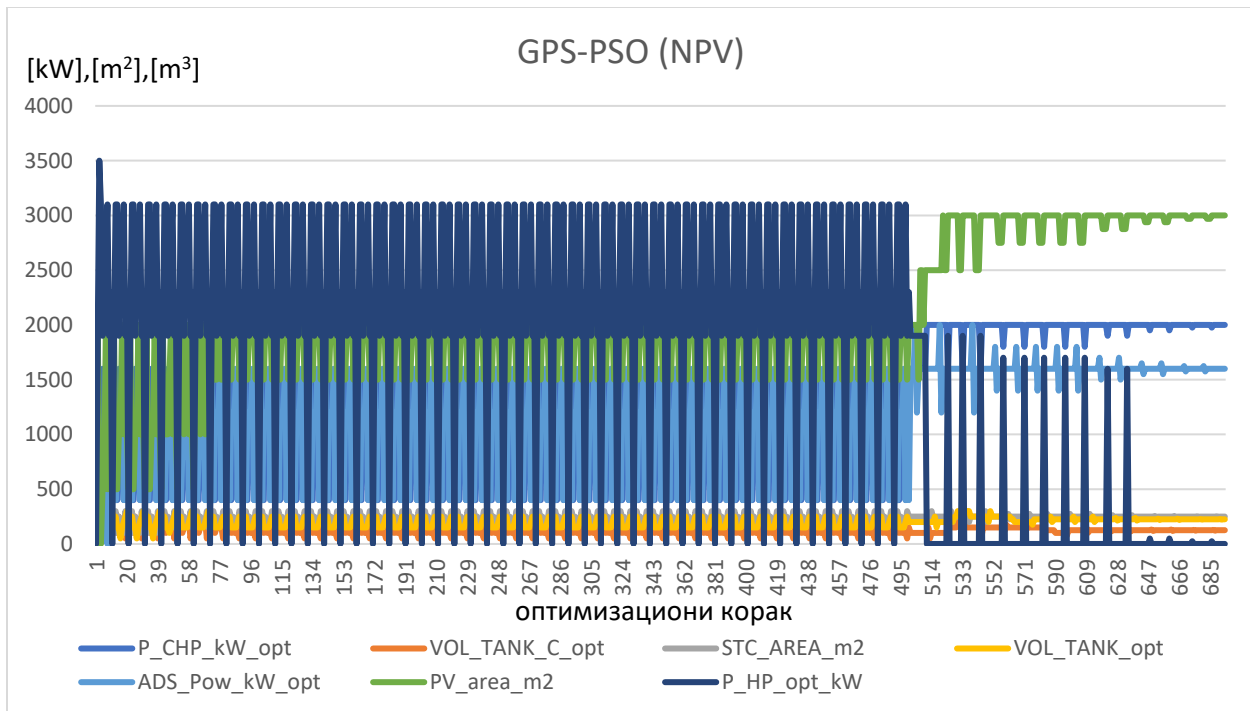
Слика 70. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



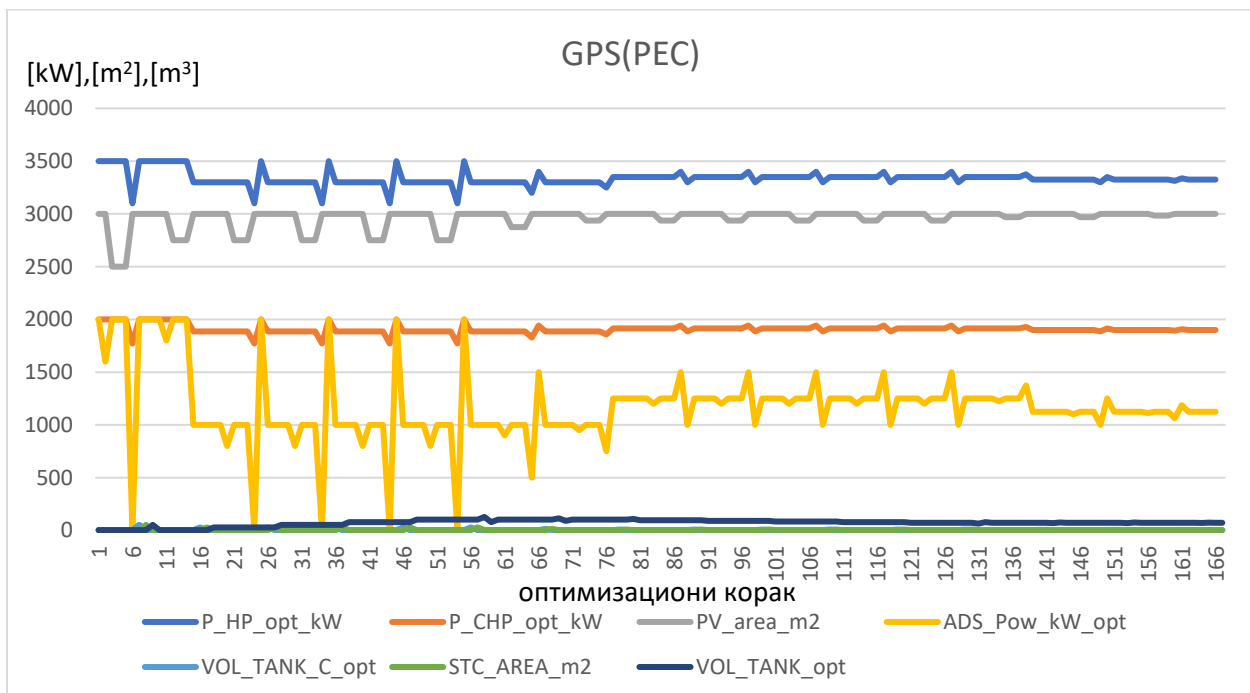
Слика 71. Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



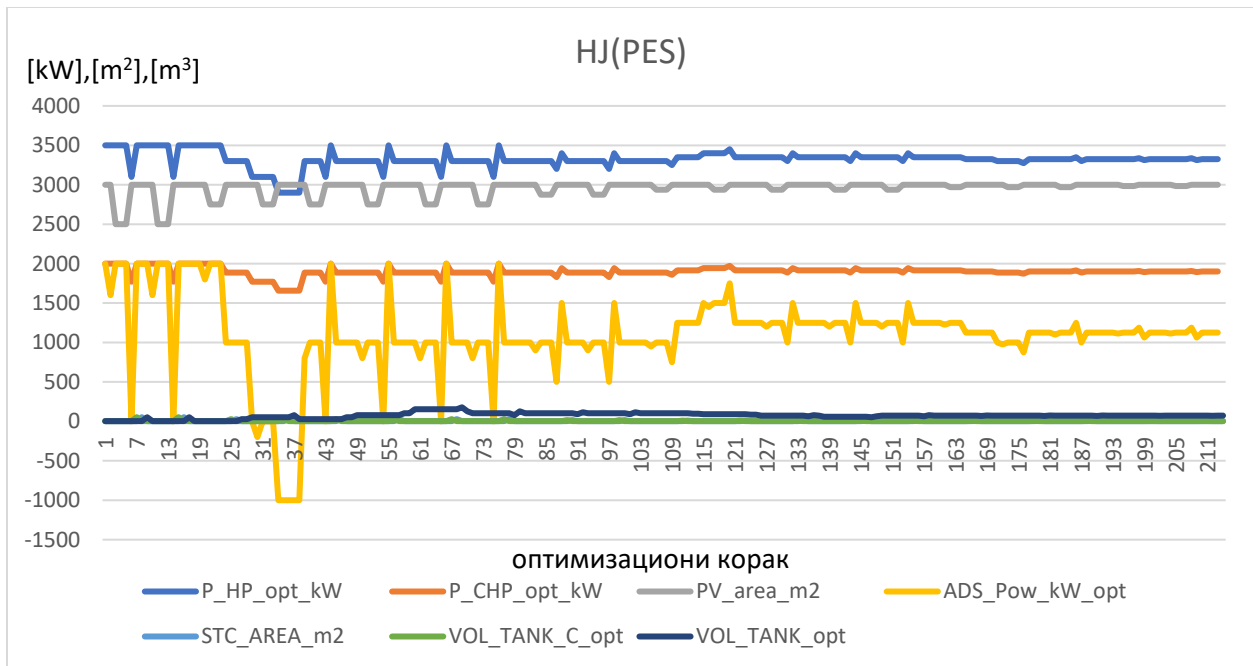
Слика 72. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV



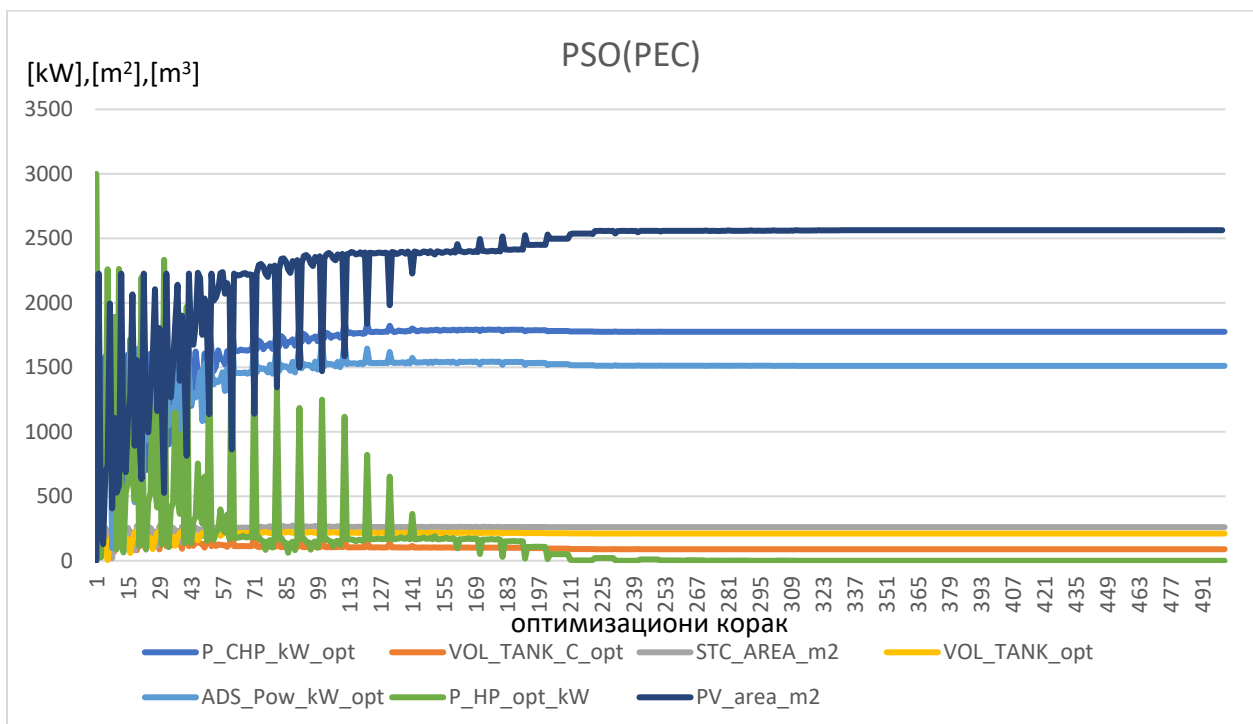
Слика 73. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS-PSO оптимизационог алгорита за критеријум NPV



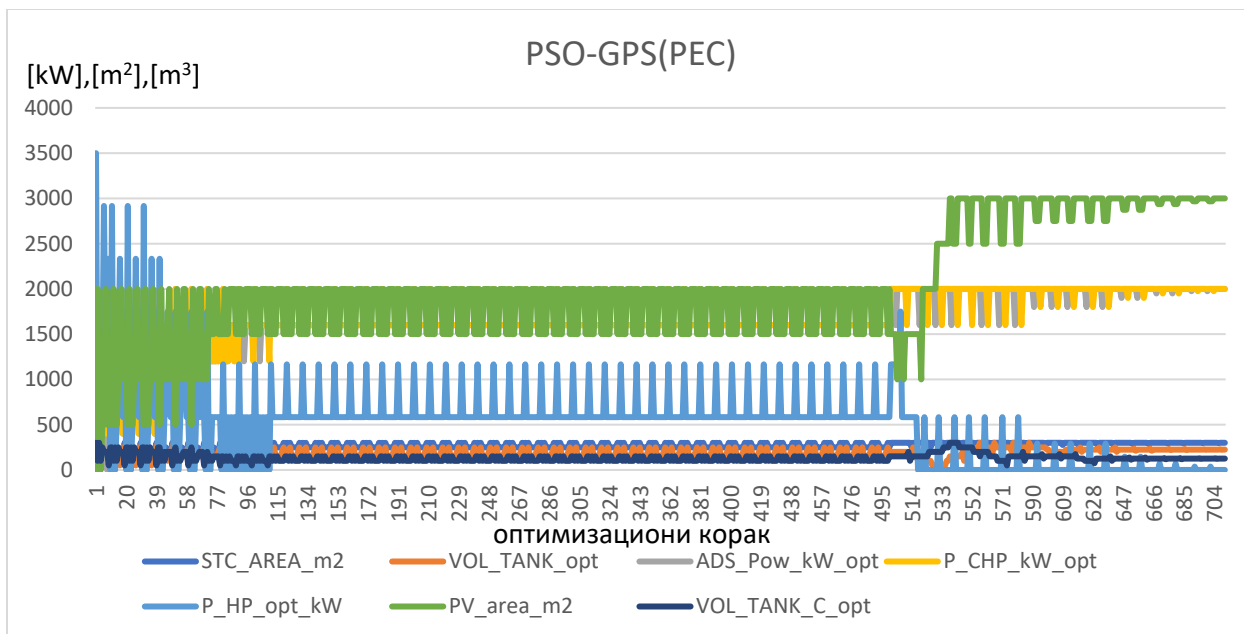
Слика 74. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгорита за критеријум PEC



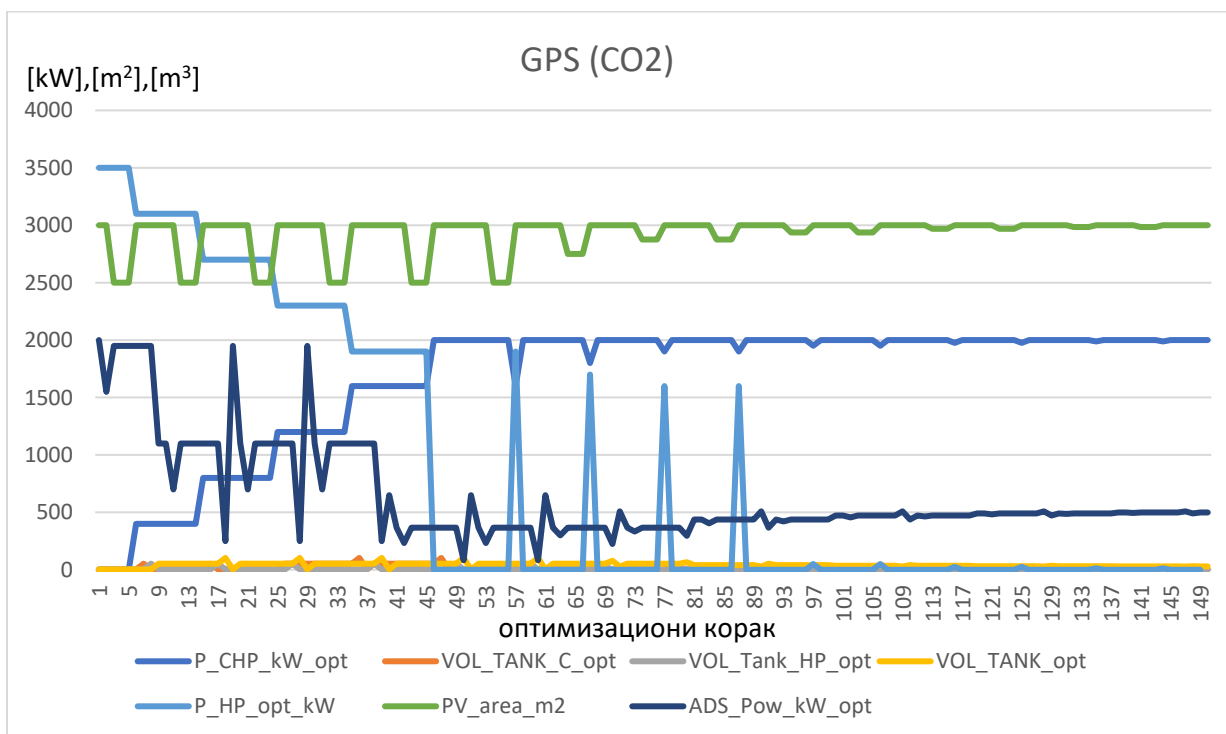
Слика 75. Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум PES



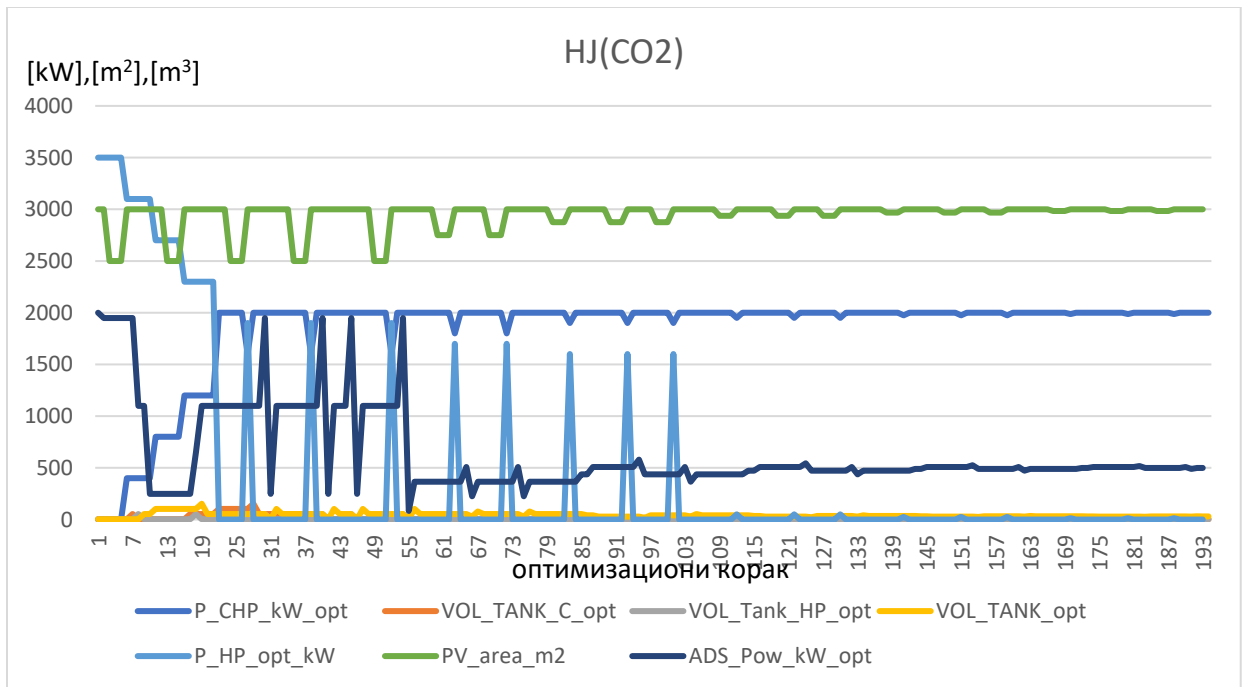
Слика 76. Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PEC



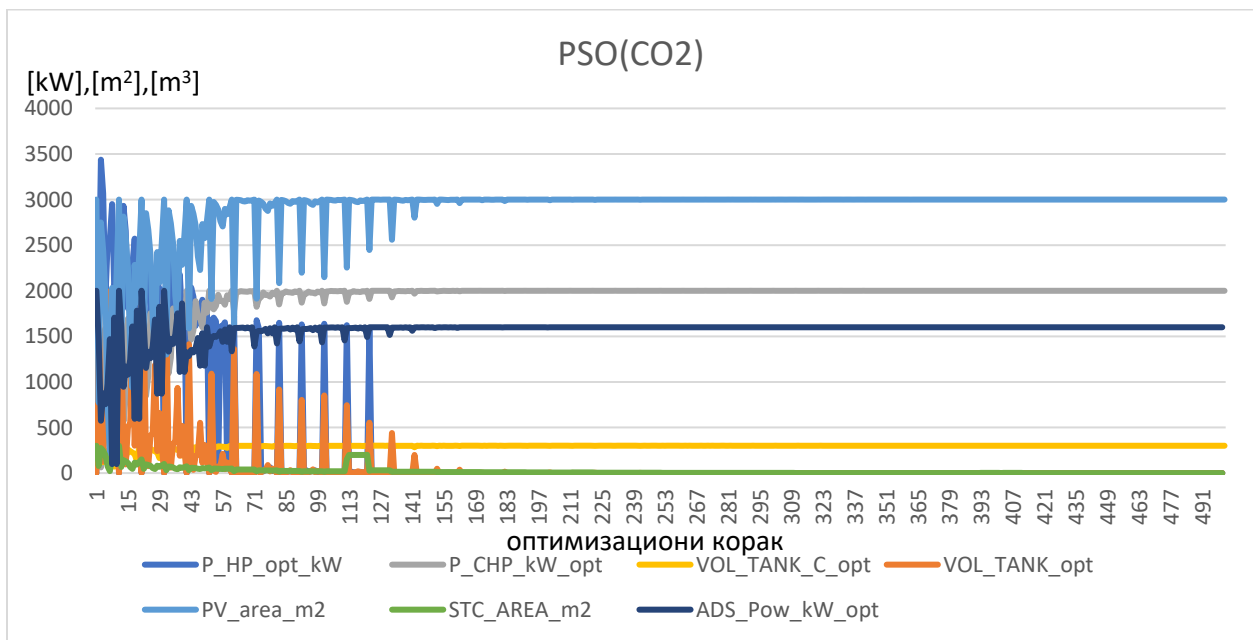
Слика 77. Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO-GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PEC



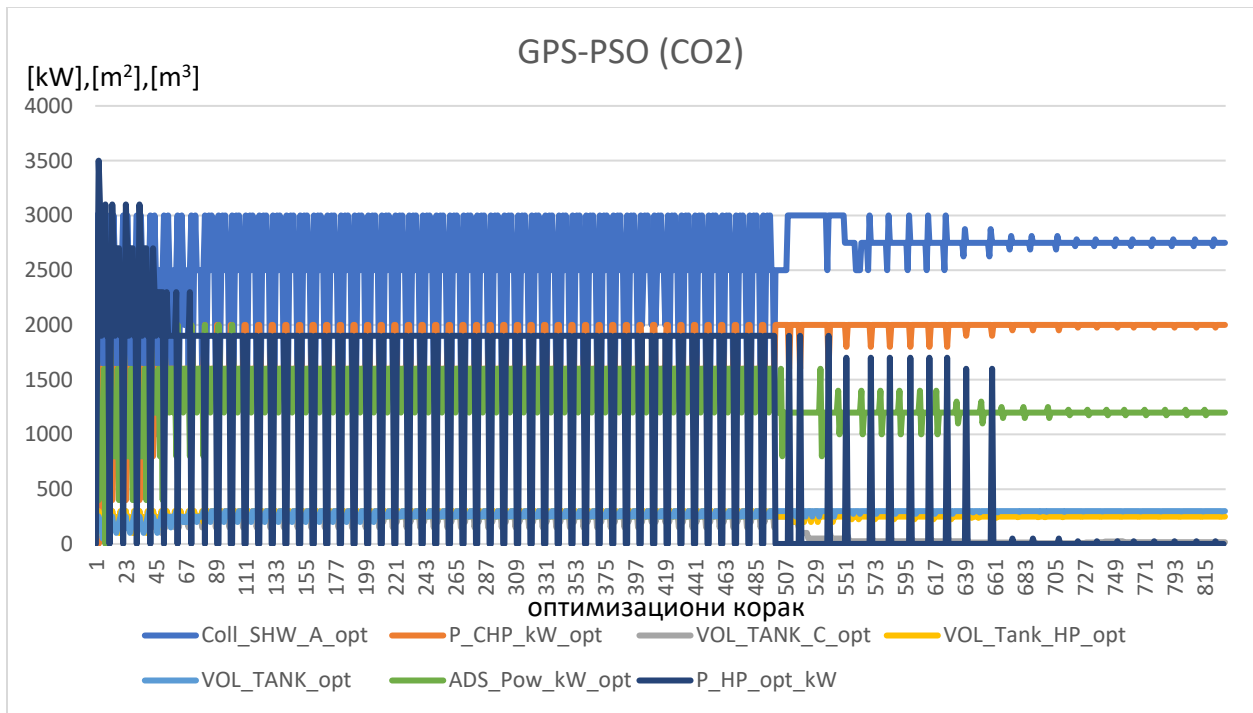
Слика 78. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



Слика 79. Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



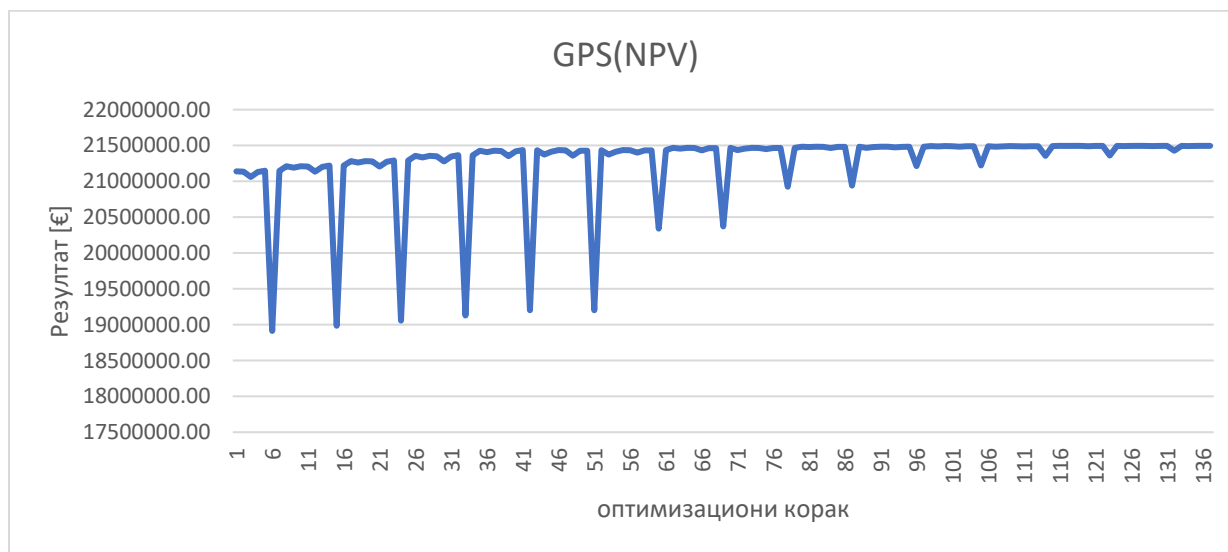
Слика 80. Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂



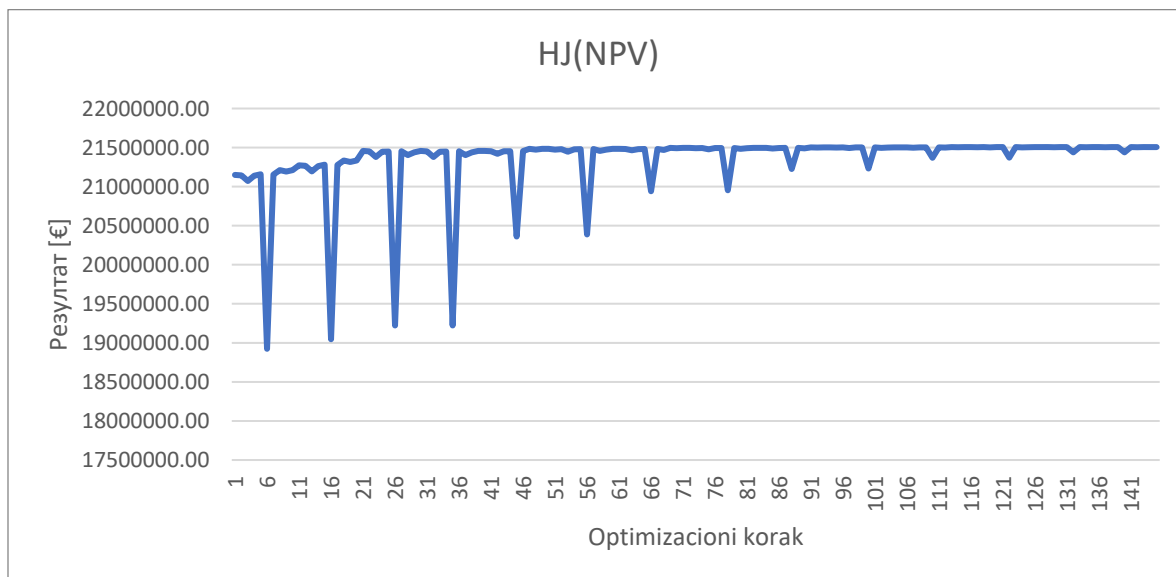
Слика 81. Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO₂

ПРИЛОГ 2 – РЕЗУЛТАТИ GENOPT ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОНОГ СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ СТОЧАРСКЕ ФАРМЕ

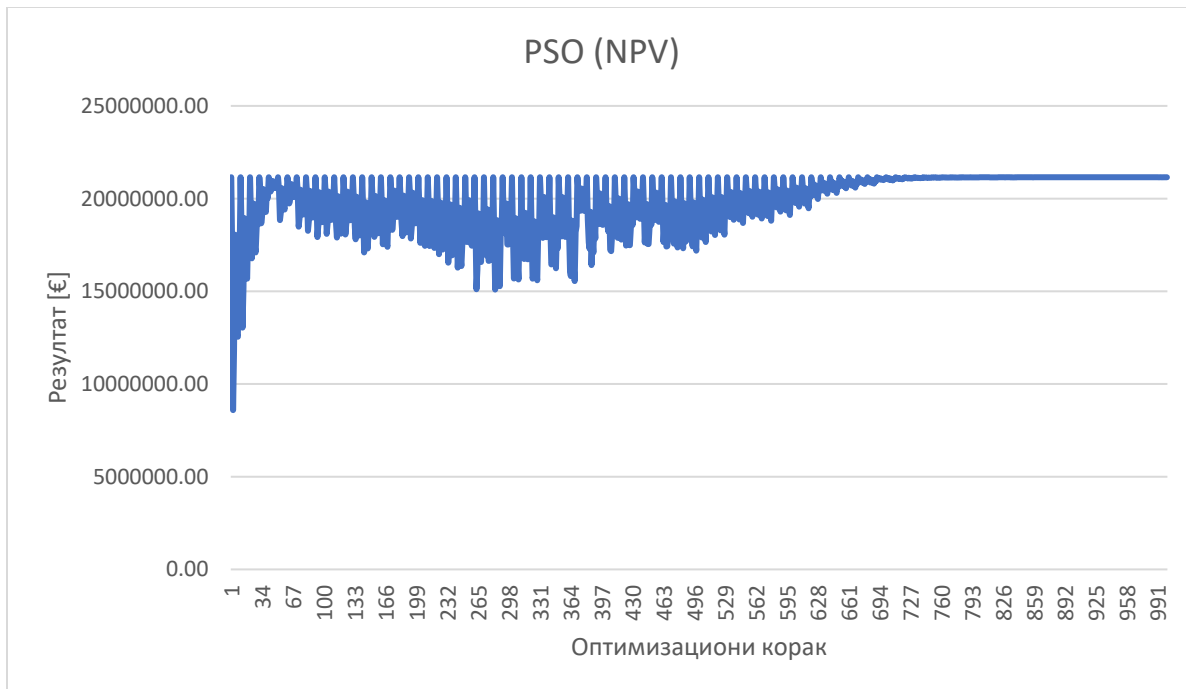
У прилогу 2. представљени су резултати GenOpt оптимизације полигенерационог система са коришћењем ОИЕ за потребе анализирани сточарске фарме добијени методологијом представљеном у поглављу 4 овог рада.



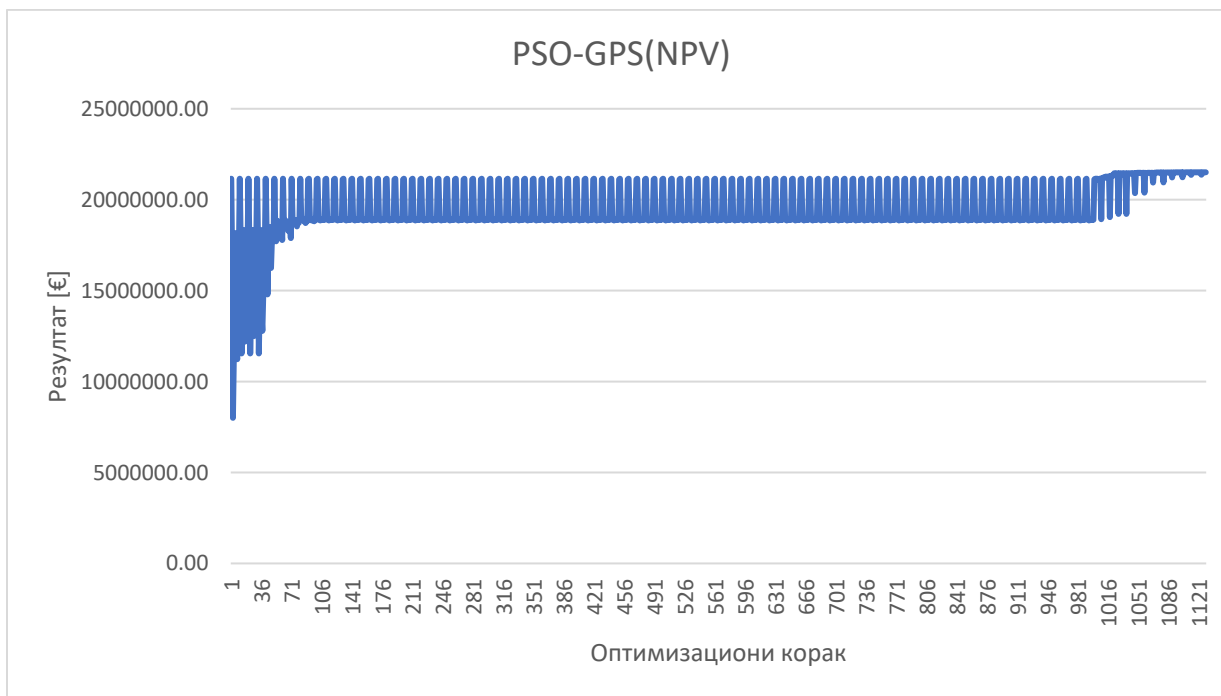
Слика 82. Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом GPS



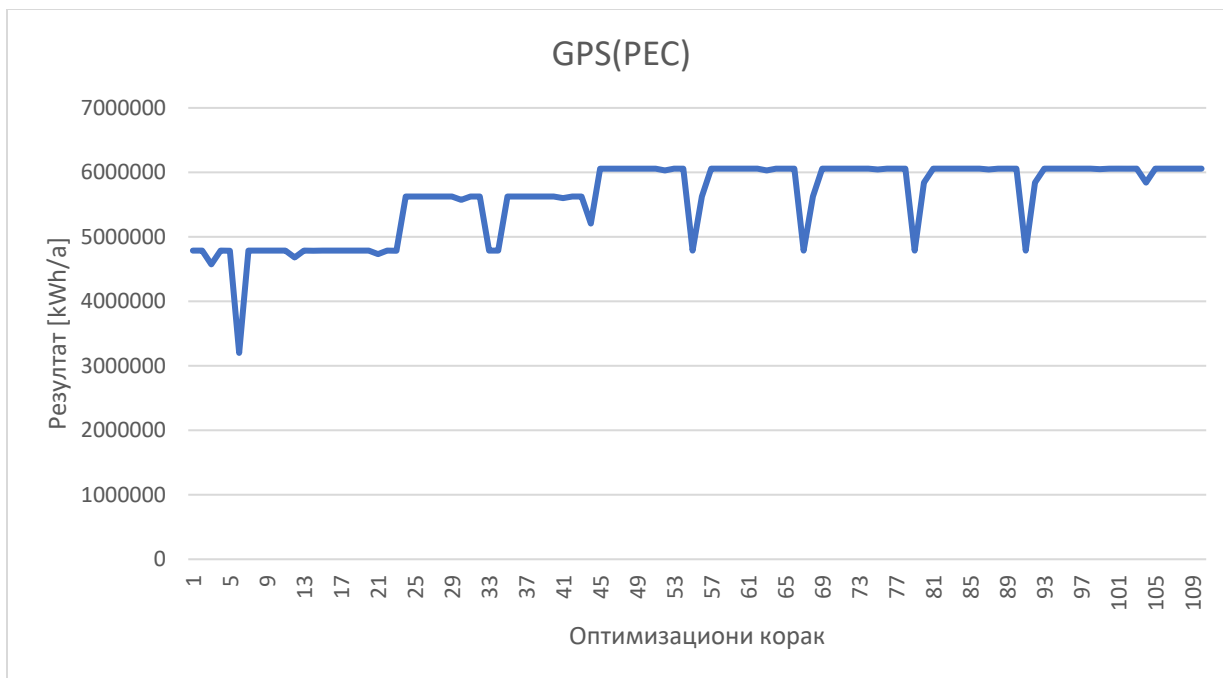
Слика 83. Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом HJ



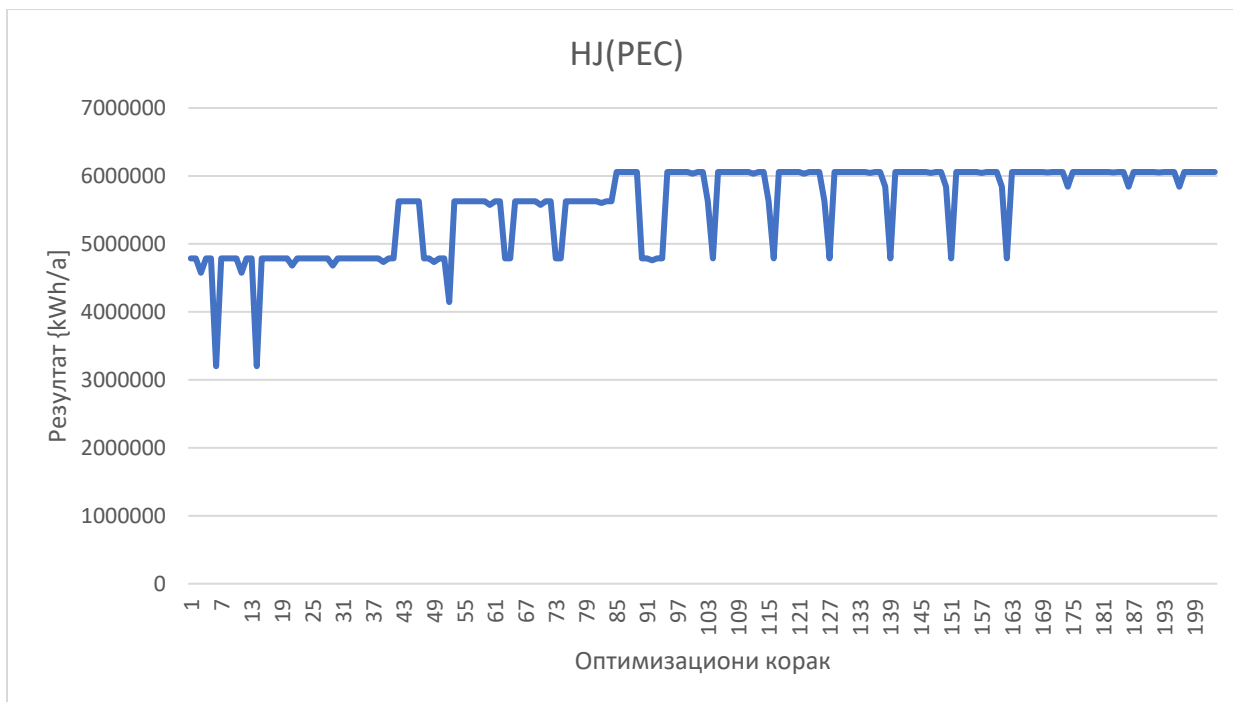
Слика 84 . Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом PSO



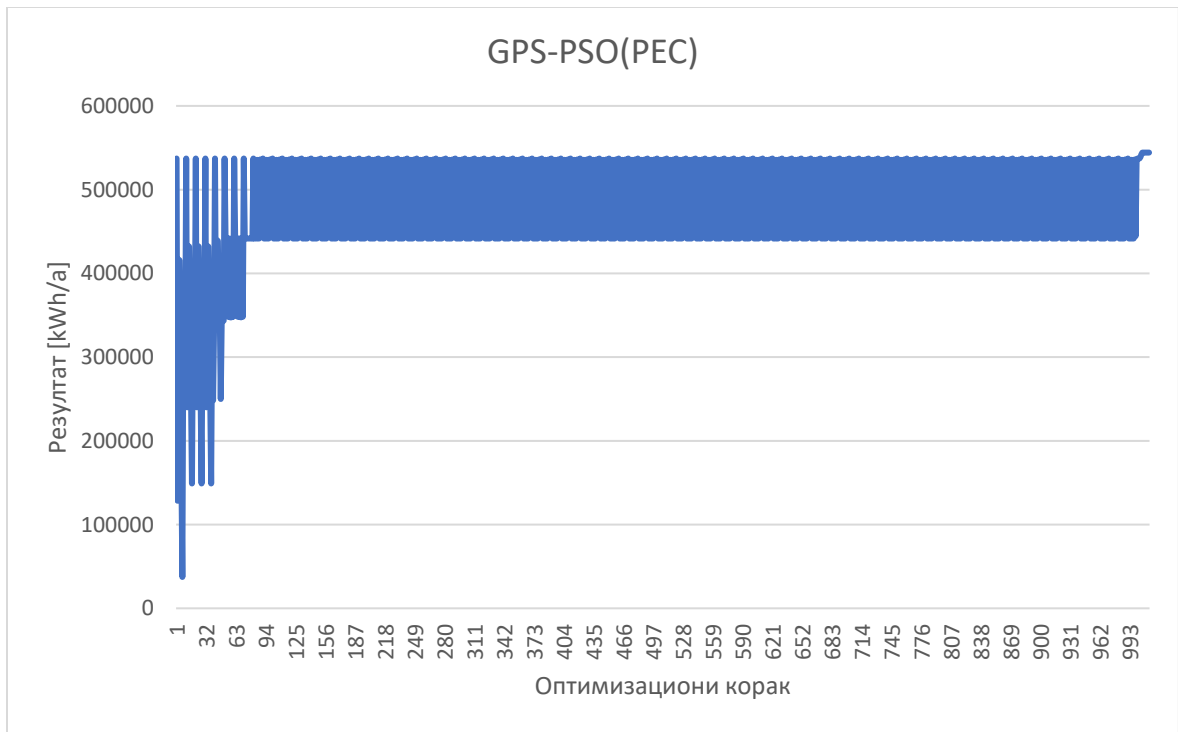
Слика 85. Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO



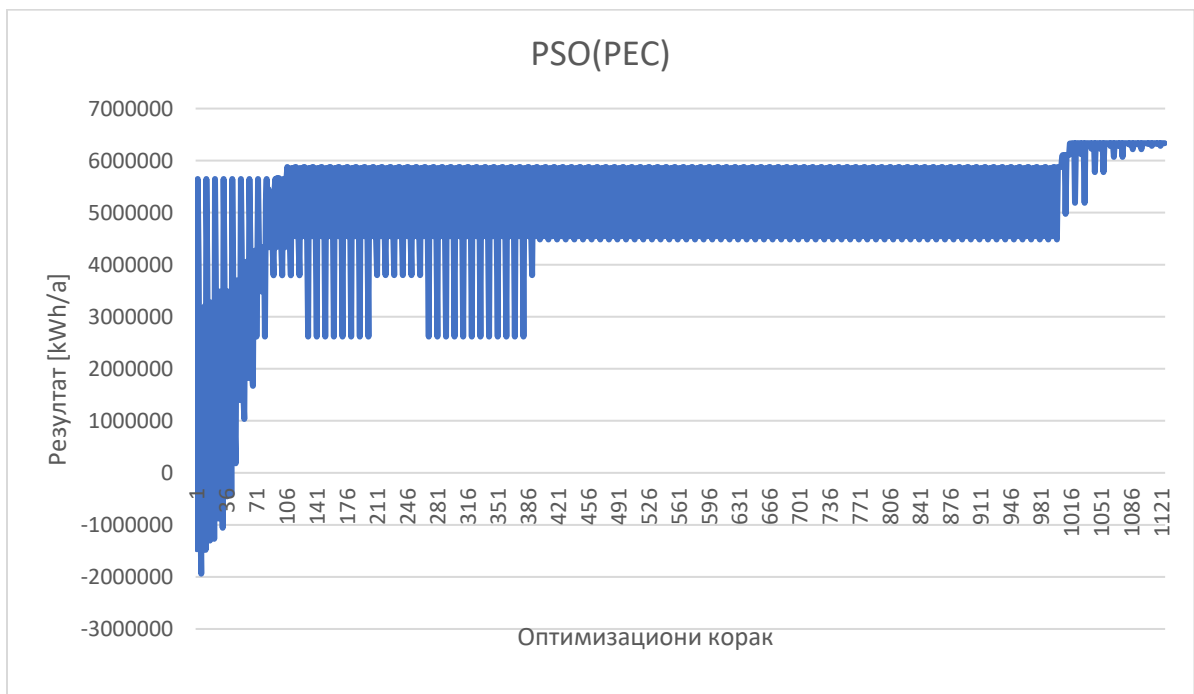
Слика 86. Вредности функције циља PEC добијених оптимизационим алгоритмом GPS



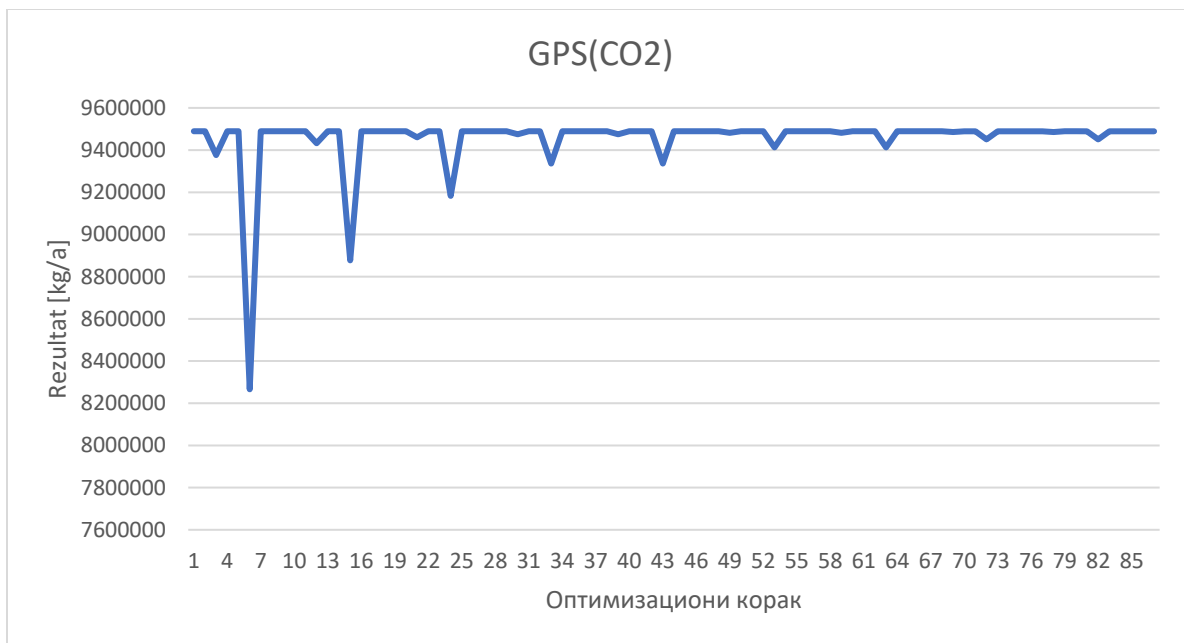
Слика 87. Вредности функције циља PEC добијених оптимизационим алгоритмом HJ



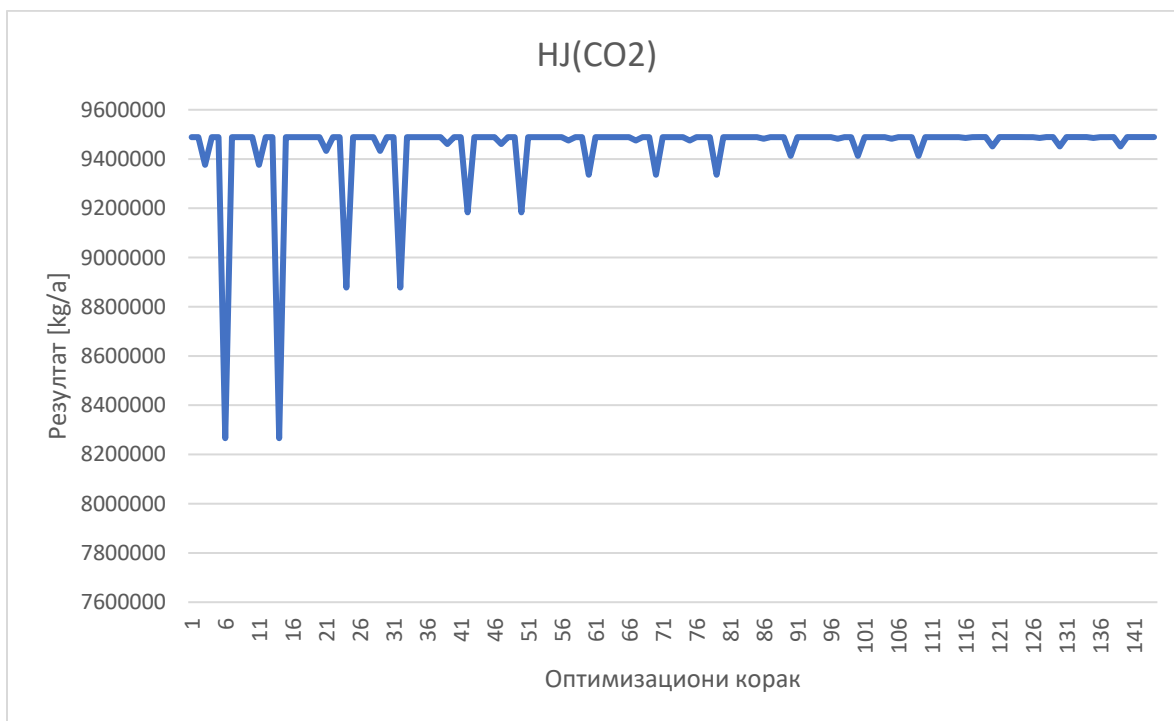
Слика 88. Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO



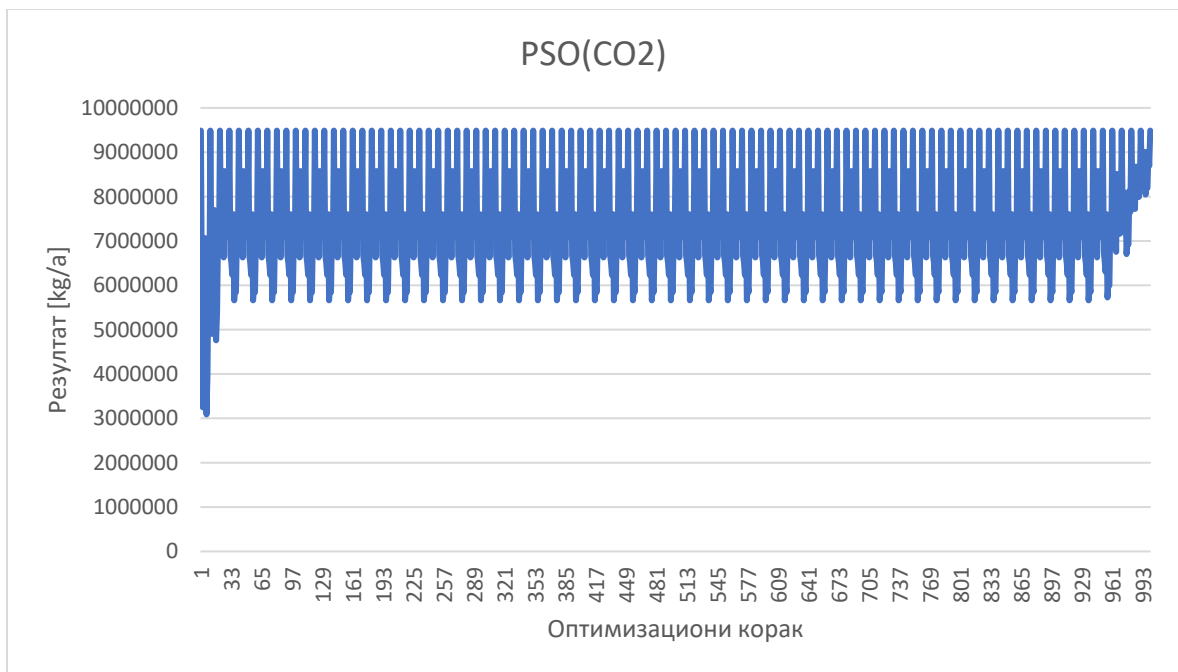
Слика 89. Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом PSO



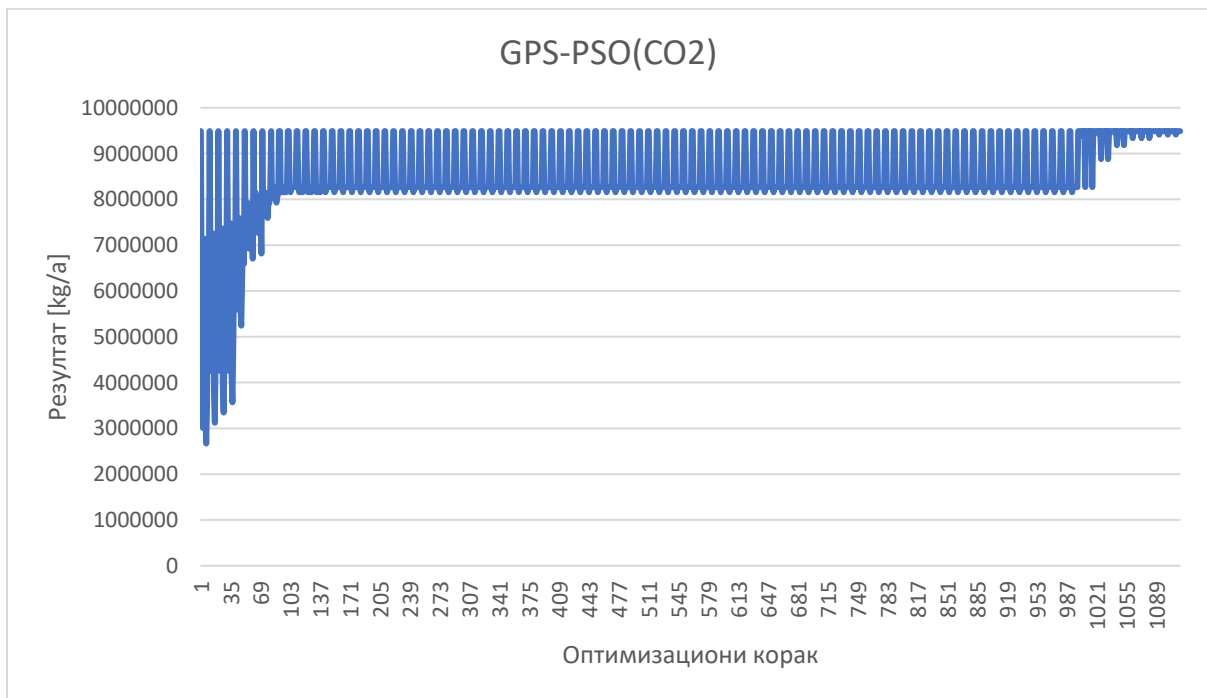
Слика 90. Вредности функције циља CO₂ добијених оптимизационим алгоритмом GPS



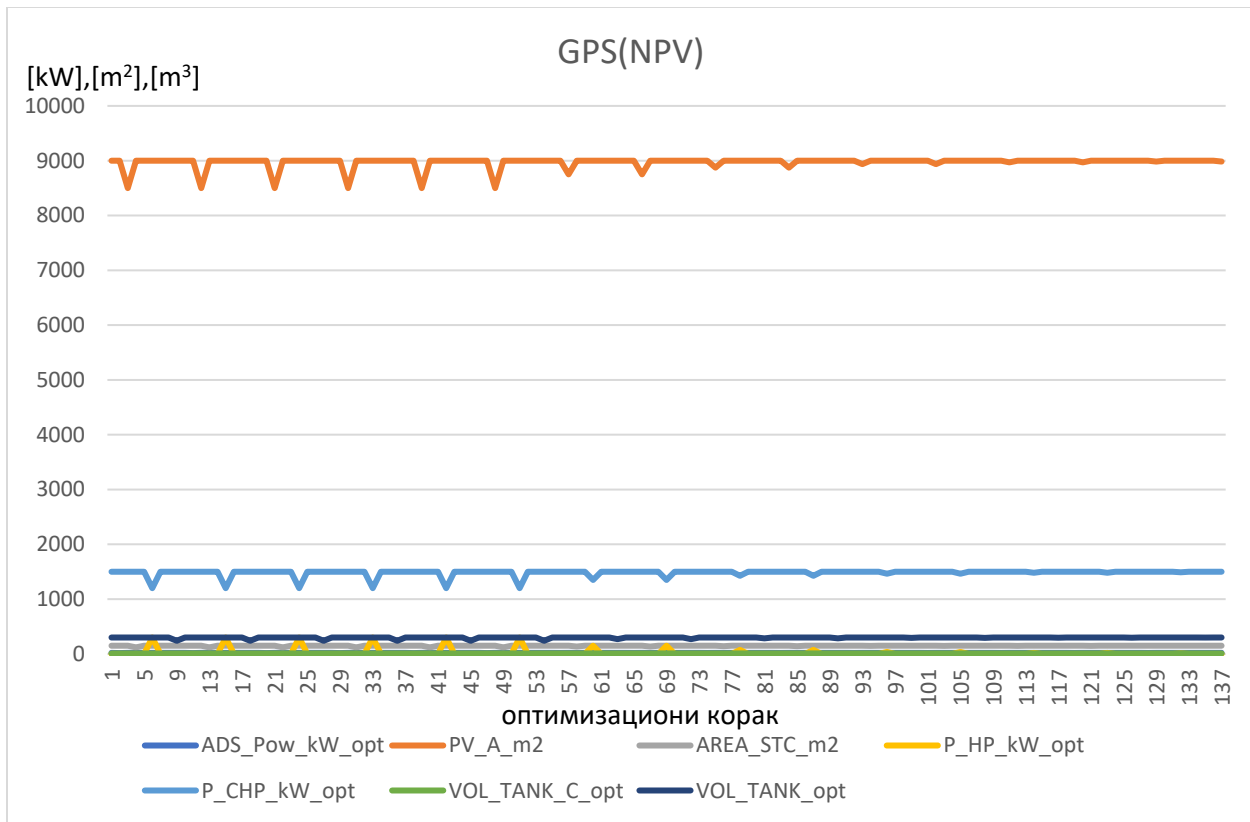
Слика 91. Вредности функције циља CO₂ добијених оптимизационим алгоритмом HJ



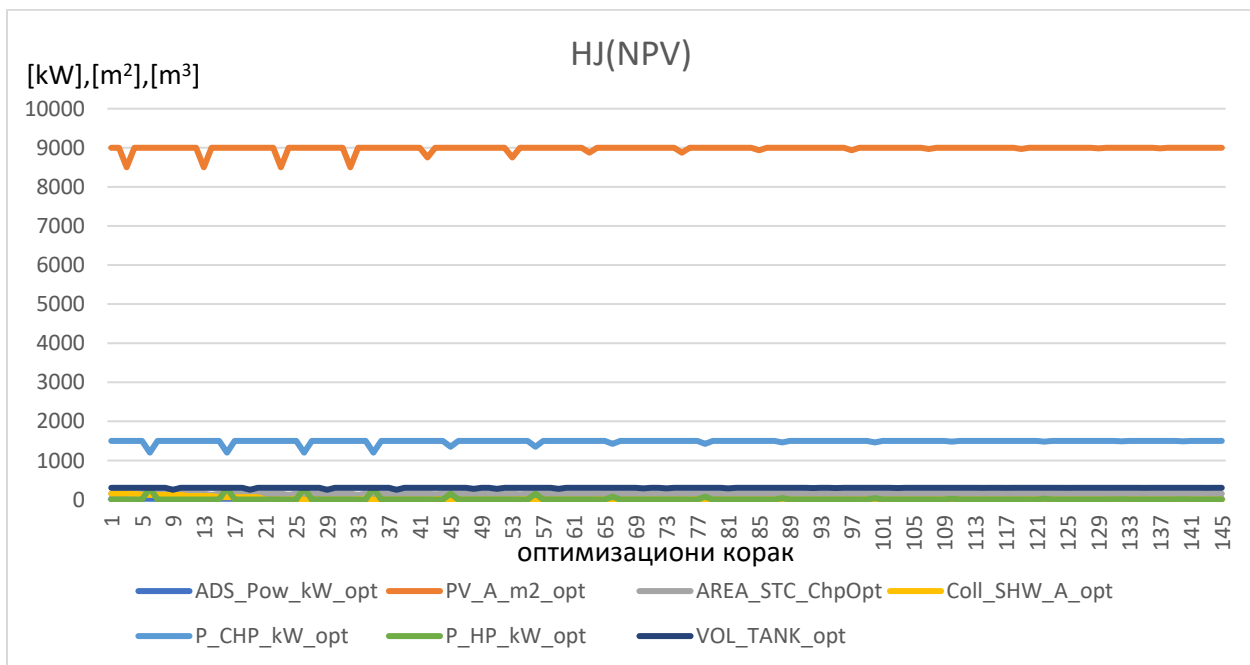
Слика 92. Вредности функције циља CO₂ добијених оптимизационим алгоритмом PSO



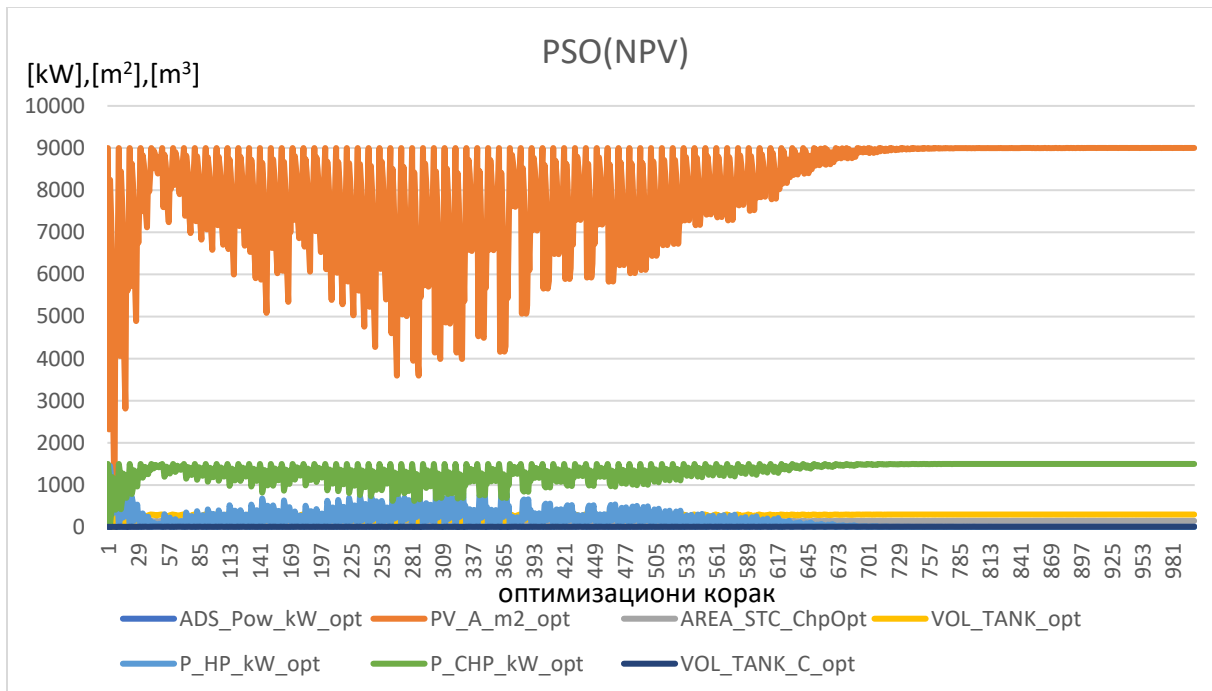
Слика 93. Вредности функције циља CO₂ добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO



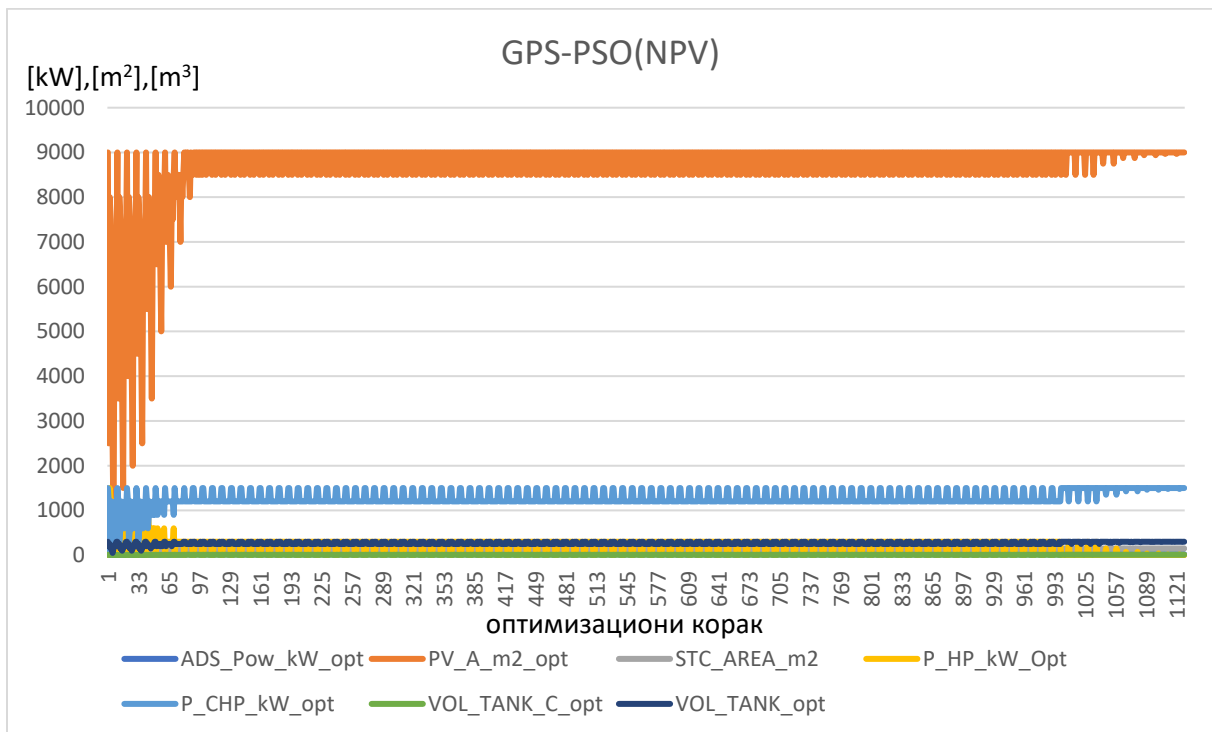
Слика 94 . Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму NPV



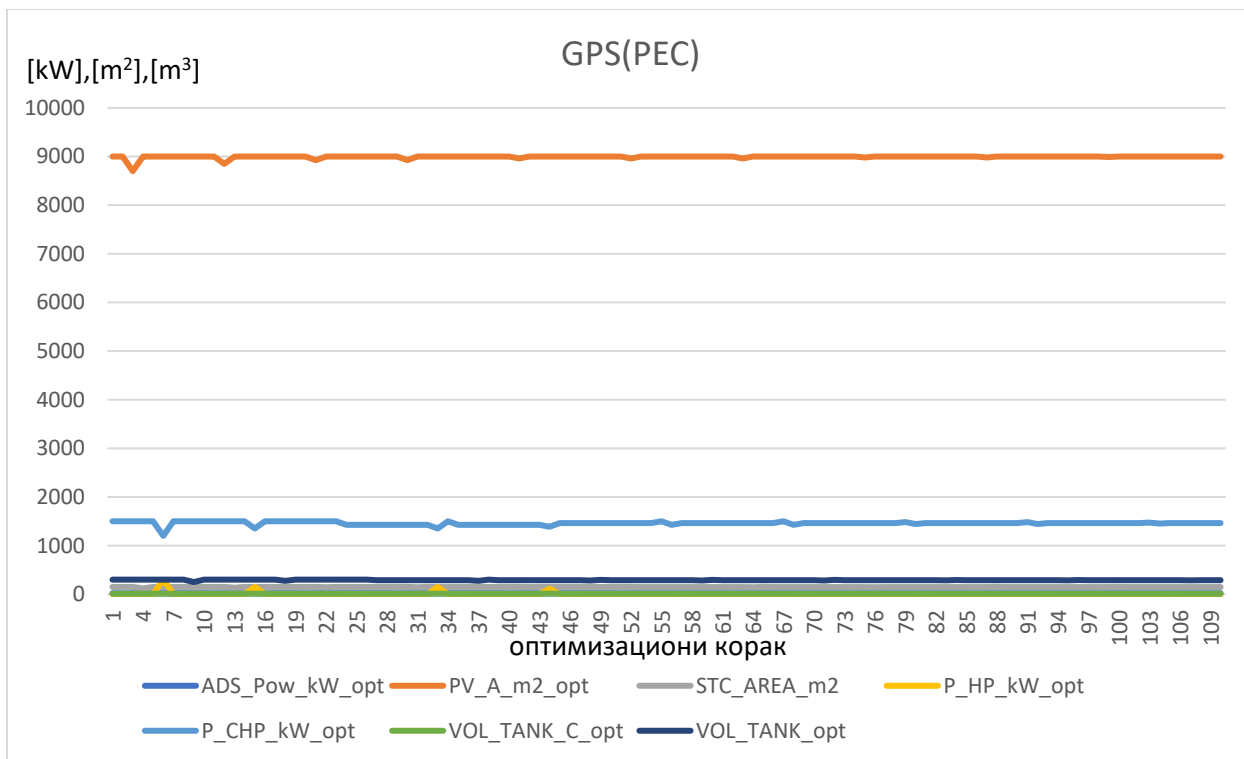
Слика 95 . Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму NPV



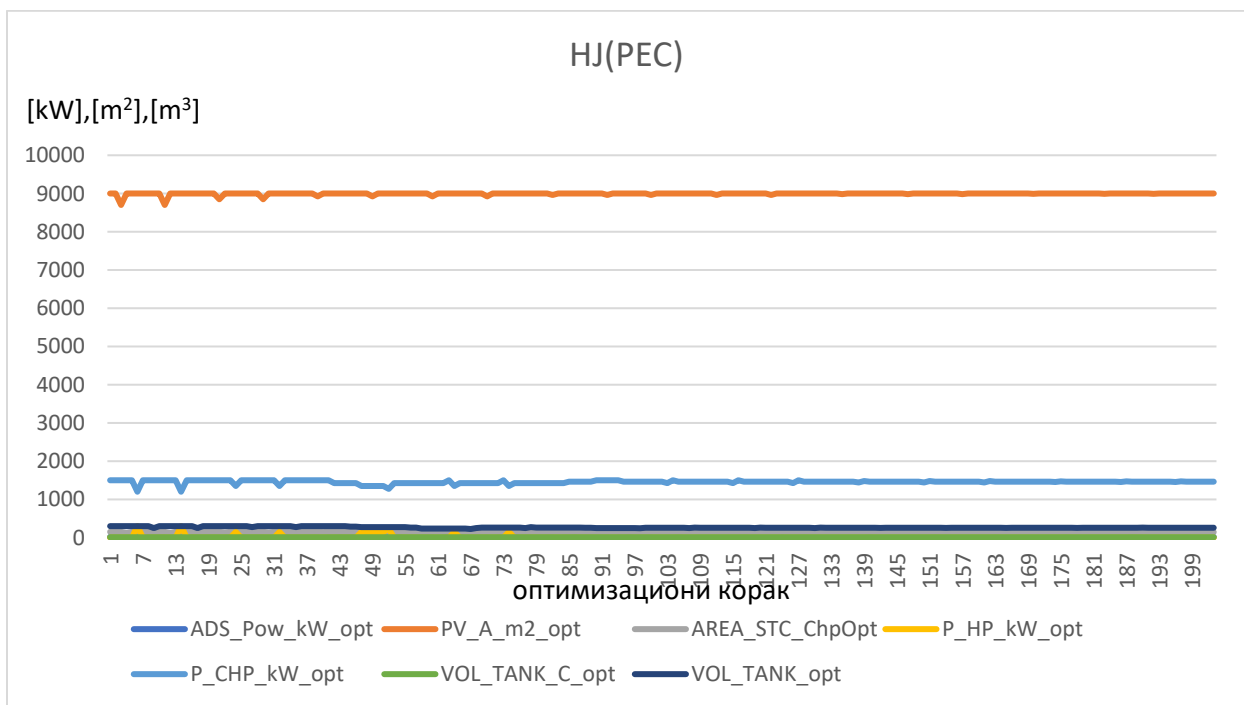
Слика 96. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму NPV



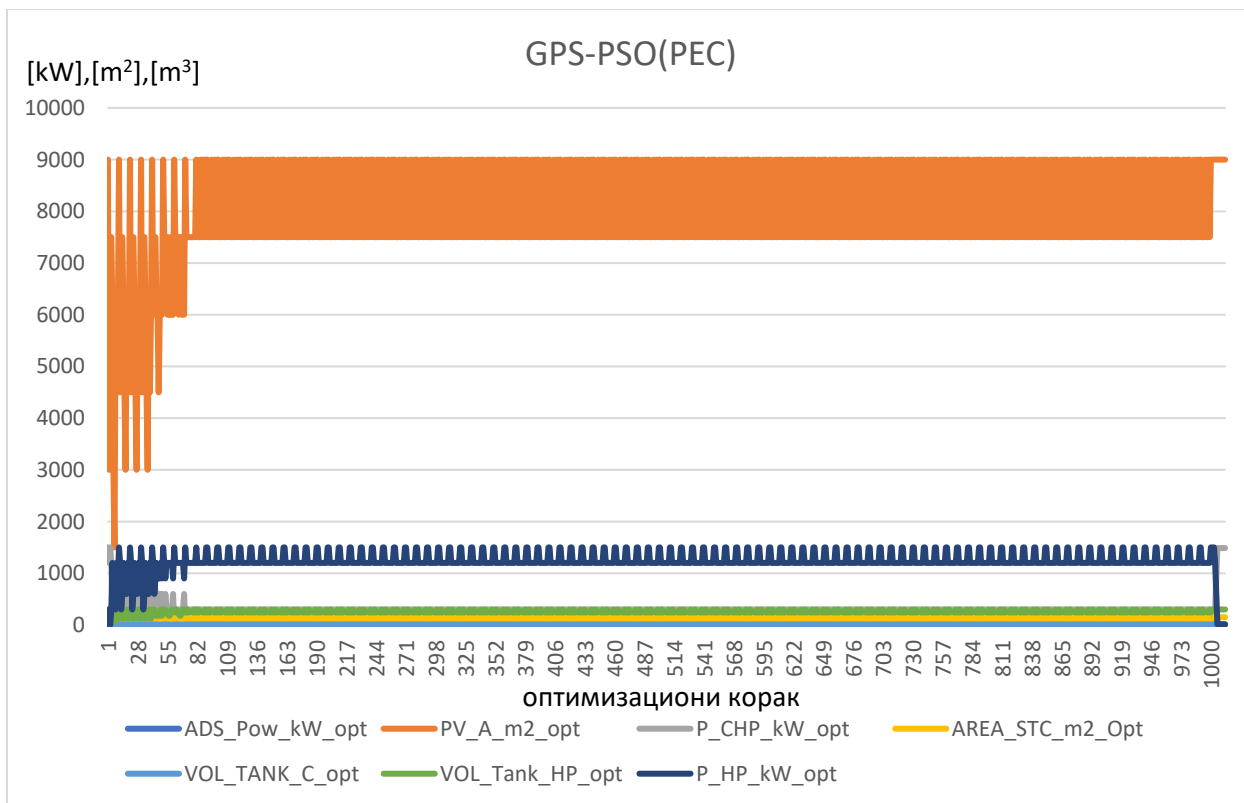
Слика 97. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS- PSO по критеријуму NPV



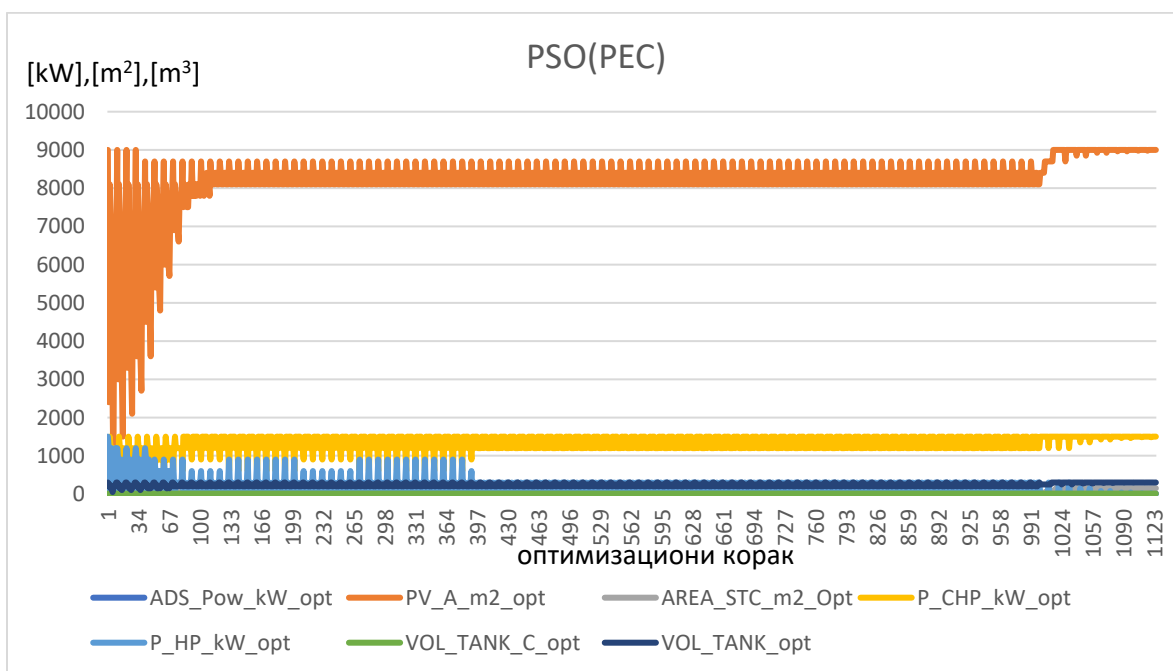
Слика 98. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму PEC



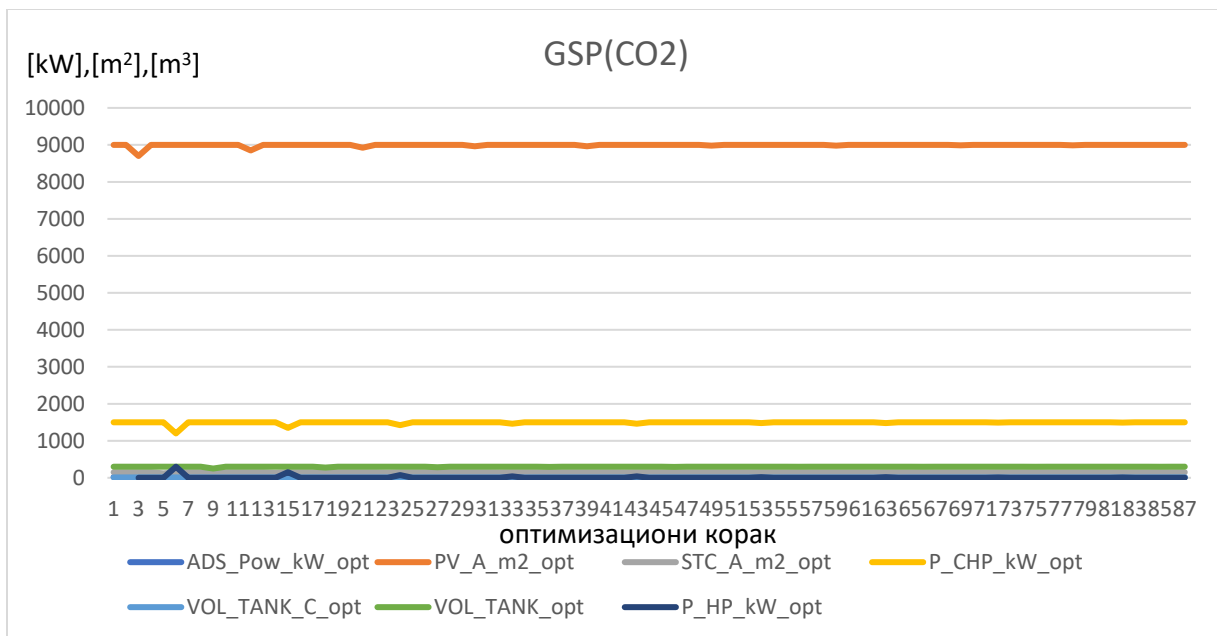
Слика 99. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом HJ по критеријуму PEC



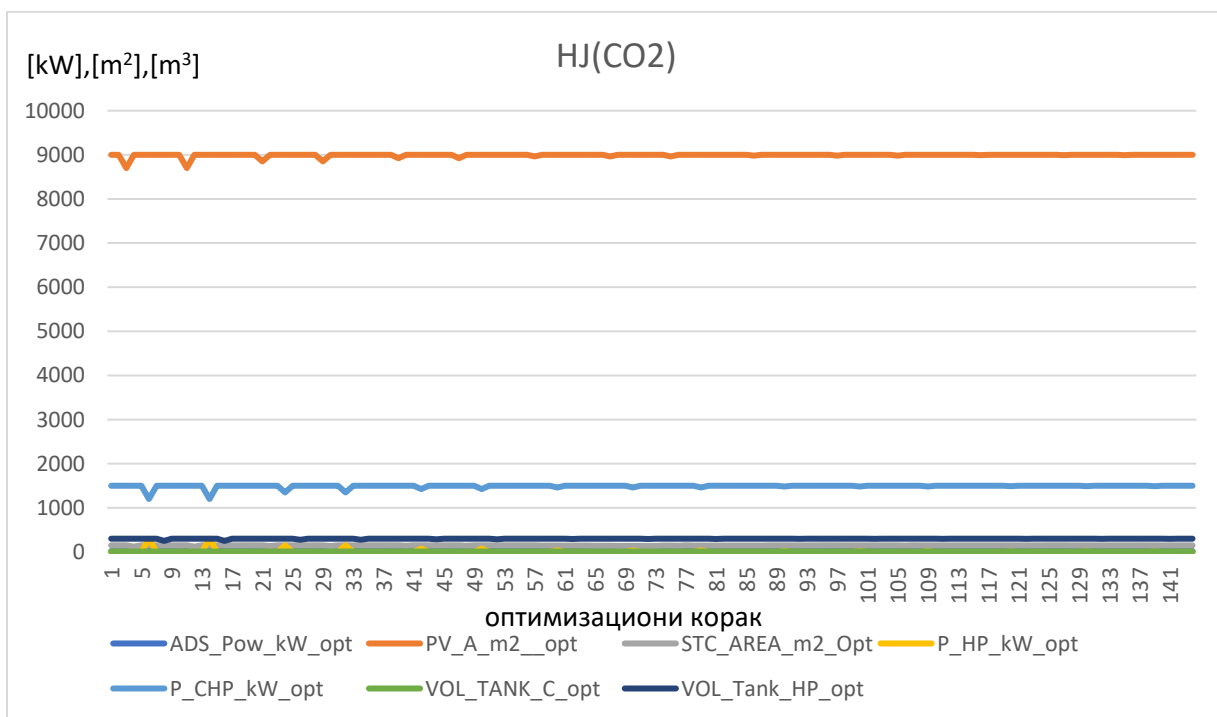
Слика 100 . Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO по критеријуму PEC



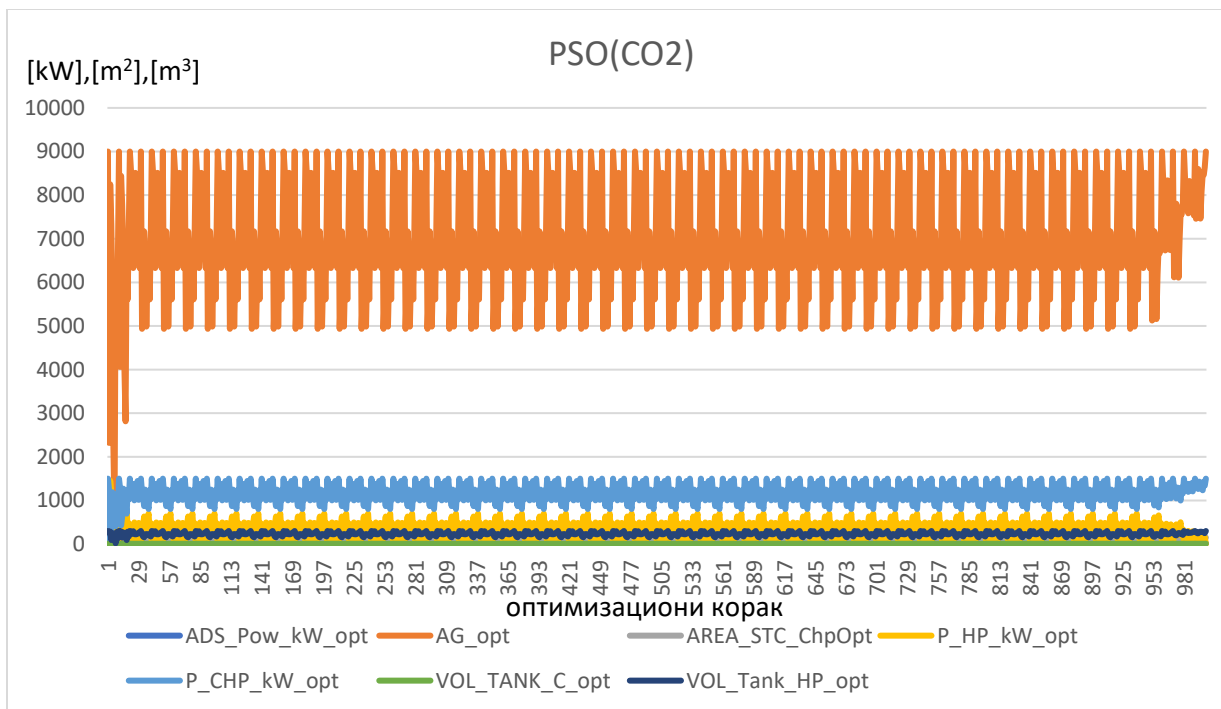
Слика 101. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму PEC



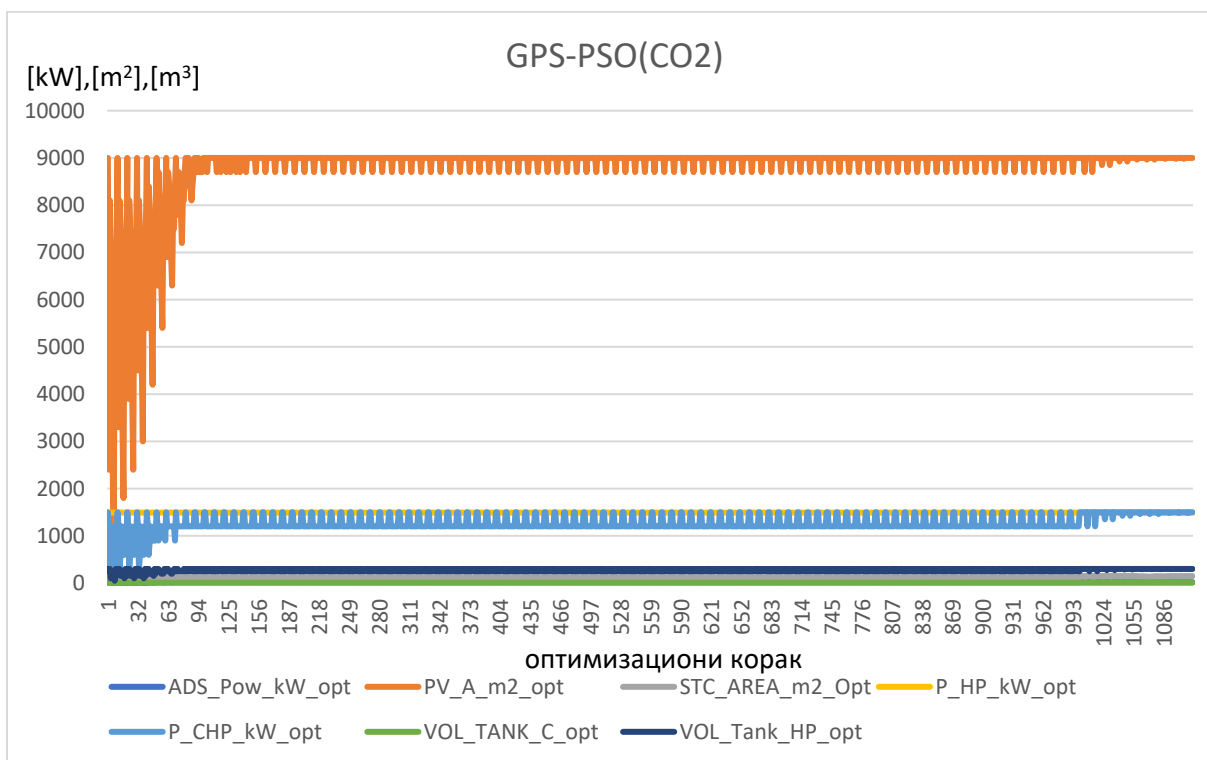
Слика 102. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму CO₂



Слика 103. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом HJ по критеријуму CO₂



Слика 104. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму CO₂



Слика 105. Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO по критеријуму CO₂

Списак табела

Табела 1. Карактеристике микро гасних турбина [9].....	22
Табела 2. Главне карактеристике когенерационих система са микротурбином	22
Табела 3. Мотори са унутрашњим сагоревањем [9].....	24
Табела 4. Карактеристике мотора са унутрашњим сагоравањем у оквиру когенерационог система (11).....	25
Табела 5. Стирлинг мотори [9]	27
Табела 6. Абсорпциони уређаји.....	29
Табела 7. Адсорпциони чилери [9].....	31
Табела 8. Карактеристике когенерационих модула [7 – 15].....	36
Табела 9. Перформансе и могућности примене сорпционих уређаја у зависности од примењених радниц парова [17]	38
Табела 10. Поређење адсорпционих и апсорпционих чилера	38
Табела 11. Преглед соларних колектора са главним карактеристикама	39
Табела 12. Поређење различитих материја за акумулацију енергије (акумулирана енергија $106 \text{ kJ}=300 \text{ kWh}$, $\Delta T=15\text{K}$) [28]	42
Табела 13. Поређење изабраних софтвера за симулацију и/или оптимизацију енергетских система.....	65
Табела 14. Библиотеке софтвера за симулацију појединих уређаја	66
Табела 15. Перформансе когенерационог сета мотора са генератором при промени оптерећења мотора (промена оптерећења приказана као удео номиналне вредности)	133
Табела 16. Вредности корелационих коефицијената [164].....	163
Табела 17. Губици топлоте базенске воде и базенске хале.....	174
Табела 18. Одређивање фактора набавне цене опреме <i>СрК</i>	181
Табела 19. Резултати оптимизације – вредности функције циља	182
Табела 20. Резултати оптимизације – снаге и капацитети полигенерационих модула оптималне конфигурације.....	183
Табела 21. Одређивање фактора <i>СрК</i>	199
Табела 22. Резултати оптимизације.....	201

Списак слика

Слика 1. Децентрализована полигенерација	19
Слика 2. Централни систем са децентрализованим хлађењем.....	20
Слика 3. Централизовани систем	20
Слика 4. Ефикасност микро турбине у функцији оптерећења [14]	23
Слика 5. Топлотни биланс клипног мотора СУС [11].....	25
Слика 6. Ефикасност горивих ћелија [15]	28
Слика 7. Ефикасност адсорпционог чилера [22].....	31
Слика 8. Вакумски колектор [23]	33
Слика 9. Струјно-напонска карактеристика соларне ћелије [24].....	35
Слика 10. Специфична цена акумулатора топлоте на основу водене запремине [29].....	41
Слика 11. Топлотна пумпа за грејање и хлађење са измењивим улогама топлотног извора и понора [30]	43
Слика 12. Дијаграм учинка топлотне пумпе [30]	44
Слика 13. Зависност коефицијента перформанси (Coefficient of performance – COP) од температуре са стране конзума топлотне пумпе [34]	45
Слика 14. Промена температуре земље у току године [33]; а) снага топлотне пумпе $P_{el}=8kW$; б) снага топлотне пумпе $P_{el}=14kW$	46
Слика 15. Шематска репрезентација модела суперструктуре за одређивање конфигурације полигенерационог система (где су: а,б,в -ресурси; 1,2,3 – полигенерациони модули, х,у,з – производи система).....	53
Слика 16. Обједињена шема симулираних конфигурација микро тригенерационих система: PV- фото напонски колектори; PV/Т- фото напонски/топлотни колектори, FPC – соларни топлотни колектори, ICE - мотор са унутрашњим сагоревањем са погоном на природни гас, GRID – национална мрежа електродистрибуције, АВС- абсорпциони чилер, НР- топлотна пумпа вода-вода.....	55
Слика 17. Алгоритам методологије техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу ОИЕ	84
Слика 18. Алгоритам интеграције полигенерационих система заснованих на ОИЕ	92
Слика 19. Интеграција полигенерационих модула: (В – топоводни котло, СНР – когенерациони модул, STC – соларни топлотни пријемници, GSHP – топлотна пумпа	

земља вода, VCC – компресорски чилер, PV – фотонапонски соларни пријемници, ADSC – адсорпциони чилер, ABSC – абсорпциони чилер).	96
Слика 20. Физички модел суперструктуре полигенерационог система [141]	98
Слика 21. Физички модел снабдевања конзума енергијом добијеном из полигенерационог система.....	102
Слика 22. Солвер 0 без релаксације	108
Слика 23. Солвер 0 са нумеричком релаксацијом	108
Слика 24. (1) Циклични ток информација, (2) Конвергенција сукцесивном апроксимацијом, (3) метода сечице	110
Слика 25. Контролна функција [103]	112
Слика 26. Топлотни биланс зоне [103]	113
Слика 27. Упаривање зона [103].....	115
Слика 28. Добици топлоте од радијације [103].....	115
Слика 29. Топлотни биланс било ког зида [103].....	116
Слика 30. Прозор као компонента са две нодалне тачке [103].....	117
Слика 31. Модел зида (лево реални зид, десно „black-box“ модел) [103].....	118
Слика 32. Звездана мрежа за зону са три површине [103].....	119
Слика 33. Потребна снага за задату температуру [103]	122
Слика 34. Акумулатор топлоте са стратификацијом [103].....	126
Слика 35. Струјање између сегмената [103]	128
Слика 36. Интеракција TRNSYS – GenOpt.....	144
Слика 37. Шематски приказ Хук Џивс оптимизационог алгоритма [146]: (I) почетна претрага, (II) основна претрага, (III) редукација корака претраге.....	150
Слика 38 Суперструктура полигенерационог система за потребе зграде затворених пливачких базена	158
Слика 39 Физички модел базена и базенске хале [57]	159
Слика 40 Апаратура за мерење.....	168
Слика 41 Измерене стопе испаравања у функцији од измерене брзине ваздуха	169
Слика 42 Измерене стопе испаравања као функција разлике парцијалних притисака водене паре ($\Delta p = p_{sw} - p_{air}$).....	169

Слика 43 Измерене стопе испаравања као функција разлике парцијалних притисака водене паре	170
Слика 44 Годишња промена температуре ваздуха базенске хале и воде, у различитим симулираним радним режимима.....	172
Слика 45 Поређење измерене и симулиране (T_{pool}) температуре базенске воде (T_w^*)..	175
Слика 46 Поређење измерене и симулиране релативне влажности базенске хале (RH) и измерене релативне влажности базенске хале (RH^*)	175
Слика 47 Поређење симулиране температуре ваздуха базенске хале (T_{air}) и измерене температуре ваздуха базенске хале (T_{air}^*)	175
Слика 48 Поређење вредности функције циља добијених различитим оптимизационим алгоритмима : вредности функције циља NPV , $C_{CO_2, poly}$ и PEC_{poly}	183
Слика 49 Поређење броја итерација у току оптимизације применом тестираних алгоритама	184
Слика 50 Суперструктура полигенерационог система за потребе сточарске фарме	188
Слика 51 Резултати симулације – месечна потрошња енергије: грејање, хлађење и енергије за загревање санитарне топле воде (STV) (141)	190
Слика 52 Поређење мерене (T^*_{boiler}) и симулиране (T_{boiler}) температуре на излазу из котла за спољашњу температуру од $5\pm 0,1^\circ C$	191
Слика 53 Поређење мерене (T_{return}^*) и симулиране ($T_{reeturn}$) температуре на излазу из зтграде фарме за спољашњу температуру од $5\pm 0,1^\circ C$	192
Слика 54 Поређење мерене (T_{s2}^*) и симулиране (T_{s2}) температуре на улазу у управну зграду за спољашњу температуру од $5\pm 0,1^\circ C$	192
Слика 55 Симулирана температура у зимском и летњем режиму: $HWST_{outlet}$ – температура радног медијума на излазу из акумулатора топлоте ка конзуму, $HWST_{return}$ – температура повратног радног медијума на улазу у акумулатор топлоте, $Office$ – Температура у управној згради, $Animal housing$ – температура у згради за смештај животиња.	193
Слика 56 Поређење вредности функције циља добијених различитим оптимизационим алгоритмима : вредности функције циља NPV , $C_{CO_2, poly}$ и PEC_{poly}	201
Слика 57 Поређења броја итерација у току оптимизације применом тестираних алгоритама	202

Слика 58	Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV	226
Слика 59	Резултати HJ оптимизационог алгоритма за критеријум NPV	227
Слика 60	Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум NPV	227
Слика 61	Резултати GPS- PSO оптимизационог алгоритма за критеријум NPV.....	228
Слика 62	Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PES	228
Слика 63	Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PES	229
Слика 64	Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PES	229
Слика 65	Резултати GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PES.....	230
Слика 66	Резултати GPS оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	230
Слика 67	Резултати HJ оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	231
Слика 68	Резултати PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	231
Слика 69	Резултати GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	232
Слика 70	Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV.....	232
Слика 71	Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум NPV	233
Слика 72	Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум NPV.....	233
Слика 73	Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум NPV.....	234
Слика 74	Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PES.....	234
Слика 75	Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум PES	235
Слика 76	Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO оптимизационог алгоритма за критеријум PES.....	235
Слика 77	Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO-GPS оптимизационог алгоритма за критеријум PES.....	236
Слика 78	Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	236

Слика 79 Вредности независно променљивих оптимизације применом HJ оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	237
Слика 80 Вредности независно променљивих оптимизације применом PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	237
Слика 81 Вредности независно променљивих оптимизације применом GPS-PSO оптимизационог алгоритма за критеријум CO ₂	238
Слика 82 Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом GPS	239
Слика 83 Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом HJ.	239
Слика 84 Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом PSO	240
Слика 85 Вредности функције циља NPV добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO.....	240
Слика 86 Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом GPS	241
Слика 87 Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом HJ..	241
Слика 88 Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO.....	242
Слика 89 Вредности функције циља PES добијених оптимизационим алгоритмом PSO	242
Слика 90 Вредности функције циља CO ₂ добијених оптимизационим алгоритмом GPS	243
Слика 91 Вредности функције циља CO ₂ добијених оптимизационим алгоритмом HJ..	243
Слика 92 Вредности функције циља CO ₂ добијених оптимизационим алгоритмом PSO	244
Слика 93 Вредности функције циља CO ₂ добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO.....	244
Слика 94 Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму NPV	245
Слика 95 Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму NPV	245
Слика 96 Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму NPV	246
Слика 97 Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS- PSO по критеријуму NPV.....	246

Слика 98	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму PES	247
Слика 99	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом HJ по критеријуму PES.....	247
Слика 100	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO по критеријуму PES.....	248
Слика 101	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму PES	248
Слика 102	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS по критеријуму CO ₂	249
Слика 103	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом HJ по критеријуму CO ₂	249
Слика 104	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом PSO по критеријуму CO ₂	250
Слика 105	Вредности независно променљивих добијених оптимизационим алгоритмом GPS-PSO по критеријуму CO ₂	250

Биографија аутора

Марко Манчић, дипломирани инжењер машинства – мастер, рођен је 10.05.1983. године у Нишу. Основну школу и гимназију завршио је у Нишу са одличним успехом као добитник Вукових диплома. Машински факултет Универзитета у Нишу, смер Термотехника, термоенергетика и процесна техника завршио је 2009. године са просечном оценом 9,14 и оценом 10 на одбрани дипломског рада. Добитник је Награде Партнерства за едукацију и развој локалне заједнице (The Partnership for Education and Community Development Scholarship Award) 2005. и 2006. године, које је доделио Institute of International Education, European Office supported by Philip Morris International.

Уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу школске 2009/2010. године. Од 2010. године, учествовао је у реализацији два пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја:

- „Развој фамилије плочастих размењивача топлоте ваздух-ваздух“ (ТР 18233) и
- „Истраживање и развој енергетски и еколошки високоефективних система полигенерације заснованих на обновљивим изворима енергије“ (Ш 42006).

У периоду 2013-2014. године, учествовао је у реализацији IPA Cross Border Cooperation пројекта "Sustainable development and competitiveness through increase of the energy efficiency by use of solar energy and smart systems".

2013. године, завршио је „Trnsys 17 advanced HVAC simulation and MathLab connection training, Trnsys days 2013“, на University of Liege у Белгији.

Од 2014. године је запошљен као истраживач сарадник на Машинском факултету Универзитета у Нишу, где учествује у извођењу вежби из предмета: Топлотне турбомашине, Когенерација, Енергетски менаџмент у општинама и градовима, Енергетски менаџмент у индустрији и Менаџмент технолошким развојем. Поседује знање енглеског, немачког и руског језика.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“

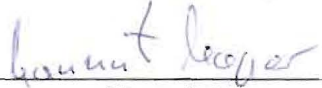
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 29.03.2018

Потпис аутора дисертације:


Манчић Марко

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

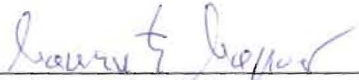
Наслов дисертације:

**„Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих
система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 29.03.2018

Потпис аутора дисертације:


Манчић Марко

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“

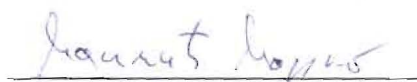
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)⁴

У Нишу, 23.03.2019

Потпис аутора дисертације:


Манчић Марко

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

1. Ауторство (CC BY)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. Уодносу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од 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 прерада (CC BY-ND)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од 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.

⁵ Више о лиценцама Креативне заједнице на адреси:

http://creativecommons.org.rs/?page_id=74CC. Овај текст НИЈЕ саставни део изјава аутора!

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име
Датум и место рођења

Манчић (Влада) Марко
10.05.1983. Ниш, Србија

Основне студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Термоенергетика и термотехника
Инжењер машинства-мастер
2002.
2009.
9,14

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Универзитет у Нишу
Машински факултет у Нишу
Термоенергетика и термотехника
Дипломирани инжењер машинства-мастер
2002.
2009.
9,14
Машинско инжењерство,
Ужа научна област - Термотехника, термоенергетика и процесна техника
Мерење протока флуида, бројила, нивометри

Докторске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Година уписа
Остварен број ЕСПБ бодова
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Енергетика и процесна техника
2009.
150
10,0

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске
дисертације
Име и презиме ментора,
звање
Број и датум добијања
сагласности за тему
докторске дисертације

Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система
заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије
др Драгољуб Живковић, редовни професор
НСВ број 8/20-01-005/15-22, у Нишу 27.05.2015. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна
Број поглавља
Број слика (шема, графикона)
Број табела
Број прилога

261
7
57
22
2

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ
28.12.2017.
612-80-458/17

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Pedja Milosavljević, Milena Todorović, Mathematical Modelling and Simulation of the Thermal Performance of a Solar Heated Indoor Swimming Pool, Thermal Science Vol. 18, No. 3, 2014, pp 999-1010, DOI: 10.2298/TSC11403999M</p> <p>У раду је представљен проблем енергетског билансирања затворених пливачких базена, са посебном анализом математичких корелација за одређивање коефицијента исплапљивања са слободне водене површине базена. Извршено је математичко моделирање и нумеричка симулација базена, базенске хале и зграде затворених пливачких базена применом TRNSYS модела више зонског објекта. Анализа резултата симулације показала је удео појединих губитака енергије у енергетском билансу зграда пливачких базена у току типичне метеоролошке године, могући утицај радних стратегија система грејања и вентилације на потрошњу. Извршена је и симулација потрошње санитарне топле воде базена, и димензионисање система равних соларних пријемника за загревање санитарне топле воде и базенске воде.</p>	M22
2.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Milan Djordjević, and Milena N. Rajić, Optimization of a polygeneration system for energy demands of a livestock farm, THERMAL SCIENCE, Year 2016, Vol. 20, Suppl. 5, pp. S1285-S1300</p> <p>У раду је разматран проблем оптималне конфигурације и капацитета полигенерационог система за потребе сточарске фарме. У раду је представљен и решен наведени оптимизациони проблем. Моделирање и симулација промене енергетског конзума реалне фарме извршено је применом софтвера TRNSYS. Извршен је избор полигенерационих модула оптимизационе суперструктуре. Моделирање понашања полигенерационих модула и енергетског конзума и решавање оптимизационог проблема извршено је применом TRNSYS-GenOpt оптимизације. Критеријуми оптимизације су нето садашња вредност, потрошња примарне енергије полигенерационог система и емисија CO₂ у току типичне метеоролошке године.</p>	M23
3.	<p>Goran Jovanović, Dragoljub Živković, Marko Mančić, Vladana Stanković, Danica Stanković, Velimir Stefanović, Petar Mitković., A model of a Serbian energy efficient house for decentralized electricity production, Journal of Renewable Sustainable Energy 5, 041810, (2013) pp 1-14; doi: 10.1063/1.4812997, http://dx.doi.org/10.1063/1.4812997, Published by the AIP Publishing LLC</p> <p>У раду је представљен модел српске енергетски ефикасне куће за децентрализовану производњу електричне енергије. Математичко моделирање и нумеричка симулација модела ове куће извршена је применом модела више зонског објекта софтвера TRNSYS. Поред моделирања зграде, извршено је моделирање потрошње електричне енергије у току године у току године, као и моделирање хибридног енергетског система објекта који се састоји од топлотне пумпе вода-вода и хибридних соларних топлотних-фотонапонских колектора фасадних и кровних колектора. Извршена је анализа удела електричне енергије који се може подмирити електричном енергијом добијеном применом хибридних фасадних топлотних-фотонапонских колектора и дате су могући правци модификације модела објекта ради повећања удела сопствене производње електричне енергије.</p>	M23
4.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Bojana Vukadinović, Aleksandar Čosović, Techno-economic optimization of energy supply of a livestock farm, FACTA UNIVERSITATIS, Series: "Working and living environmental protection", Vol.12, No 2, 2015, pp. 199 – 216, UDC 620.91:636.2.03</p> <p>У раду је представљен стационарни енергетски биланс сточарске фарме на основу прикупљених и измерених података и одређене су вредности индикатора енергетске ефикасности фарме. Извршена је прелиминарна анализа могућих опција за снабдевање фарме топлотном и електричном енергијом и извршено је поређење могућих решења на основу срачунатих економских параметара сваке од опција. Поређењем вредности ових параметара, извршен је избор оптималног решења за снабдевање енергијом.</p>	M52
5.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Velimir Stefanović, Milan Đorđević, Saša Pavlović, Review of Software for Simulation And Optimization Of Energy Systems, Proceedings, 15. Symposium on</p>	M33

	<p>Thermal Engineering in Serbia, SIMTERM 2011, 18-21. October 2011., Soko Banja, Serbia, ISBN 978-86-6055-018-9, pp 113-126</p> <p>У раду је извршен преглед карактеристика и могућности софтвера за симулацију и оптимизацију енергетских система. Главне карактеристике и могућности софтвера су груписане и систематизоване у раду ради лакшег и прегледнијег поређења. Извршена је анализа могућности појединих софтвера као и класификација по типовима солвера, графичког корисничког интерфејса и одабраних могућности.</p>	
6.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Milan Đorđević, Milena Todorović, Saša Pavlović, Comparison of performances of micro hybrid trigeneration systems for energy demands of a small residential building, The Proceedings of the III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection (IIZS 2013), ISBN 978-86-7672-208-2, pp 388-393</p> <p>У раду је извршено моделирање и нумеричка симулација малог стамбеног објекта, моделирање и симулација енергетског конзума овог објекта и различитих енергетских система подмиривање његових енергетских потреба. Моделирање и симулација вршени су применом софтвера TRNSYS за типичну метеоролошку годину, У раду је представљено поређење резултата добијених применом изабраних технологија (микро когенерација, топлотна пумпа, соларни система).</p>	M33
7.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković and Milena Todorović, Mathematical models for evaluating evaporation rates from free water surface of indoor swimming pools, XII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements Niš, Serbia, November 12th-14th, 2014. pp 41-44</p> <p>У раду је представљен значај коефицијента испарљивања за математичко моделирање пливачких базена и приказане су корелације из литературе за одређивање овог коефицијента. Како постоји велика разлика у решењима која се добијају применом корелација из литературе, у раду су представљена мерења утицајних параметара и коефицијента испарљивања. Измерене вредности су поређене са решењима корелација из литературе како би се одредила најбоља корелација.</p>	M33
8.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Milena Todorović, Comparison of annual performance of micro-trigeneration systems, International Scientific Conference UNITECH, 21-22 November 2014, Gabrovo, Bulgaria, pp 184-191</p> <p>У раду је извршено моделирање и нумеричка симулација моделирање различитих тригенерационих система моделираних за потребе изабраног енергетског конзума. Моделирање и симулација вршени су применом софтвера TRNSYS за типичну метеоролошку годину, У раду је представљено поређење резултата добијених применом изабраних технологија: когенерација заснована на мотору СУС, топлотна пумпа, као и анализа хибридних система са применом соларних колектора.</p>	M33
9.	<p>Marko Mančić, Dragoljub Živković, Milena Todorović, Techno Economic Optimization Of A Biogas Cogeneration System, Proceedings Of The Third International Conference Mechanical Engineering In XXI Century, pp 67-70</p> <p>У раду је разматран проблем оптималне конфигурације и капацитета биогасног когенерационог постројења за потребе сточарске фарме. Моделирање и симулација енергетског конзума фарме извршено је применом софтвера TRNSYS. На основу прегледа литературе, изабран је мотор СУС за когенерационо постројење за потребе фарме. У раду је извршена TRNSYS-GenOpt оптимизација снаге мотора СУС и акумулатора топле воде, а гранични услови оптимизације су одређени на основу пројектног топлотног оптерећења на фарми и процењене продукције биогаса. Нето садашња вредност је коришћена као функција циља.</p>	M33
10.	<p>Velimir Stefanović, Marko Mančić, Saša Pavlović, Marko Ilić, Milan Đorđević, Eksperimentalno hibridno laboratorijsko poligeneraciono postrojenje sa primenom solarne energije, Korisnik tehničkog rešenja: Mašinski fakultet Niš, za potrebe projekta: "Istraživanje i razvoj energetski i ekološki</p>	M83

visokoefektivnih sistema poligeneracije zasnovanih na obnovljivim izvorima energije". 2015. god.
http://www2.masfak.ni.ac.rs/uploads/articles/www2_teh_resenje_v_stefanovicpoligen_postrojenje.pdf

У раду је представљено хибридно лабораторијско полигенерационо постројење са применом соларне енергије за лабораторијске потребе Машинског факултета у Нишу. У раду је представљен опис система, функција система и главне карактеристике.

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

Кандидат Марко Манчић је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија на студијском програму Машинско инжењерство, објавио већи број научних радова и поднео радну верзију докторске дисертације одговарајуће садржине, обима и квалитета, у складу са одобреном темом докторске дисертације.

Кандидат Марко Манчић поднео је 28.11.2014. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу захтев (број 613-719/2014) за одобрење теме докторске дисертације под насловом „Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 24.12.2014. године, одлуком број 612-748-6/2014, именovalo Комисију за оцену научне заснованости наведене теме у саставу: др Драгољуб Живковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Војин Грковић, редовни професор Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду, др Видоје Стефановић, редовни професор Природно-математичког факултета у Нишу, др Мића Вукић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу и др Дејан Митровић доцент Машинског факултета у Нишу. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној 19.01.2015. године, Одлуком број 8/20-01-001/15-12, дало сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу о именовању наведене комисије.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 30.03.2015. године на основу Извештаја Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације Одлуком број 612-220-6/2015 усвојило наведену тему докторске дисертације и предложило др Драгољуба Живковића, редовног професора Машинског факултета у Нишу, за ментора.

Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној 27.05.2015. године Одлуком број 8/20-01-005/15-22 дало сагласност на Одлуку о усвајању теме докторске дисертације и одлуком број 8/20-01-005/15-23 од 27.05.2015. године именovalo др Драгољуба Живковића, редовног професора Машинског факултета у Нишу, за ментора за израду докторске дисертације.

Кандидат Марко Манчић је 05.10.2017. године поднео захтев Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу за одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 30.10.2017. године, одлуком број 612-484-5/2017, именovalo Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Манчића под називом „Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“, у саставу: др Драгољуб Живковић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Нишу, др Милан Петровић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, др Мића Вукић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Нишу, др Видоје Стефановић, редовни професор у пензији Природно-математичког факултета Универзитета у Нишу и др Дејан Митровић ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Нишу.

Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној 30.11.2017. године Одлуком број 8/20-01-008/17-018 дало сагласност на именовану Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације на Машинском факултету у Нишу кандидата Марка Манчића, под називом „Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“.

Кандидат Марко Манчић је првопотписани аутор више од једног рада објављеног у часопису са SCI листе из теме докторске дисертације, као и првопотписани аутор једног рада објављеног у часопису који издаје Универзитет у Нишу из уже научне области којој припада тема докторске дисертације.

На основу претходно наведеног, кандидат Марко Манчић испуњава све услове за оцену и одбрану докторске дисертације предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета у Нишу.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације

Докторска дисертација се састоји из 7 поглавља и одговарајућих прилога, као и пописа слика и табела. По форми и садржају рад у потпуности испуњава постојеће стандарде за докторску дисертацију. Наслови поглавља у докторској дисертацији су следећи:

1. Увод
2. Полигенерациони системи засновани на ОИЕ
3. Оптимизација полигенерационих система
4. Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу ОИЕ
5. Оптимизација конфигурације и капацитета полигенерационих система за потребе изабраних реалних објеката
6. Закључак
7. Литература

У *Првом поглављу* представљени су основни појмови полигенерације и оптимизације, представљен је значај примене и оптимизације полигенерационих система и изазови у погледу њихове оптимизације. Дефинисани су циљеви истраживања и истраживачке методе.

У *Другом поглављу* извршен је преглед литературе о полигенерационим системима и дат је опис разматраних полигенерационих технологија као и поређење главних карактеристика полигенерационих технологија. На основу поређења, изабране су полигенерационе технологије које су даље разматране у раду у проблемима оптимизације.

У *Трећем поглављу* представљен је преглед литературе о оптимизацији полигенерационих система, критеријумима оптимизације полигенерационих система, математичком моделирању оптимизационог проблема и методама за решавање проблема оптимизације полигенерационих система. Описана је метода математичког моделирања и нумеричке симулације полигенерационих система за потребе оптимизације полигенерационих система применом симулационог софтвера. Представљено је поређење главних карактеристика пет софтвера и извршен је избор методе и софтверског алата за математичко моделирање, нумеричку симулацију и оптимизацију полигенерационих система. Представљене су методе економске анализе полигенерационих система и економских параметара који се могу користити за економску оцену полигенерационих система.

У *Четвртом поглављу* представљена је Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије. Описана је методологија, представљен је алгоритам методологије и описане су фазе и активности које подразумева методологија. Описани су аспекти прикупљања података неопходних за решавање проблема оптимизације полигенерационих система, представљени су технолошки услови оптимизације, дата је њихова математичка презентација и описана примењена метода математичког моделирања и нумеричке симулације применом изабраног софтвера. Дати су опис софтвера TRNSYS, карактеристике његовог солвера и изабраних математичких модела полигенерационих модула. Описан је поступак вршења валидације формираног модела и његове валидације поређењем са резултатима мерења на реалном објекту. Представљен је опис GenOpt оптимизације, класификација оптимизационих проблема који се могу решавати његовом применом и дат је опис оптимизационих алгоритама коришћених за оптимизацију полигенерационих система чији су резултати тестирани оптимизацијом полигенерационих система за два реална објекта.

У *Петом поглављу* су представљени оптимизациони проблеми дефинисани и постављени применом методологије предложене у четвртом поглављу за потребе оптимизације конфигурације и капацитета полигенерационог система за потребе два реална објекта: јавног објекта затворених пливачких базена и сточарске фарме. Представљени су математички модели наведених објеката и суперструктуре потрошње енергије полигенерационих система као и примењене функције циља. За потребе математичког моделирања затворених пливачких базена, посебна пажња је посвећена одређивању коефицијента исхлалпљивања, као значајног утицајног фактора у енергетском билансу оваквих објеката. У раду су приказани резултати мерења количине исхлалпеле воде са слободне водене површине затвореног пливачког базена спроведених на реалном објекту и дата је математичка корелација за одређивање коефицијента исхлалпљивања који је коришћен за потребе математичког моделирања и нумеричких симулација овог објекта. Применом формиране корелације добијене на основу измерених вредности параметара на реалном објекту, повећана је прецизност модела. Валидација симулационог модела извршена је на основу измерених вредности изабраних параметара са реалног објекта. Приказани су резултати GenOpt оптимизације добијени применом четири тестирана оптимизациона алгорита, на основу технолошких, економских и еколошких критеријума оптимизације. У овом поглављу, извршено је и математичко моделирање и нумеричка симулација енергетског конзума реалне сточарске фарме и суперструктуре полигенерационог система за потребе ове фарме. Извршена је валидација симулационог модела и тестирање GenOpt оптимизације применом

четири изабрана алгоритма, а на основу технолошких, економских и еколошких критеријума дефинисаних методологијом. Представљено је поређење резултата оптимизације добијених применом тестираних GenOpt алгоритма за наведена два реална објекта и на основу поређења резултата изабран је најбољи оптимизациони алгоритам (Хибридни алгоритам General Patern Search – Particle Swarm Algorithm) за оптимизацију полигенерационих система са коришћењем обновљивих извора енергије.

У Шестом поглављу су дати закључци до којих је аутор дошао у току истраживања и анализом добијених резултата.

У Седмом поглављу представљен је приказ коришћене литературе (218 цитираних библиографских јединица).

У Прилогу су приказани:

Прилог 1 – Резултати Genopt оптимизације полигенерационог система за потребе затворених пливачких базена;

Прилог 2 – Резултати Genopt оптимизације полигенерационог система за потребе сточарске фарме.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације

Истраживањем у оквиру докторске дисертације, кандидат Марко Манчић је остварио све циљеве постављене у пријави теме докторске дисертације. Основни циљеви истраживања били су: избор методе и алата за математичко моделирање и нумеричко решавање потрошње и производње енергије; формирање физичког и математичког модела потрошње одговарајућих облика финалне енергије одабраних објеката; валидација модела потрошње енергије реалног објекта и унапређење постојећег модела уз повећање прецизности за одабрани тип објекта; формирање физичког и математичког модела могућих конфигурација полигенерационих система за потребе различитих облика финалне енергије; развој алгоритма техно-економске оптимизације полигенерационих система; дефинисање оптимизационих променљивих које дефинишу конфигурацију, технологију и капацитет полигенерационих система; дефинисање технолошких, економских и еколошких критеријума оптимизације; развој функције циља техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије; нумеричко решавање проблема оптимизације употребом одабраних оптимизационих алгоритама за реалне објекте; упоредна анализа примене одабраних оптимизационих алгоритама за техно-економску оптимизацију полигенерационих система заснованих на обновљивим изворима енергије; избор оптимизационог алгоритма за техно-економску оптимизацију полигенерационих система на основу резултата добијених употребом различитих алгоритама.

Кандидат је такође у потпуности реализовао и све појединачне циљеве експерименталног и нумеричког истраживања постављене пријавом ове теме.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације

Тема истраживања докторске дисертације је веома значајна, како због актуелности проблематике оптимизације полигенерационих система, тако и због могућности проширења примене представљене методе за оптимизацију полигенерационих система за потребе процесне индустрије, што представља оправдан разлог за додатна истраживања и публиковање резултата. Основни научни доприноси дисертације се огледају у следећем:

- Повећан је ниво знања о методама техно-економске оптимизације полигенерационих система;
- Развијена је метода физичког и математичког моделирања енергетског конзума реалних објеката и нумеричко решавање ових модела употребом софтверског алата;
- Развијени су физички и математички модел суперструктуре полигенерационог система за трансформацију енергије фосилних горива, соларне енергије, биогаса и геотермалне енергије, за потребе одабраних реалних објеката;
- Представљени су критеријуми техно-економске оптимизације полигенерационих постројења и функција циља техно-економске оптимизације полигенерационих система,
- Представљени су параметри оптимизације који се по предложеној методологији користе за оптимизацију конфигурације и капацитета полигенерационих система,
- Представљен је оптимизациони алгоритам за добијање глобалног решења техно-економске оптимизације полигенерационих система употребом софтверских алата.

У раду је описана ефективна и ефикасна методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснована на примени математичких модела који описују динамичко понашање система у току типичне метеоролошке године. Методологија је тестирана и дала резултате оптимизације полигенерационих система за потребе два реална објекта.

Представљен је побољшани математички модел затворених пливачких базена, са формираном корелацијом исхлапљивања добијеном на основу измерених вредности утицајних параметара на реалном објекту, који се може користити за потребе других истраживања, моделирања и симулације ове врсте објеката.

Оцена самосталности научног рада кандидата

Кандидат је показао висок ниво самосталности, креативности и систематичности у истраживању и испољио способност анализе научних знања из задате области уз оригиналност у креирању научних и стручних решења. Кандидат је показао детаљну, свеобухватну и квалитетну анализу постојеће научне литературе из области теме докторске дисертације. Кандидат поседује потребна мултидисциплинарна знања и способност њихове синтезе у изради дисертације. Кандидат је показао висок ниво самосталности, систематичности и оригиналне вештине у решавању задатака. Спроведеним истраживањима у оквиру ове дисертације кандидат је показао да успешно користи знања из математичког моделирања и оптимизационих метода сложених енергетских система, као и да поседује потребан ниво самосталности у реализацији експерименталних истраживања и софтверских симулација и оптимизација енергетских процеса.

ЗАКЉУЧАК

Прегледом докторске дисертације и анализом приказаних резултата, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације доноси следеће закључке:

- Садржај поднете докторске дисертације у потпуности одговара теми коју је верификовала Комисија за оцену подобности и научне заснованости докторске дисертације и усвојило Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Нишу и Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу;
- Кандидат је овладао знањима из области метаматичког моделирања, нумеричких симулација и оптимизације сложених енергетских система потребним за израду докторске дисертације;
- Кандидат је приказао потребну самосталност и инвентивност у научно-истраживачком раду и дошао до оригиналних резултата;
- Кандидат је у приказу истраживања користио уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама;
- Добијени резултати су конкретни и апликативни и омогућавају моделирање и оптимизацију сложених енергетских система у фази планирања.

На основу наведених закључака и остварених научних резултата кандидата публикованих у часописима и саопштених на тематским конференцијама из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације сматра да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан допринос развоју ове научне области и предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу и Научно-стручном већу Универзитета у Нишу да рад Марка Манчића, дипл. маш. инжењера-Мастер, под називом:

„Методологија техно-економске оптимизације полигенерационих система заснованих на коришћењу обновљивих извора енергије“

прихвати као докторску дисертацију и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке НСВ о именовану Комисије		8/20-01-008/17-018	
Датум именовања Комисије		30.11.2017.	
Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	Др Драгољуб Живковић, редовни професор		
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	
2.	Др Милан Петровић, редовни професор		
	Термоенергетика (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Београду (Установа у којој је запослен)	
3.	Др Мића Вукић, редовни професор		
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	
4.	Др Видоје Стефановић, редовни професор у пензији		
	Економија (Научна област)	Природно-математички факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	
5.	Др Дејан Митровић, ванредни професор		
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

Децембар 2017. год.,

у Нишу и Београду