



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Јасмина Д. Скерлић

**ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛОЖАЈА ПРИЈЕМНИКА
СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД КУЋА СА
НЕТО-НУЛТОМ ПОТРОШЊОМ ЕНЕРГИЈЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2015.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ	
<i>I. Аутор</i>	
Име и презиме:	Јасмина Скерлић
Датум и место рођења:	26.08.1974. Крагујевац
Истраживачко звање:	Сарадник - истраживач Универзитета у Крагујевцу
<i>II. Докторска дисертација</i>	
Наслов:	ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛОЖАЈА ПРИЈЕМНИКА СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД КУЋА СА НЕТО-НУЛТОМ ПОТРОШЊОМ ЕНЕРГИЈЕ
Број страница:	129
Број слика:	91
Број библиографских података:	98
Установа и место где је рад израђен:	Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК):	621.472:728.3
Ментор:	др Милорад Бојић, ред. проф. Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
<i>III. Оцена и одбрана</i>	
Датум пријаве теме:	12. 09. 2011. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	01-1/4313-19 од 22.12. 2011. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none"> Др Милорад Бојић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу Др Небојша Лукић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Јован Петровић, ванр. проф., Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду;
Комисија за оцену докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> Др Милорад Бојић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу Др Небојша Лукић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Јасна Радуловић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Вања Шуштершич, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Јован Петровић, ванр. проф., Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду;
Комисија за одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> Др Милорад Бојић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу Др Небојша Лукић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Јасна Радуловић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Вања Шуштершич, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу Др Јован Петровић, ванр. проф., Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду;
Датум одбране дисертације:	2015. година

*Мојој мајци,
у знак сећања на мог оца*

ЗАХВАЛНИЦА

Ова докторска дисертација је настала као резултат истраживања на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије "Истраживања и развој српске нето-нулте енергетске куће", под руководством проф. др Милорада Бојића.

Свако научно истраживање је и истраживање сопствених граница и моћи. Ментори су ту да би нас својим знањем и искуством подстакли да померамо границе и откривамо ненаслућене моћи, а породица и пријатељи да би нам давали смисао, љубав и снагу.

Хвала мом ментору, проф. др Милораду Бојићу на несебичној помоћи и подрици у свим фазама израде ове дисертације, као и на безграничном поверењу и подрици, корисним саветима, како током израде дисертације тако и током наше дугогодишње сарадње.

Хвала драгој проф. др Јасни Радуловић на значајним саветима и подрици током целокупног процеса израде дисертације.

Хвала, драгој проф. др Вањи Шуштершич на сугестијама и корисним саветима у завршној фази израде докторске дисертације.

Хвала мојој највећој подрици и животној снази супругу Александру и сину Страхињи на безграничном разумевању током израде докторске дисертације.

*мај 2015.
Крагујевац*

Аутор

ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛОЖАЈА ПРИЈЕМНИКА СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД КУЋА СА НЕТО-НУЛТОМ ПОТРОШЊОМ ЕНЕРГИЈЕ

Резиме

Предмет рада ове докторске дисертације је динамичка симулација и оптимизација соларних инсталација за грејање санитарне топле воде (СТВ) које опслужују куће нето-нулте потрошње енергије. Рад се бави оптимизацијом пројектовања, реализацијом у пракси и радом соларних пријемника у простору и времену као елемената соларних инсталација које се изучавају.

Научни циљ дисертације је утврђивање утицаја појединих пројектних елемената инсталације, начина рада са инсталацијом, енергетских потреба куће са нето-нултом потрошњом, утврђивање утицаја метеоролошких параметара на оптимални положај соларног пријемника у времену и простору, као и успостављање одговарајуће међусобне зависности свих тих параметара.

Главне предности инсталације испитиване у овој докторској дисертацији, у односу на претходна истраживања су да су оптимизовањем положаја пријемника соларне енергије код кућа са нето-нултом потрошњом енергије добијене највеће вредности соларног удела. Унапређени соларни енергетски системи омогућили су да се остваре максималне вредности енергије и ексергије, са максималном енергетском и ексергетском ефикасношћу, као и минималним утрошком фосилне енергије. Поред наведених предности коришћење оваквих система омогућава смањење коришћења енергетских ресурса, максимирање енергетске сигурности и минимизирање утицаја на околну средину.

С циљем утврђивања изводљивости предложеног концепта коришћене су савремене методе енергомониторинга и енергодијагностике, спроведена су испитивања соларне инсталације код кућа нето-нулте потрошње енергије развијањем математичког модела, методологије и алгоритма за динамичку симулацију и оптимизацију рада соларне инсталације.

Анализом резултата истраживања закључено је да постоји оправданост постављања соларног пријемника у тачно оптималан положај у простору и времену.

Кључне речи: оптимизација, соларни систем за грејање СТВ, симулација, соларни пријемник, соларни удео

OPTIMIZATION OF THE SOLAR COLLECTORS` POSITION IN HOUSES WITH NET-ZERO ENERGY CONSUMPTION

Abstract

The subject of this dissertation is dynamic simulation and optimization of solar thermal systems for heating domestic hot water (DHW) in the houses with net-zero energy consumption. The thesis deals with the optimization of design, implementation in practice and operation of the solar collectors in space and time, as elements of solar installations that are explored.

Scientific objective of the dissertation is to determine the impact of certain project elements of installation, operating modes with the installation, the energy needs of the house with a net-zero energy, as well as meteorological parameters on the optimal position of the solar collectors in space and time, as well as the establishment of an appropriate interdependency of all these parameters.

The main advantages of the installation investigated in this doctoral dissertation, compared to the previous research, are that by optimizing the position of solar collectors in houses with net-zero solar energy we obtain the maximum value of the solar fraction. Solar energy systems have been improved, whereby we obtain the maximum value of energy and exergy, with maximum energy and exergy efficiency, minimum consumption of fossil energy, reduction of the use of energy resources, maximizing energy security, as well as minimum impact on the environment.

In order to determine the feasibility of the proposed concept modern methods of energy monitoring and energy diagnostics, investigations of the solar installation in a house with in net-zero-energy consumption have been implemented, by developing a mathematical model, methodologies, and an algorithm for dynamic simulation and optimization of the solar installation operation.

Based on the analysed research results it has been concluded that setting up a solar collector at an exactly optimal position in space and time is justified.

Keywords: Optimization, Solar system for heating of DHW, simulation, solar collector, solar fraction

Садржај

1. Увод	1
2. Енергетске нулте зграде	4
2.1 Зграде са нултом енергетском потрошњом	4
2.1.1 Дефиниција зграда са нето-нултом енергетском потрошњом	5
2.1.2 Правци даљих истраживања.....	6
3. Соларни систем за генерисање енергије код нултих зграда.....	8
3.1 Сунчево зрачење.....	8
3.2 Кратка историја коришћења Сунчеве енергије	11
3.3 Соларни системи	11
3.4 Соларни колектори.....	12
3.4.1 Принцип функционисања равног застакљеног воденог соларног колектора.....	12
4. Актуелно стање развоја позиционирања соларних колектора	15
5. Моделирање енергетских нултих кућа и инсталација соларних колектора	21
5.1 Симулациони софтвери	21
5.1.1 <i>EnergyPlus</i>	21
5.1.2 <i>Google SketchUp</i>	22
5.1.3 <i>OpenStudio</i>	23
5.2 Методологија оптимизације	23
5.2.1 Оптимизациони софтвер <i>GenOpt</i>	23
5.2.2 Оптимизациони алгоритам <i>Hooke Jeeves</i>	24
6. Математички модели	25
6.1 Математички модел Сунчевог зрачења.....	25
6.1.1 Одређивање положаја Сунца.....	25
6.1.2 Модел Сунчевог зрачења на хоризонталну површину соларног пријемника у <i>EnergyPlus</i> окружењу.....	28
6.1.2.1 <i>ASHRAE Clear Sky Solar Model</i>	29
6.1.2.2 <i>ASHRAE Revised Clear Sky Model</i>	29
6.1.2.3 <i>Zhang-Huang Solar Model</i>	31
6.1.3 Модел соларног зрачења на нагнуту површину соларног пријемника у <i>EnergyPlus</i> окружењу.....	31

6.2	Математички модел соларног система за грејање санитарне воде у <i>EnergyPlus</i> окружењу	35
6.2.1	Соларни пријемник	36
6.2.1.1	Геометрија површине соларног пријемника	36
6.2.1.2	Прорачун ефикасности соларног пријемника.....	38
6.2.1.3	Прорачун корекције упадног угла соларног зрачења	39
6.2.1.4	Прорачун излазне температуре радног флуида.....	40
6.2.2	Модел централног бојлера.....	40
6.2.2.1	Енергетски биланс.....	41
6.2.3	Вентил за мешање загрејане са хладном водом	43
6.2.4	Контрола соларног система за грејање санитарне воде.....	44
7.	Карактеристике соларног система за грејање СТВ	45
7.1	Карактеристике соларног колектора	45
7.2	Карактеристике бојлера и значајне температуре за контролу рада соларног система	46
7.3	Потрошња топле воде	47
7.4	Прорачун климатских карактеристика.....	47
8.	Поступак симулације и оптимизације соларног система за грејање СТВ.....	53
8.1	Енергетска анализа.....	53
8.2	Ексергетска анализа	56
9.	Резултати и анализа	59
9.1	Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i)$	60
9.1.1	Соларни систем за загревање СТВ са СК#1.....	60
9.1.2	Соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	63
9.1.3	Соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	65
9.1.4	Соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	67
9.1.5	Поређење различитих соларних пријемника са различитим нагибом пријемника.....	71
9.1.5.1	Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12	71
9.1.5.2	Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12.....	73
9.1.5.3	Максималне количине избегнуте ексергије за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2	74
9.2	Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i, \gamma_i)$	76
9.2.1	Соларни систем за загревање СТВ са СК#1.....	76

9.2.2	Соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	80
9.2.3	Соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	84
9.2.4	Соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	88
9.2.5	Поређење различитих соларних пријемника за случај оптимизације $f_i(\beta_i, Y_i)$	94
9.2.5.1	Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 оптимизацијом $f_i(\beta_i, Y_i)$	94
9.2.5.2	Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 оптимизацијом $f_i(\beta_i, Y_i)$	96
9.2.5.3	Максималне количине избегнуте ексергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2	97
9.3	Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$	98
9.3.1	Соларни систем за загревање СТВ са СК#1.....	99
9.3.2	Соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	100
9.3.3	Соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	102
9.3.4	Соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	103
9.3.5	Поређење различитих соларних пријемника за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$	108
9.3.5.1	Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_h)$	108
9.3.5.2	Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_h = 37.5^\circ)$	109
9.3.5.3	Максималне количине избегнуте ексергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_h)$	110
9.4	Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, Y_i)$	111
9.5	Поређење соларних система.....	112
9.6	Мапе соларног зрачења и оптимални положаји $\beta_{i,opt}$ и $Y_{i,opt}$ за различите градове у Србији	117
10.	Закључак	121
	Литература	124

Списак коришћених ознака

a	$\max(0, \cos a)$
$a \cdot b$	директни масени експонент
$a \cdot d$	дифузни масени експонент
A	површина соларног пријемника
b	$\max(0.087, \cos Z)$
B	атмосферски коефицијент екстинкције
brd_{21}	број дана протеклих од пролећне равнодневице на северној хемисфери
CC	облачност
C_f	фактор фосилне енергије
C_{i-n}	коефицијенти
c_p	специфична топлота радног флуида
d	коефицијент
$DE_{x,i}$	дефицит избегнуте ексергије
Df_i	дефицит соларног удела
e_x	однос потребне и добијене ексергије
$e_{x,добијена}$	добијена ексергије на потрошачима
$e_{x,потреб}$	потребна ексергије на потрошачима
$E_{x,б}$	ексергија на излазу из акумулационог бојлера
$E_{x,бојлер}$	ексергија бојлера
$E_{x,маш.веш}$	ексергија машине за веш
$E_{x,маш.суд}$	ексергија машине за судове
$E_{x,пот}$	ексергија добијена од потрошача
$E_{x,C}$	ексергија Сунца
$E_{x,сол.кол}$	ексергија соларног колектора
$E_{x,судопера}$	ексергија судопера
$E_{x,туш}$	ексергија туша
$E_{x,хл.вода}$	ексергија хладне воде
f_i	соларни удео
$f_{i,max}$	максимални соларни удео
F_1	директни коефицијент осветљености
F_2	рефлективни коефицијент осветљености
F_{ij}	коефицијенти уграђени у датотеке <i>EnergyPlus-a</i>
F_R	пропустљивост првог слоја стакла
H	соларно зрачење
H_0	енергија екстратерестријалног зрачења која у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине
H_{dif}	енергија дифузног Сунчевог зрачења која у јединици времена пада на хоризонталну површину

H_{dir}	енергија директног Сунчевог зрачења која у јединици времена пада на хоризонталну површину
H_{ref}	рефлектована компонента Сунчевог зрачења
H_{solar}	укупно Сунчево зрачење које пада на нагнуту површину колектора
I_0	глобална соларна константа
k	кофицијент
m	оптичка ваздушна маса
\dot{m}	масени проток
\dot{m}_{use}	масени проток у соларној петљи
\dot{m}_{source}	масени проток од колектора до бојлера
n	редни број дана у години почевши од 1. јануара
q	користан топлотни добитак радног флуида
q_{heater}	топлота додата грејачем или колектором
q_{net}	нето пренешена количина топлоте на воду у резервоару
$q_{offcycloss}$	пренос топлоте ка/од спољашње средине када систем не ради
$q_{offcycpar}$	топлота додата паразитским оптерећењем када систем не ради
$q_{oncycloss}$	пренос топлоте ка/од спољашње средине током рада система
$q_{oncycpar}$	топлота додата паразитским оптерећењем током рада
q_{source}	пренос корисне топлоте ка/од соларног колектора
q_{use}	пренос корисне топлоте ка/од петље
R_{cond}	отпор преносу топлоте кондукцијом апсорбера кроз изолацију до спољашње околине
R_{conv}	отпор преносу топлоте конвекцијом од апсорбера до унутрашњег слоја стакла
R_{rad}	отпор преноса топлоте зрачењем од апсорбера до унутрашњег слоја стакла
t	часовни угао
t_0	светско (локално) време
$T_{уизлаз}$	температура на излазу из акумулационог бојлера
$T_{уулаз}$	температура на улазу у акумулациони бојлер
T_{abs}	температура апсорбционе плоче-апсорбера
T_{air}	температура спољашњег ваздуха
T_{amb}	амбијентална температура
T_{g2}	температура унутрашњег слоја стакла
T_{in}	температура унутрашњег радног флуида
T_n	температура сувог термометра
T_{n-3}	температура сувог термометра у истраживаним сатима до $n-3$
T_{source}	излазна температура флуида из бојлера
T_{use}	улазна температура флуида у бојлер
TZ	временска зона географске локације пријемника
UA_{offcyc}	кофицијент губитака када систем не ради
UA_{oncyc}	кофицијент губитака када систем ради
U_L	укупни топлотни губитак зрачењем, конвекцијом и кондукцијом
V_w	брзина ветра

Z	зенитни угао Сунца
СК#1	стационарни соларни пријемник
СК#2	соларни пријемник који годишње промени 2 положаја
СК#4	соларни пријемник који годишње промени 4 положаја
СК#12	соларни пријемник који годишње промени 12 положаја
СТВ	систем за загревање санитарне воде
α	соларна алтитуда
α_a	коэффицијент апсорпције апсорбционе плоче
β	угао нагиба пријемне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи
$\beta_{a,opt}$	годишњи оптимални угао нагиба
$\beta_{h,opt}$	шестомесечни оптимални угао нагиба
$\beta_{i,opt}$	оптимални нагиб
$\beta_{q,opt}$	тримесечни оптимални угао нагиба
$\beta_{m,opt}$	месечни оптимални угао нагиба
δ	деклинација
Υ	азимут
$\Upsilon_{a,opt}$	годишњи оптимални угао азимута
$\Upsilon_{h,opt}$	шестомесечни оптимални угао азимута
$\Upsilon_{i,opt}$	оптимални угао азимута
$\Upsilon_{q,opt}$	тримесечни оптимални угао азимута
$\Upsilon_{m,opt}$	месечни оптимални угао азимута
Δ	коэффицијент осветљености неба
ε	коэффицијент прозирности неба
ε_{source}	ефективност размене топлоте током преноса од колектора
ε_{use}	ефективност размене топлоте током преноса у соларној петљи
η	термичка ефикасност колектора
η_x	ексергетски степен ефикасности
$\eta_{сол.кол}$	ексергетска ефикасност соларног пријемника
κ	1.041 за Z
λ	географска дужина места где је пријемник лоциран
ζ_b	директна оптичка константа
ζ_d	дифузна оптичка константа
ρ	релативна влажност
$\tau \cdot \alpha$	оптичка ефикасност соларног колектора
τ_{g1}	пропустљивост првог слоја стакла
τ_{g2}	пропустљивост другог слоја стакла

Списак слика

Слика 3.1 -	Екстратерестријални Сунчев спектар.....	9
Слика 3.2 -	Терестријални Сунчев спектар.....	9
Слика 3.3 -	Мапа екстратерестријалног Сунчевог зрачења	10
Слика 3.4 -	Мапа терестријалног Сунчевог зрачења	11
Слика 3.5 -	Равни водени соларни колектор.....	13
Слика 5.1 -	Организациона структура програма <i>EnergyPlus</i>	22
Слика 5.2 -	3D модел стамбеног објекта у <i>Google SketchUp</i> -у.....	22
Слика 5.3 -	Граф оптимизације <i>GenOpt</i> софтвером	23
Слика 6.1 -	Екваторски координатни систем.....	26
Слика 6.2 -	Хоризонтски (азимутски) координатни систем.....	27
Слика 6.3 -	Сферни троугао.....	28
Слика 6.4 -	Енергија Сунчевог зрачења у зависности од упадног угла Сунчевог зрачења и оптичке ваздушне масе: 1) AM_0 ; 2) $\theta_z = 0$, AM_1 и 3) $\theta_z = 60^\circ$, AM_2 , где је θ_z угао између упадних Сунчевих зрака и нормале на површину Земље.....	30
Слика 6.5 -	Укупно соларно зрачење које пада на нагнуту површину соларног пријемника	32
Слика 6.6 -	Шема соларног система за грејање санитарне воде	36
Слика 6.7 -	Орјентација соларни пријемник-Сунце.....	37
Слика 6.8 -	Модел куће са соларним пријемником на крову. Површина соларног пријемника 12341 поклапа се са површином крова зграде	38
Слика 6.9 -	Шема повезивања бојлера и проточног бојлера	41
Слика 6.10 -	Шема модела са вентилом за мешање загрејане са хладном водом	44
Слика 7.1 -	Распореди коришћења соларног система за грејање санитарне топле воде (а) за употребу на славини и тушу; (б) за употребу на машини за судове и веш	47
Слика 7.2 -	Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Београд, Србија.....	48

Слика 7.3 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Београд, Србија.....	49
Слика 7.4 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Крагујевац, Србија	49
Слика 7.5 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Крагујевац, Србија ...	50
Слика 7.6 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Ниш, Србија	50
Слика 7.7 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Ниш, Србија	51
Слика 7.8 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Нови Сад, Србија.....	51
Слика 7.9 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Нови Сад, Србија.....	52
Слика 8.1 - Историја f_i , β_i , γ_i и број понављања	55
Слика 8.2 - Ексергетско билансирање соларног система за грејање СТВ	57
Слика 9.1 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији	61
Слика 9.2 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#1	62
Слика 9.3 - Дефицит соларног удела наспрам одступања угла нагиба са оптималним нагибом	62
Слика 9.4 - Дефицит избегнуте ексергије наспрам одступања угла нагиба са оптималним нагибом	63
Слика 9.5 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	64
Слика 9.6 - Дефицит соларног удела у функцији одступања угла нагиба при оптималном нагибу за СК#2	64
Слика 9.7 - $\beta_{q,opt}$ соларног пријемника и $f_{q,max}$ за свако тромесечје у току године, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	65
Слика 9.8 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	66

Слика 9.9 - Месечни β_{opt} соларног пријемника и месечна f_{max} за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	67
Слика 9.10 - Потребна топлотна енергија за грејање санитарне топле воде и максимални износ генерисане топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	68
Слика 9.11 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	69
Слика 9.12 - Месечни дефицит соларног удела, за одступања угла нагиба $ \beta - \beta_{opt} = 42^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	70
Слика 9.13 - Максималне количине избегнуте фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК	72
Слика 9.14 - Максималне количине избегнуте електричне енергије на годишњем нивоу за различите СК	72
Слика 9.15 - Разлике максималних количина избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК у односу на СК#1	73
Слика 9.16 - Максимална годишња избегнута емисија CO_2 услед максимално избегнуте електричне енергије у функцији броја оптималних нагиба соларног пријемника за соларни систем за загревање СТВ у току године.	74
Слика 9.17 - Потребна и добијена ексергија у функцији броја оптималних нагиба за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2	75
Слика 9.18 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#1.....	77
Слика 9.19 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији	78
Слика 9.20 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#1	78
Слика 9.21 - Разлике соларних удела, оптимизовањем угла нагиба и оптимизовањем угла нагиба и азимута истовремено, за соларни систем за загревање СТВ са СК#1.....	79
Слика 9.22 - Дефицит соларног удела наспрам одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника	79
Слика 9.23 - Дефицит избегнуте ексергије наспрам одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника	80
Слика 9.24 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#2, за неколико градова у Србији	81

Слика 9.25 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду	82
Слика 9.26 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду	82
Слика 9.27 - Дефицит соларног удела у функцији одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника	83
Слика 9.28 - Разлика соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду.....	84
Слика 9.29 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду	85
Слика 9.30 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду	85
Слика 9.31 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#4, за неколико градова у Србији	87
Слика 9.32 - Разлика соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4	87
Слика 9.33 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	88
Слика 9.34 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	89
Слика 9.35 - Оптималне вредности соларног удела, $f_{m,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12, за неколико градова у Србији	90
Слика 9.36 - Потребна топлотна енергија за грејање санитарне толе воде и максимални износ генерисане топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	91
Слика 9.37 - Максимални износ генерисане топлотне енергије и губитак при генерисању топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12, добијених оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$	92
Слика 9.38 - Оптималне вредности $f_{m,opt}$ оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	92
Слика 9.39 - Разлике соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	93
Слика 9.40 - Максималне количине избегнуте фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК	94

Слика 9.41 - Максималне количине избегнуте електричне енергије на годишњем нивоу за различите СК	95
Слика 9.42 - Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК	95
Слика 9.43 - Максимална годишња избегнута емисија CO_2 , у функцији броја оптималних положаја соларног пријемника, за соларни систем за загревање СТВ у току године.....	96
Слика 9.44 - Потребна и добијена ексергија добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i, Y_i)$ за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2.....	97
Слика 9.45 - Дефицит соларног удела наспрам одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника	99
Слика 9.46 - Дефицит избегнуте ексергије наспрам одступања углова азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$	100
Слика 9.47 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	101
Слика 9.48 - Дефицит соларног удела у функцији одступања угла азимута добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$	101
Слика 9.49 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	102
Слика 9.50 - Потребна топлотна енергија за грејање СТВ и максимални износ генерисане топлотне енергије, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	104
Слика 9.51 - Максимални износ генерисане топлотне енергије и разлике при генерисању топлотне енергије добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ или $f_i(\beta_i, Y_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	104
Слика 9.52 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	105
Слика 9.53 - Месечни дефицит соларног удела, за одступања угла азимута $ Y - Y_{opt} = 22.5^\circ$, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12	106
Слика 9.54 - Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$	108
Слика 9.55 - Максимална годишња избегнута емисија CO_2 услед максимално избегнуте електричне енергије у функцији броја оптималних положаја соларног	

пријемника, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ у току године	109
Слика 9.56 - Потребна и добијена ексергија добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2	110
Слика 9.57 - Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#2.....	113
Слика 9.58 Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	114
Слика 9.59 - Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	115
Слика 9.60 - Вредности ексергија, добијених оптимизацијом f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2	117
Слика 9.61 - Просечна годишња вредност енергије глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији.....	118
Слика 9.62 - Просечна дневна енергија глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији у јануару (лево) и јулу (десно)	119

Списак табела

Табела 7.1 - Вредности температура за контролу рада соларног система за грејање СТВ	46
Табела 7.2 - Надморска висина, географска ширина, географска дужина и извор метеоролошких података у неколико градова у Србији.....	48
Табела 9.1 - $\beta_{a,opt}$ и $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији	61
Табела 9.2 - Соларни удео $f_{h,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 који узима два $\beta_{h,opt}$ у току године	65
Табела 9.3 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла нагиба $ \beta - \beta_{opt} = 42^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4.....	67
Табела 9.4 - Једначине соларног удела у зависности од угла нагиба за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4.....	70
Табела 9.5 - Једначине соларног удела у зависности од угла нагиба за соларне системе за загревање СТВ са СК#12, дате за сваки месец	71
Табела 9.6 - β_{opt} и Y_{opt} за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао f_{max} за соларни систем за загревање СТВ за СК#1 и СК#2	77
Табела 9.7 - $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{q,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#4	86
Табела 9.8 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла нагиба $ \beta - \beta_{opt} = 22.5^\circ$ и азимута $ Y - Y_{opt} = 22.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4	88
Табела 9.9 - $\beta_{m,opt}$ и $Y_{m,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{m,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#12	90
Табела 9.10 - Процентуални губитак у вредности f_i различитих оптимизација за соларни систем за загревање СТВ за СК#12 у Београду	93
Табела 9.11 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла азимута $ Y - Y_{opt} = 42^\circ$ ако је $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4, за Београд у Србији.....	103

Табела 9.12 - Једначине соларног удела у функцији угла азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4.....	107
Табела 9.13 - Једначине соларног удела у функцији угла азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h=\beta_{a,opt}, Y_h)$, тј. када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларне системе за загревање СТВ са СК#12. Једначине су дате за сваки месец	107
Табела 9.14 - Оптималне вредности соларних удела оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, Y_i)$, (3) $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}= 37.5^\circ, Y_i)$, (4) $f_i(\beta_h= \beta_{q,opt}, Y_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.....	116
Табела 9.15 - Оптималне вредности углова азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, Y_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1 и СК#2.....	119
Табела 9.16 - Оптималне вредности углова азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, Y_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#4	120
Табела 9.17 - Оптималне вредности углова азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, Y_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#12, за период I-VI.....	120
Табела 9.18 - Оптималне вредности углова азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, Y_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#12, за период VI- XII.....	120

1. Увод

Почетком двадесет првог века велики напори се улажу да се ублажи глобално загревање земље проузроковано емисијом угљен диоксида (CO_2) у атмосферу. Да би се задовољиле све веће потребе човечанства за енергијом, интензивно се сагоревају фосилна горива, услед чега настаје емисија гасова у атмосферу. Емисије гасова се могу умањити ако се део енергетских потреба задовољи коришћењем извора енергије који не загађују околину, као на пример коришћењем соларне енергије уместо фосилних горива. Такође, још једна важна предност употребе соларне енергије је та што она не загађује околину азотним оксидима (NO_x) и сумпор диоксидом (SO_2).

У домаћинствима у Србији, највећи део санитарне воде користи се за купање, кухињску воду и воду за прање веша и судова. Обично се за загревање санитарне воде користи електрична енергија. Како се око 70 % електричне енергије производи употребом угља који ослобађа велики број гасова, који проузрокују ефекат стаклене баште, веома је важно и од велике користи да се уместо електричне енергије користи соларна енергија за загревање санитарне воде. Сходно томе, у Србији и широм света, најкориснија употреба соларне енергије је када се она користи за загревање санитарне воде у домаћинствима [1]. Соларни систем за грејање санитарне воде је најпопуларнији вид искоришћења соларне енергије, због техничке изводљивости и економичности, у поређењу са другим видовима искоришћења соларне енергије. Поред тога, важно је да постоји висок ниво ефикасности приликом претварања соларне енергије у топлоту. Тада се може очекивати највећа количина избегнуте употребе примарне енергије, избегнуте употребе електричне енергије, избегнуте ексергије, и смањење емисија CO_2 .

Рад соларних система за грејање санитарне топле воде (СТВ) не зависи само од соларне енергије коју соларни пријемник апсорбује, већ и од фактора као што су топлотна енергија која се изгуби услед провођења, конвекције и инфрацрвеног зрачења, размака између цеви унутар соларног пријемника, геометрије пријемника и особина материјала. Међутим, један од критеријума да се побољша ефикасност соларних пријемника је да се повећа количина апсорбованог зрачења [2, 3]. Овај критеријум истиче важност правилног позиционирања соларног пријемника. Да би инсталација соларног система била исплатива, соларни пријемник мора бити правилно позициониран, тако да прими максималну количину Сунчевог зрачења. Испитивања спроведена у многим земљама света су показала да, у већини случајева, соларни пријемници нису правилно инсталирани. Инсталације за коришћење соларне енергије се још увек пројектују на бази искустава, а не на основу ригорозних прорачуна. Савременим методама истражен је утицај угла нагиба и угла азимута пријемника на годишњу количину прикупљене енергије, чиме је показано да просечни губитак енергије износи (10-35) % [4].

Основна хипотеза од које се пошло у овој докторској дисертацији је да тачно одређен положај (оптимални положај) соларних пријемника у простору и времену одговара производњи максималне количине топлотне енергије из соларне енергије. Такође, оптимални параметри инсталације зависе од количине употребљене енергије и начина њене употребе. Оптимални параметри инсталације су функција географске ширине и дужине локације где се налази кућа са нето-нултом потрошњом енергије. Осим тога, веома важну улогу игра и надморска висина и топографија земљишта где се налази инсталација чије се енергетско понашање истражује. Метеоролошки параметри значајно утичу на оптимуме до којих се може доћи истраживањем. Утицај свих ових параметара ефикасно се истражује динамичком симулацијом коришћења куће нето-нулте енергетске потрошње и њене инсталације за производњу енергије. Коришћење адекватних оптимизационих метода омогућава њихову оптималну употребу, инсталацију и пројектовање. С тим у вези циљ докторске дисертације је остварен развијањем математичког модела, методологије и алгоритама за динамичку симулацију и оптимизацију рада соларне инсталације.

У базном делу докторске дисертације моделирана је кућа уз поштовање процедура енергетског и ексергетског моделирања, при чему је реалан енергетски систем преведен у енергетски модел. Моделирана је инсталација система соларних колектора, систем за потрошњу енергије унутар куће, систем за грејање санитарне топле воде (СТВ), као и систем који ставља у рад кућне уређаје. Развијени математички модели успостављају релације између параметара зграде, параметара потрошње енергије и параметара постојеће соларне инсталације. Комплетан модел зграде заједно са инсталираним соларним системом моделује се у софтверу *EnergyPlus*. Веома је важно правилно пројектовати соларне енергетске системе. Правилно пројектовање омогућава производњу максималне количине енергије и ексергије са максималном енергетском и ексергетском ефикасношћу, минималним утрошком фосилне енергије, минималним утицајем на животну средину и са циљем смањења коришћења енергетских ресурса.

Предмет рада на докторској дисертацији је оптимизација пројектовања, реализације у пракси и рада соларних пријемника у простору и времену као елемената соларне инсталације у циљу добијања највеће количине соларне енергије. Генерисањем највеће могуће количине енергије и ексергије максимално се избегава потрошња електричне енергије, коришћење фосилне енергије и емисија гасова у атмосферу.

Следећи корак у циљу решавања истраживачког задатка блиско је повезан са развојем и унапређењем оптимизационих метода и алгоритама. Методи генеричке оптимизације су се појавили као значајна класа метода пружајући инжењерима могућност оптимизације појединачних елемената енергетских инсталација према потреби. Са друге стране то је све довело до развоја нових метода оптимизације у оквиру већ постојећих генеричких метода. Унапређени алгоритми су омогућили одређивање положаја соларног пријемника у простору (азимута и нагиба) као и оптималног времена почетка и краја коришћења одређеног просторног положаја. Овакви поступци, за разлику од класичних поступка, захтевали су употребу компјутера, али са друге стране су омогућили увећано генерисање енергије, ексергије, избегавање потрошње фосилне енергије, као и мањи утицај на околину.

У овој докторској дисертацији посебно место заузима енергетска оптимизација рада соларних инсталација, и то бирање положаја пријемника соларне енергије приликом

њихове експлоатације са циљем максимизирања соларног удела. Истраживање укључује четири различита соларна система за загревање санитарне воде (СТВ) у неколико градова Србије. Анализирани соларни системи су СК#1 (са стационарним соларним пријемником), СК#2 (са соларним пријемником који годишње промени 2 положаја), СК#4 (са соларним пријемником који годишње промени 4 положаја), и СК#12 (са соларним пријемником који годишње промени 12 положаја). Соларни пријемници ових система су постављени на крововима кућа у правцу север-југ. За различите соларне системе, истраживање је показало оптималне положаје њихових соларних пријемника на годишњем, полугодишњем, тромесечном и месечном нивоу. Такође, испитивани су соларни системи за загревање СТВ за случај оптимизације соларног удела (f_h) у функцији угла нагиба (β_h) соларног пријемника. Затим, испитиван је случај оптимизације f_h у функцији β_h и угла азимута (γ_h) соларног пријемника, као и случај оптимизације f_h у функцији β_h и γ_h соларног пријемника када је $\beta_h = \beta_{a,opt}$ за СК#1, као и случај f_h у функцији β_h и γ_h соларног пријемника када је $\beta_h = \beta_{q,opt}$. Наведене оптимизације имају за циљ да дају најоптималнија решења у пракси.

Након енергетске оптимизације, рађена је и ексергетска оптимизација рада соларних инсталација на годишњем нивоу, и то бирање положаја пријемника соларне енергије, приликом њихове експлоатације са циљем максимизирања ексергетског степена ефикасности инсталираног соларног система.

Енергетске студије су драгоцене за фундаментално разумевање феномена токова енергије чиме се обезбеђује мост између науке и инжењеринга соларних инсталација. Успешна истраживања овог типа подразумевају свеукупност савремених средстава и метода енергомониторинга и енергодијагностике.

Свеобухватном анализом положаја пријемника соларне енергије са једне стране и енергетских потреба куће са друге стране унапређено је пројектовање соларних енергетских система. Побољшање енергетских карактеристика соларних система који се користе специјално на кућама нето-нулте енергетске потрошње је један од могућих путева за ублажавање енергетске кризе.

2. Енергетске нулте зграде

Свет се данас суочава са низом озбиљних енергетских и еколошких изазова. Глобална енергија и планови за заштиту животне средине су блиско испреплетени. Проблеми са снабдевањем и коришћењем енергије су повезани са ширим питањима животне средине, укључујући и глобално загревање. Сматра се да је глобално загревање повезано са ефектом стаклене баште, односно гасовима који се првенствено ослобађају потрошњом фосилних горива. Статистике показују да су у последње три деценије енергетске потребе у свету порасле за 89.5 %, а емисија CO_2 за 79 % [5]. Од када је основана Светска комисија за животну средину и развој 1987. године, питање климатских промена је на дневном реду у свету као кључни елемент одрживог развоја. Након тога, у Агенди 21 (21 означава 21. век) на конференцији Уједињених нација о животној средини и одрживом развоју (Светски самит), у Рио де Жанеиру 1992. године, посебна пажња је посвећена односу развоја и заштите животне средине. На Конференцији Уједињених нација о климатским променама, одржаној у Канкуну, последњи пут се говорило 2010. године. Зграде су одговорне за 40 % укупне потрошње примарне енергије у већини земаља. У САД, на пример, пословне и стамбене зграде троше око 40 % примарне енергије [6]. Слично томе, зграде су одговорне за скоро 47 % националне потрошње енергије у Великој Британији [7]. Енергија коју користе зграде наставља да расте, пре свега зато што нове зграде ничу пре него што старе "одлазе у пензију". Пословне и стамбене зграде чине 15.3 % глобалне емисије гасова, од чега 9.9 % емитују пословне зграде, а 5.4 % стамбене [8]. Емисије гасова су директне, попут емисије гасова из сагоревања горива, или индиректне, попут емисије гасова повезане са утрошеном електричном енергијом.

2.1 Зграде са нултом енергетском потрошњом

У свету расте свест о томе да је потрошња енергије у зградама све већа. Као последица веће потрошње енергије јавља се и увећана емисија гасова. Емисија гасова мора бити смањена како би се унапредио одрживи развој. Велики акценат се ставља на развој енергетски ефикасних зграда. Концепт зграда са нултом енергетском потрошњом (ЗНЕП) је све више прихваћен, посебно у развијеним земљама. Концепт зграда нето-нулте енергетске потрошње представља еволуцију енергетски ефикасних зграда и подразумева нулти енергетски биланс на годишњем нивоу [9].

Daniel M. Kammen, директор лабораторије за обновљиву енергију на Универзитету *Berkeley* у Калифорнији, је написао да човечанство до 2020. године треба да буде на путу ка ниској емисији CO_2 , у друштву у ком доминирају ефикасне и чисте енергетске технологије. Циљеви који су усмерени на енергетску ефикасност зграда постижу се подстицањем

иновација у области обновљивих извора енергије, развијањем чистих енергетских технологија и развојем зграда нулте енергетске потрошње. Ови подстицаји помажу да се смањи потражња за фосилним горивима. Истраживања у области соларне енергије, у смислу да се сачува и дистрибуира соларна енергија, као један од најчистијих облика обновљивих извора енергије, може решити потребе за истом, како у богатим тако и у сиромашним заједницама. Оваква решења подразумевају да ће до 2020. године свет бити на путу ка енергетском систему у ком ће Сунце, ветар, нуклеарна, геотермална и хидро енергија давати више од 80 % електричне енергије [10].

Успостављено је неколико циљева на светском нивоу. Прво, ЕУ Директива о карактеристикама зграда наводи да ће све зграде изграђене након 31. децембра 2018. године морати да производе енергију за сопствене потребе на локацији на којој се налазе и тако постигну баланс између енергије коју зграда троши и енергије која се може преко инсталираних система (који генеришу енергију из обновљивих извора) у тој згради произвести [11]. Друго, од почетка 2020. године у САД ће све нове федералне зграде бити пројектоване тако да користе нето-нулту енергију и на такав начин бити зграде са нето-нултом енергетском потрошњом до 2030. године [12]. Треће, да би се остварио напредак у развоју и адаптацији зграда високих перформанси, у САД постоји Иницијатива за пословне зграде са нултом енергетском потрошњом. Ова иницијатива има за циљ да се кроз јавно и приватно партнерство до 2025. године оствари идеја о зградама са нултом потрошњом енергије, које се могу продавати на тржишту [13]. На крају, Влада Велике Британије започела је са унапређењем услова који се тичу енергије у Прописима о зградама како би се обезбедило да све нове куће морају да буду "са нула угљеника" до 2016. године [14].

2.1.1 Дефиниција зграда са нето-нултом енергетском потрошњом

Најчешћа дефиниција нултих енергетских зграда (ЗЕБ) је да користе електричну дистрибутивну мрежу и као извор и као понор чиме се избегава систем за складиштење електричне енергије, док термин "нето" се користи код зграда повезаних на електро дистрибутивну мрежу за дефинисање енергетске равнотеже између електричне енергије која се купује из мреже и која се као вишак продаје мрежи.

Једну од дефиниција ЗНЕП даје *Trocellini* [15] и односи се на то да стамбена или пословна зграда је зграда високе енергетске ефикасности ако постоји равнотежа између укупних енергетских потреба зграде са једне стране и обновљивих технологија са друге стране. Такође, *Trocellini* даје још неколико дефиниција широко прихваћених у литератури: "нето-нулта генерисана енергија", "нето-нулта примарна енергија", "нето-нулта емисија гасова" и "нето-нулта цена енергије". Зграда "нето-нулте генерисане енергије" односи се на зграду која сопственим системима обновљиве енергије производи исту количину енергије као што је њена годишња потрошња. Код зграда "нето-нулте примарне енергије" количина енергије која се троши и која се као вишак продаје електро-мрежи множи се са коефицијентом конверзије финалне енергије у примарну енергију. У развијенијим земљама је тај коефицијент конверзије далеко нижи него код нас. Зграде "нето-нулте емисије" су оне које производе исто толико обновљиве енергије без емисије гасова колико користе од извора енергије који производи емисију гасова. "Нето-нулта цена енергије" представља новчани износ који дистрибутер плаћа власнику зграде за енергију коју зграда извози на

мрежу, при чему је тај износ једнак износу који власник плаћа дистрибутеру за енергетске услуге и енергију која се потроши током године.

Термин "зграда са нето-нултом енергетском потрошњом" користи се за зграду која има нето-нулту потрошњу енергије и нулту емисију CO_2 . Ове зграде имају уграђене напредне системе за уштеду енергије и користе технологије обновљиве енергије како би се смањила потрошња примарне енергије и како би се генерисала енергија без емисије гасова.

Последњих година енергетском евалуацијом ових зграда разматра се укупна потрошња електричне енергије или фосилних горива, укључујући и сопствене или уграђене енергије (*embodied energy*). То је енергија која се користи у процесу транспорта током сваког корака животног циклуса, одлагања отпада, током производног процеса, инсталације и одржавања [16].

2.1.2 Правци даљих истраживања

У даљим истраживањима потребно је посветити више пажње остварењу концепта зграда са нето-нултом енергетском потрошњом. У том смислу, пре свега, је потребно усмерити пажњу на анализу трошкова животног циклуса и утицаја на животну средину. Такође, приликом разматрања концепта зграда са нето-нултом енергетском потрошњом, потребно је обратити пажњу на климатске промене и социјалну политику.

Када је у питању анализа трошкова животног циклуса и еколошки утицаји, концепт ЗНЕП поставља питање "у којој мери и колико дубоко треба применити мере енергетске ефикасности пре него што технологије за обновљиву енергију не одговоре на енергетске захтеве" [17]. Еколошке утицаје је потребно и даље истраживати, тј. утицаје које различите конвенционалне и обновљиве енергетске технологије имају на емисију CO_2 .

Такође, постоји општа сагласност око тога да се клима мења и да ће температура постепено расти. Најновије анализе утицаја климатских промена на енергетски сектор генерално [21] и посебно коришћења енергије у изграђеном окружењу [18] су истакле осетљивост енергетских система и зграда на климатске промене. За ЗНЕП је утврђено да, иако су годишње варијације у укупној потрошњи енергије зграде релативно мале, питање вишка енергије и складиштења, у вези са циљем постизања нулте енергетске потрошње, је значајано. Потребно је користити вишегодишње симулације, узимајући у обзир климатске промене за пројектовање и анализу климатски осетљивих ЗНЕП, као и користити једночасовне симулације енергије зграда за "типичну метеоролошку годину". С обзиром да ово доводи у питање климатске моделе, неки аутори су истраживали по неколико модела за различите климатске зоне [22, 23, 24]. Потребно је више радити на избору одговарајућих климатских модела за симулацију енергетске потрошње зграда. Осим тога, у последњих неколико година у литератури се доста писало о даљинском грејању, али веома мало о даљинском хлађењу. Глобално загревање ће довести до мањих захтева у погледу грејања нарочито у хладнијим климатским срединама и обрнуто, у топлијим крајевима биће повећани захтеви за хлађење. Стога, више напора треба да буде усмерено ка бољем разумевању економичности даљинског хлађења и његовим ефектима на заштиту животне средине, посебно у контексту урбаног планирања. Поред тога, хлађење на соларни погон, иако још није широко прихваћено, има добар потенцијал за уштеду енергије, посебно у топлим климатским условима [25, 26, 27].

Енергија је кључна компонента у свим општим стратегијама за одрживи развој и важно је пратити ефекте енергетске политике у друштвеним, економским и еколошким димензијама. Главни покретачи кључних показатеља енергетске потражње развијених у већини студија које се баве предвиђањем коришћења енергије и емисије су социо-економски параметри [28, 29]. Постоје тврдње да се општој јавности мора подстицати и одржати позитиван став према енергији и одрживости. "Економска и еколошка визија" треба да буде праћена подједнако важном "друштвеном визијом" [20, 30, 31]. На пример, недавна студија случаја ФН система повезаног на мрежу у суптропском Хонг Конгу показала је да са економског аспекта ФН није одржива због дугог периода повраћаја инвестиције, од преко 70 година. Међутим, ако се узме у обзир уграђена енергија, период повраћаја је у великој мери смањен на мање од 10 година [19]. Позитиван друштвени однос према животној средини и одрживом развоју могао би да превагне одлуку у корист обновљиве енергије. Осим тога, такође је утврђено да људи са позитивним ставом према животној средини имају тенденцију да боље прихватају своје изграђено окружење унутар зелених зграда [32]. У транзицији ка одрживом друштву, неопходно је снажно и дубоко поштовање према свету око нас и стога, потребно је више рада у друштвено-економској и области животне средине.

3. Соларни систем за генерисање енергије код нултих зграда

У истраживањима у овој докторској дисертацији, код моделиране зграде, од обновљивих извора енергије коришћена је само соларна енергија као један од најзначајнијих обновљивих извора, чија се продукција енергије постиже истом брзином којом се и троши. На крову зграде је инсталиран систем соларних колектора за генерисање топлотне енергије. У овом поглављу, у том смислу, дат је кратак осврт на порекло Сунчеве енергије, као и историјат коришћења соларне енергије и основне поделе и карактеристике соларних пријемника, као и поделе и карактеристике соларних система за генерисање енергије.

3.1 Сунчево зрачење

Сунце је ужарена лопта, масе од $1.99 \cdot 10^{30}$ kg, средње густине од 1410 kg/m^3 и пречника $1\,391\,980 \text{ km}$ (фотосфера), која у спољашњем слоју садржи око 75 % водоника, који се у унутрашњости, под високим притиском и температуром која достиже десетине милиона Келвина (процена је $13\,600\,000 \text{ K}$), у току процеса термонуклеарне фузије претвара у хелијум. Сунце је од Земље удаљено $1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ и њена је најближа звезда. Захваљујући Сунчевој гравитацији наша планета по елиптичној путањи кружи око њега. Наша звезда се око своје осе окрене за 25 дана (екватор), односно за 33 дана на половима, што указује на њено флуидно стање (заправо стање плазме).

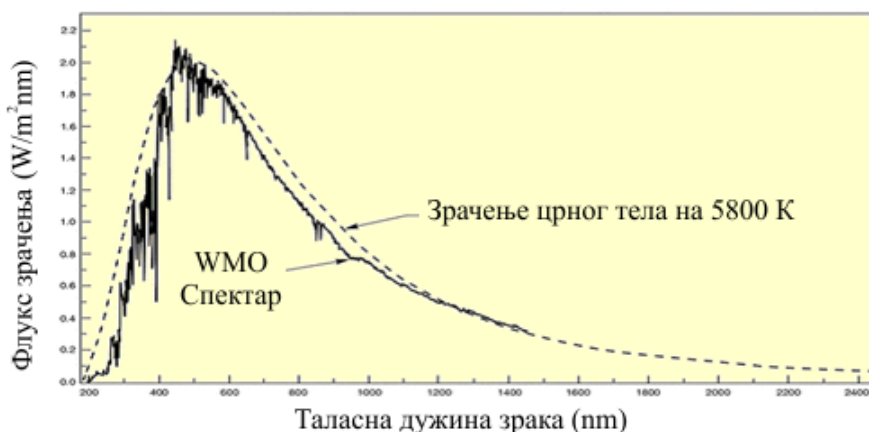
Порекло Сунчеве енергије открио је и објаснио *Hans Albrecht Bethe* (1906 - 2005. година) 1938. године. Он је показао да се на Сунцу енергија ствара у термонуклеарном процесу фузије водоника у хелијум. Термонуклеарне реакције одвијају се у језгру Сунца. То је зона у којој се у фузионим реакцијама лакших језгара добијају тежа атомска језгра. Том приликом нуклеони прелазе из стања са мањом, у стања са већом енергијом везе, што је праћено емисијом дела енергије везе. Основне фузионе реакције у језгру Сунца одвијају се тако да четири језгра водоника стварају језгро хелијума. Такве термонуклеарне реакције су егзотермне и у њима се на рачун дефекта масе ослобађа енергија коју Сунце емитује у околни простор. Ове реакције се одвијају у тзв. протон - протонском циклусу (*p-p* циклус) и то у више фаза. Осим *p-p* циклуса, водоник на Сунцу може фузионо да сагорева и уз учешће атома тежих елемената: угљеника, кисеоника, итд. Ова језгра се у реакцијама појављују као катализатори. Најважнији ланац таквих фузионих реакција одвија се уз учешће језгара изотопа угљеника ^{12}C . То је познати угљенично-азотни (*CN*) циклус. Код Сунца мање од 10 % ослобођене енергије остварено је *CN* циклусом, а преко 90 % *p-p* циклусом. У оба циклуса фузионих реакција ослобађа се приближно иста количина

енергије. Највећи део ове енергије настале у језгру Сунца отпада на електромагнетно зрачење непрекидног спектра, са максимумом у краткоталасној гама и рендгенској области таласних дужина.

Сунчева луминисценција (исијавање) износи $3.83 \cdot 10^{20}$ MW. Средња температура површине Сунца (далеко од "термонуклеарног реактора" у унутрашњости) износи 5800 K. Сунчево зрачење стиже до Земље, брзином светлости, након пређеног пута од 149 597 892 km (средње удаљење Земље од Сунца). Од укупне Сунчеве енергије, на горњу границу Земљине атмосфере стигне $174.3 \cdot 10^9$ MW, што представља њен $4.55 \cdot 10^{-10}$ део. Иако имамо само мали соларни удео, сматра се да је соларна енергија која пада на Земљу током 30 минута довољна да задовољи енергетске потребе за читаву годину.

Енергија створена у језгру Сунца доспева на Земљу у виду електромагнетних таласа. Сунчево зрачење на улазу у Земљину атмосферу познато је под називом екстратерестријално Сунчево зрачење. Ово зрачење назива се и соларном константом и износи 1367 W/m^2 . Од соларне константе до Земље у идеалној ситуацији стиже 1120 W/m^2 (директно и дифузно Сунчево зрачење).

На слици 3.1 [37] приказан је екстратерестријални Сунчев спектар. Сунчев спектар садржи зрачења таласних дужина мањих од 100 nm па све до 3 μm . Основна подела електромагнетног зрачења је на јонизујуће ($\lambda < 100 \text{ nm}$, γ и X зраци) и нејонизујуће зрачење ($\lambda > 100 \text{ nm}$). На срећу, разорно јонизујуће зрачење не продире кроз Земљину атмосферу.



Слика 3.1 - Екстратерестријални Сунчев спектар



Слика 3.2 - Терестријални Сунчев спектар

Под *терестријалним Сунчевим зрачењем*, слика 3.2 [37], подразумева се Сунчево зрачење које после проласка кроз Земљину атмосферу доспева на Земљу.

Максимум терестријалног зрачења припада таласним дужинама око $0.5 \mu\text{m}$. Преко 90 % укупно дозрачене енергије са Сунца на површини Земље припада таласним дужинама од $0.3 \mu\text{m}$ до $1.5 \mu\text{m}$.

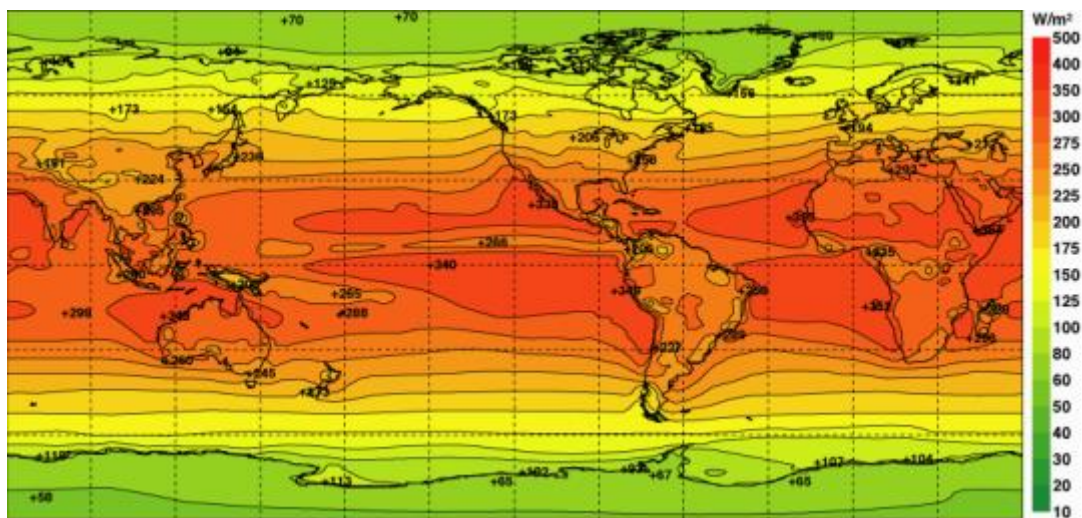
Јасно је да сву енергију коју прими са Сунца, Земља мора да врати назад у васиону, а само мали занемарљиви део, око 0.1 % Сунчевог зрачења остаје везан на Земљи процесом фотосинтезе, у виду хемијске енергије.

Расподела Сунчевог зрачења на Земљи може се дати и на следећи начин: од укупног годишњег Сунчевог терестријалног зрачења, које износи просечно 343 W/m^2 , 30 % отпада на Земљин алbedo, 25 % апсорбују гасови и аеросоли (облаци), а 45 % загрева површину Земље (водене и копнене површине) [33, 34].

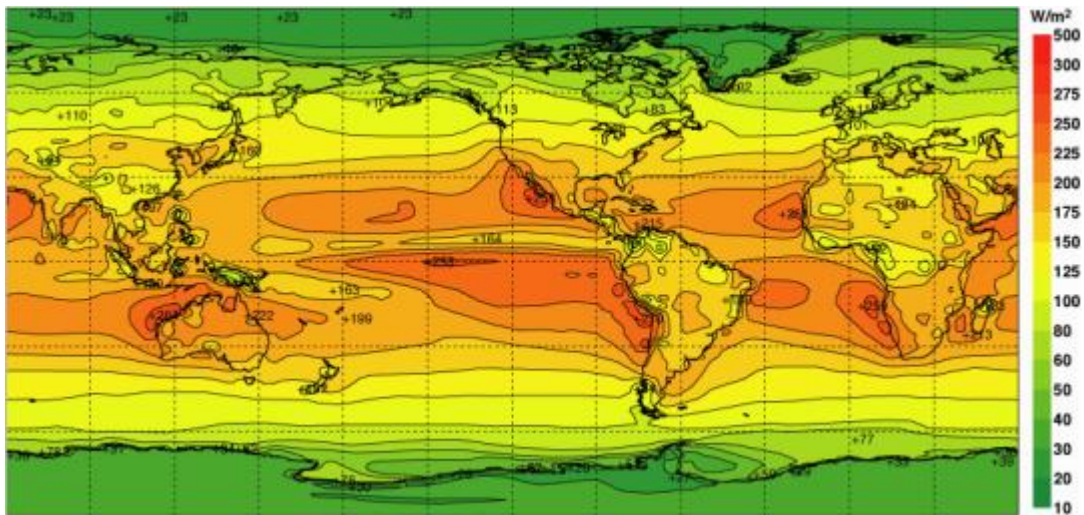
Упоредни приказ мапа екстратерестријалног и терестријалног Сунчевог зрачења дат је на сликама 3.3 и 3.4, респективно [35].

Због велике удаљености Земље и Сунца може се сматрати да се Сунчево зрачење пре уласка у атмосферу Земље састоји од снопа паралелних електромагнетних таласа. Сунчево зрачење се може апсорбовати, одбити (рефлектовати) или може мање или више несметано проћи кроз атмосферу (трансмитовати се). У складу са тим, на Земљину површину пада директно и дифузно Сунчево зрачење са неба и рефлектовано зрачење са Земље и околних предмета (поглавље 6.2).

Количина дозрачене Сунчеве енергије на неку површину на Земљи зависи од локације пријемне површине, позиције површине у простору у односу на хоризонталну раван, оријентације површине у односу на стране света, доба године, услова атмосфере, величине пријемне површине, карактеристика пријемне површине, времена озрачености, итд. У овој докторској дисертацији посебна пажња је посвећена позиционирању тих површина у циљу постизања што већег соларног удела. Самим тим, количина дозрачене Сунчеве енергије на неку површину на Земљи била би још ефикаснија.



Слика 3.3 - Мапа екстратерестријалног Сунчевог зрачења



Слика 3.4 - Мапа терестријалног Сунчевог зрачења

3.2 Кратка историја коришћења Сунчеве енергије

Постоје писани подаци још од давнина о *Архимеду* (287 - 212. година п. н. е.), који је познавајући оптику, употребио мноштво полираних штитова да направи конкавно огледало и да усмери концентрисани Сунчев зрак у римски брод. Такође је *Сократ* (470 - 399. година п.н.е.) у својим записима и учењима говорио о оријентацији кућа у циљу да оне буду хладније лети и топлије зими. Током 18. века, у Европи на Средњем Истоку, граде се соларне пећи од концентрисаних колектора. У истом веку *Lavoisier* (1743 - 1794. година), комбинацијом примарног и секундарног сочива, користећи Сунчеве зраке достиже високе температуре од 1750 °C. У 19. веку постојали су покушаји да се покрену парне турбине коришћењем система концентрисаног Сунчевог зрачења. Током 20. века долази до интензивније примене соларне енергије, користе се два принципа за концентрацију Сунчевог зрачења, са централним и дистрибутивним пријемницима. Средином 30-их година прошлог века, Сунчева енергија се користи за загревање нискотемпературске воде која се користи у домаћинствима (равни соларни колектори). Производња првих соларних грејача воде почела је 60-их година прошлог века и у сталном је успону [36].

3.3 Соларни системи

Могуће је на више начина извршити класификацију система за коришћење Сунчеве енергије. Потребно је, прво, разликовати соларне системе од пријемника Сунчеве енергије. Соларни системи представљају заокружене инсталације за дефинисани вид коришћења соларне енергије. Разликују се: пасивни и активни соларни системи.

Пасивни соларни системи, практично представљају саставни део неког већег склопа, који није приоритетно намењен искоришћењу соларне енергије. Класичан пример пасивног соларног система представља Тромбеов зид. Године 1960. промовисана је идеја грејања објекта коришћењем масивног застакљеног зида. Од првобитне конструкције Тромбеов зид је доживео низ модификација и побољшања.

Активни соларни системи имају превасходну улогу коришћења соларне енергије. Обавезан део ових система је соларни пријемник, који је уједно и трансформатор енергије

Сунчевог зрачења, а остали делови система зависе од његове намене. Честа примена ове врсте соларног система је за загревање санитарне топле воде у домаћинствима.

3.4 Соларни колектори

Соларни колектори су посебна врста размењивача топлоте који трансформишу енергију Сунчевог зрачења у унутрашњу енергију радног флуида. То је уређај који апсорбује долазеће Сунчево зрачење, претвара га у топлоту и преноси ту топлоту на флуид (обично је то ваздух, вода или уље) који тече кроз колектор. Овако трансформисана енергија може да се користи директно преко циркулационог флуида или да се ускладишти, па да се користи касније.

Подела пријемника соларне енергије може се, пре свега, извршити према начину трансформације исте, на: соларне колекторе, хибридне соларне колекторе и фотонапонске ћелије. Соларни колектори трансформишу Сунчеву енергију у топлотну енергију. По врсти радног флуида који користе деле се на: водене, ваздушне и оне који користе друге течне флуиде. Према основној конструкцији постоје: неконцентришући или стационарни и концентришући соларни колектори. Неконцентришући колектор има исти простор за пресретање и за упијање Сунчевог зрачења, док концентришући колектор има могућност да се покреће и прати Сунце. Концентришући колектор помоћу конкавне рефлектујуће површине пресреће и фокусира сноп сунчевих зрака на мању пријемну област, чиме се повећава флукс зрачења. Раван соларни колектор је тип који припада стационарним, неконцентришућим соларним колекторима.

Раван соларни колектор као део система за грејање санитарне топле воде је најчешће коришћен и може бити: незастакљени соларни колектори, застакљени соларни колектори, бојлерски соларни колектори и вакуумски соларни колектори [34].

У истраживањима у овој докторској дисертацији коришћен је модел равног застакљеног воденог соларног колектора, као део соларног система за грејање санитарне топле воде у кућама нето-нулте потрошње енергије.

3.4.1 Принцип функционисања равног застакљеног воденог соларног колектора

Равни колектори су најзаступљенији тип колектора. Углавном се користе за ниске радне температуре до 100 °C, док неке напредније и специјалне конструкције могу да постигну и веће вредности. Равни колектори који се данас користе су различитог дизајна, и праве се од различитих материјала.

Принцип функционисања равних соларних колектора је једноставан. Сунчево зрачење које пада на колектор, пролази својим највећим делом кроз стаклену плочу и апсорбује се, највећим делом, на површини апсорбера. Провођењем кроз апсорбер и конвекцијом у интегрисаним цевима (или каналима) вода преузима топлотну енергију на одговарајућем температурском нивоу. Што је радна температура виша, виши су и топлотни губици у околину, што се делимично умањује добром изолацијом која се налази у кутији колектора иза апсорберске плоче. Изолација не належе са доње стране на плочу апсорбера, већ постоји додатни изолациони ваздушни слој између њих. Природном или принудном

циркулацијом вода односи апсорбовану количину топлоте и одржава радну температуру колектора, наравно у условима стационарног зрачења [2, 34].

Овај тип колектора би се могао назвати класичним. На слици 3.5 приказани су његови делови: стаклена плоча, апсорбер, изолација и кутија колектора. Цевни систем је интегрисан са телом апсорбера на различите конструктивне начине.



Слика 3.5 - Равни водени соларни колектор

Класично стакло се најчешће користи као покривна плоча код равних соларних колектора, због високог коефицијента дијаметрије (висока транспарентност) за краткоталасно Сунчево зрачење. Оно може пропустити до 90 % соларног зрачења. Поред њега, у пракси се користе и пластични материјали за покривне површине соларних колектора. Такви материјали су јефтинији, нису крти и ломљиви, мање су густине од стакла, имају велику попустљивост дуготаласног зрачења и веома су непостојани при излагању високим температурама. Антирефлексно стакло може у одређеној мери повећати транспарентност стакла, а самим тим и генерисање топлотне енергије до 6.5 % [34]. Спољашњи утицаји (атмосферска прашина) могу умањити попустљивост стакла до 4 %.

Апсорберска плоча, је набрана или удубљена површ, на коју су спојене цеви или канали. Плоче такође могу бити и интегрисане са цевима. Плоча апсорбује велики део зрачења које пролази кроз стакло, док истовремено губи део топлоте која иде ка атмосфери и кроз задњи део кућишта. Колектор топлоту даље преноси на флуид (вода). Апсорберске плоче се деле на селективне (танак горњи слој који је високоупијајући за соларно зрачење и постављен на површину високе рефлексије и ниске могућности емитовања дуготаласног зрачења) и неселективне апсорбере (добро апсорбују Сунчево зрачење, међутим, интензивно зраче краткоталасно зрачење, што повећава топлотне губитке соларног колектора). Селективне површине су нарочито важне када је површинска температура колектора много виша од температуре амбијенталног ваздуха.

Апсорбциона моћ колектора зависи од боје премаза, као и од угла нагиба. Оптималним позиционирањем, које је у овој докторској дисертацији предмет рада, апсорбциону моћ је могуће знатно увећати. Обично се користи црна боја, али постоје и премази других боја који се користе углавном из естетских разлога. Апсорбционе плоче колектора се производе, одговарајућим електролитичким или хемијским процесима, са

високом моћи апсорбције соларног зрачења и ниском емитивношћу таласа дугих таласних дужина. Алтернатива је премаз од високо апсорбујућег материјала са огледалом које такође има висок пренос соларне енергије и високу инфрацрвену рефлексију.

Данас се комерцијални апсорбери производе анодном оксидацијом, испаравањем, распршивањем и применом селективних боја. Велики напредак последњих година се базира на примени вакуум технике за производњу апсорбера који се користе у нискотемпературним апликацијама. Њих карактеришу ниске цене и предност да мање еколошки загађују околину од конвенционалних процеса. Канали кроз које протиче флуид који преноси топлоту унутар колектора, морају бити интегрисани са плочом или чврсто везани за њу. Велики проблем је постизање добре термо-везе између цеви и плоче апсорбера, без стварања превеликих трошкова радне снаге или материјала. Најчешће коришћени материјали за колектор плоче су бакар, алуминијум и нерђајући челик. Пластика отпорна на ултра-љубичасто зрачење се користи за плоче за нискотемпературну примену.

Цеви или канали, њихов положај, као и начин везивања цеви или канала којим протиче радни флуид, су веома важни и технолошки захтевни јер они усмеравају радни флуид који са собом носи топлоту од улаза до излаза. Постоје примери где су апсорбер и транспортни канал израђени изједна, при чему се остварује одличан контакт између загрејане апсорбционе плоче и флуида. Такође, цеви могу бити постављене изнад или испод апсорбционе плоче и при том је потребно обезбедити сигурнији начин везивања због високих температура апсорбера. Савремене технологије спајања значајно подижу квалитет соларних колектора.

Заглавља или држачи омогућавају проток и пражњење течности.

Изолација служи за смањење губитака топлоте са задње и бочне стране колектора. За колекторе који раде на вишим температурама обично се користи изолација од стаклене или минералне вуне, због постојаности. На нижим температурама могу се користити компактнији изолациони материјали, типа стиропор. Развојем технологија, развијају се и нови изолациони материјали који имају двоструку улогу: улогу изолације и улогу транспарентних покривача соларног колектора.

Кутије равних соларних колектора обједињују све компоненте и штите их од прашине, влаге, и других спољашњих утицаја [2, 34, 35].

4. Актуелно стање развоја позиционирања соларних колектора

Постизање задате ефикасности соларног колектора подразумева да је његова оријентација и оптимална позиција (угао нагиба и угао азимута) таква да прима највећу могућу количину Сунчевог зрачења, односно да је угао нормале његове површине у случају равнoг соларног колектора и правца Сунчевог зрака што мањи и да тежи нули. Побољшање енергетских карактеристика инсталација соларних пријемника специјално на кућама са нето нултом енергетском потрошњом је један од могућих начина за ублажавање енергетске кризе.

У суштини, у истраживањима у оквиру ове докторске дисертације, унапређен је рад соларних енергетских система. То је важан задатак који је постављен пред човечанство и који је већ дужи низ година стално актуелна тема. У овом поглављу дат је преглед актуелног стања развоја позиционирања соларних колектора.

Анализа инсталација извршена је на основу симулација обављених уз помоћ софтвера *EnergyPlus*, а оптимизација је извршена коришћењем *Hooke Jeeves* методе. У овом истраживању метода *Hooke Jeeves* је коришћена да оптимизује токове енергије у СТВ. У постојећој литератури постоје бројна истраживања која су користила исту методологију у случајевима оптимизације зграда, индустријских објеката и апарата.

Да би употреба СТВ донела највише користи, цео систем мора бити адекватно димензиониран, инсталиран и пуштен у рад. Постоји велики број истраживања система за загревање СТВ методом симулације и оптимизације. *Nafeu* је [38] истакао предности симулационих програма делећи их у две групе: симулације за посебне намене и симулациони програми за општу употребу. Посебну важност је посветио системима за грејање СТВ, узимајући у обзир све параметре система уз поштовање процедура енергетског моделирања и превео систем за грејање СТВ у енергетски модел. Истакао је предности нових компјутерских симулационих програма и забележио правце њиховог напретка. *Soulayman* и други аутори су проучавали економску остварљивост соларног система за грејање СТВ у Сирији и Јерменији [40]. *Salasovich* и други аутори у свом раду разматрају географска и метеоролошка ограничења пасивног соларног система за грејање СТВ. Доводне и одводне цеви пасивног соларног система су изложене временским условима, према којима, као велики проблем се јавља замрзавање цеви. У том раду је представљен модел замрзавања цеви. Резултати симулације дају вероватноћу замрзавања цеви у испитиваним климатским условима. На мапи континенталног дела САД представљена је вероватноћа замрзавања цеви за пасивне соларне системе у стамбеним и пословним зградама, као и вероватноћа замрзавања цеви у зависности од врста цеви и

изолације [41]. *Prud'homme* и *Gillet* су истраживали, у Швајцарској, стратегију напредне контроле система за грејање СТВ са сегментираним помоћним грејачем. Рад описује побољшања која могу да се уведу у самој структури система, као и напредне контроле система у циљу побољшања укупне ефикасности соларних система за снабдевање санитарном топлом водом. У ова истраживања било је неопходно укључити метеоролошке податке, као и предвиђене потребе корисника за санитарном водом. Сегментација помоћног грејача у комбинацији са напредном контролном стратегијом је као резултат дала значајна побољшања у потрошњи енергије [42]. *Wojdyga* је истраживао потрошњу топлоте када се соларни пријемници користе у нискоенергетским зградама [43]. *Бојућ* и други аутори су извршили симулацију СТВ уз помоћ модела са временским ограничењима. Математички модел у том раду коришћен је да би се утврдиле вредности соларног удела у функцији запремине бојлера, температуре потребне за загревање воде, разлике између ове температуре и температуре за акумулацију топле воде у бојлеру. Резултати су показали да су вредности соларног удела веће са повећањем запремине бојлера. Такође, вредност соларног удела се повећава са смањењем температуре потрошне воде, тј. повећањем температурских разлика између просечне температуре акумулиране воде и температуре потрошне воде [39].

У истраживању оптимизације, *Fraisie* и други аутори су приказали компаративну студију различитих критеријума за оптимизацију СТВ и дали предлог за нову глобалну процену. Урађена је енергетска, ексергетска и економска анализа, као и анализа утицаја на животну средину. Оптимизована решења упоређена су са решењима која одговарају стандардном систему за грејање топле воде. У тој студији предложени су нови критеријуми процене који укључују трошкове животног циклуса, уштеду примарне енергије и избегнуту емисију CO_2 у односу на предложено решење [44]. *Kulkarni* и други аутори су дали методологију утврђивања дизајна соларних система за грејање СТВ, потребну за синтезу, анализу и оптимизацију истих. Предложена методологија укључује различита ограничења дизајна система. Закључено је да постоји минимална и максимална површина пријемника која се посматра у односу на непроменљиву вредност соларног удела. Због променљивих вредности соларног зрачења, параметара система, и података о трошковима, глобална оптимизација се не може користити да представи релевантан дизајн. Из тог разлога, у том раду су предложене могуће конфигурације дизајна [45]. *Aghbalou* и други аутори су изнели дискусију о ексергетској оптимизацији соларних система и систему за чување топлотне енергије [46]. *Szargut* и *Stanek* су извршили термо-еколошку оптимизацију соларног пријемника. Соларни систем садржи соларни пријемник који производи енергију за грејање воде у домаћинствима. Оптимизација функције циља укључује следеће параметре: површина пријемника по јединици потражње топлоте, пречник цеви пријемника и раздаљина између оса цеви у плочи пријемника. Параметри дизајна за унутрашњу инсталацију (цеви и резервоар топле воде) нису узети у обзир јер се разликују од случаја до случаја [47]. *Farahat* и други аутори су истражили ексергетску оптимизацију равног соларног пријемника. Најпре је извршена детаљна енергетска и ексергетска анализа у циљу процене топлотне и оптичке ефикасности, токова енергије и ексергије, као и ексергетске ефикасности за типични раван соларни пријемник у датим условима. Ексергетска оптимизација у датим геометријским и оперативним условима је урађена да би се добиле оптималне вредности масеног протока, површине пријемника и максималне ексергетске ефикасности. На тај начин, добијени су прецизнији резултати и корисне примене

ексергетске методе у дизајну соларних пријемника. [48]. *Shariah* и други аутори су оптимизовали угао нагиба соларних пријемника уз помоћ симулационог софтвера *TRNSYS*. Соларни удео је био основни индикатор оптималног угла у северним и јужним деловима Јордана [49].

У литератури постоји велики број истраживања која су заправо темељ ове докторске дисертације, а која се баве истраживањем позиционирања соларног пријемника. На основу екстратерестријалног сунчевог зрачења, *Gunerhan* и *Heptasli* су утврдили оптимални угао нагиба соларних пријемника за примену на зградама у Измиру, у Турској. Оптимални угао нагиба је одређиван за тачан дан и доба године и дошли су до закључка да је препоручљиво да се соларни пријемник једном месечно поставља под одређеним углом [50]. *Nijegorodov* и *Jain* су уз помоћ једначина за глобално Сунчево зрачење, на основу емпиријског модела, израчунали оптимални нагиб пријемника усмереног ка северо-истоку, од северног ка јужном полу. Рађене су дневне варијације оптималног нагиба у односу на географску ширину. У ведрим временским условима дошло се до закључка да дневни оптимални нагиб има симетричне карактеристике које се огледају у симетрији Сунчевог кретања и симетрији екватора од севера ка југу. Међутим, реални оптимални нагиб такође зависи од локалних временских услова и трајања сунчевих сати, због чега се ове карактеристике оптималног нагиба не могу увек искористити. Ефекти метеоролошких параметара као што су температуре, притисак, релативна влажност, видљивост и облачност су узети у разматрање у процесу процене оптималног нагиба. Метод је примењен да би се добио просечни оптимални нагиб на месечном нивоу за 12 метеоролошких станица на 12 различитих локација у Боцвани [52]. *Moncos* је израчунао оптимални угао нагиба за соларне пријемнике у Асјуту, у Египту, на дневном нивоу, као и за одређене периоде у години. Ове вредности оптималног угла су добијене тако што су се тражиле вредности за које се добија максимално зрачење на пријемнику за одређени дан или доба године. Резултати показују да је потребно променити угао нагиба осам пута у току године да би се одржало максимално зрачење које пријемник прикупи у Асјуту. Овим се постиже да на годишњем нивоу укупно зрачење буде 6.85 % мање него у случају стационарног пријемника на нагибу 27° , који одговара географској ширини у Асјуту. Такође, примећено је да уколико се површина по сату угла азимута промени дванаест пута у току године, а угао нагиба шест пута, соларни пријемник одржава укупно зрачење близу максималне вредности (до овога се дошло тако што су се угао азимута и угао нагиба мењали на дневном нивоу да би се поставили на оптималне позиције). Овим се добило 29.18 % више укупног зрачења него у случају соларног пријемника усмереног ка југу са нагибом који одговара географској ширини [53]. Утврђивањем трајања сунчаних периода, *Chang* је оквирно израчунао оптимални угао нагиба стационарног соларног пријемника и то за различите периоде у години и географске ширине у северној хемисфери. Коришћењем емпиријског модела израчунате су вредности и екстратерестријалног зрачења и глобалног зрачења. Резултати су показали да је јулијански календар довољно прецизан да предвиди Сунчеву позицију на основу анализа угла деклинације, азимута и зенита. Годишњи оптимални углови су позитивни (приближно 0.91 и 0.76 помножени географском ширином за екстратерестријално и глобално зрачење) за географску ширину испод 65° . Количина годишњег соларног зрачења које прикупи пријемник постављен под годишњим оптималним углом се повећава са географском ширином и достиже максимум од 1.71 за екстратерестријално и 1.35 за глобално зрачење на географским ширинама близу 65° . Ефикасност соларног пријемника се смањује када је

облачно [51]. На основу упадних углова директног Сунчевог зрачења, *Skeiker* је израчунао оптимални угао нагиба и оријентацију за соларне пријемнике у Сирији, на дневном нивоу и за одређено доба године. Оптимални угао је израчунат тако што су се тражиле вредности за које ће се добити максимално зрачење које падне на површину пријемника за одређени дан или одређено доба године. Резултати показују, ако се угао нагиба промени 12 пута у току године, вредност укупне количине Сунчевог зрачења је близу максималне количине добијене мењањем угла нагиба на дневном нивоу. Овим се добије око 30 % више соларне енергије него у случају стационарног соларног пријемника [54]. Узевши у обзир позицију Сунца на небу и користећи модел *ASHRAE, Bari* је израчунао оптималну оријентацију домаћих соларних пријемника за земље ближе екватору. Резултати су показали углове нагиба између 30° и 40°. Већина соларних колектора је неправилно постављена и они примају 10-35 % мање зрачења него правилно инсталиран соларни колектор [55]. Користећи добијене вредности глобалног сунчевог зрачења, *Ibrahim* је израчунао оптимални угао нагиба равних соларних пријемника за загревање воде, на Кипру. Дате су препоруке како се генерисана енергија може увећати тиме што ће се променити угао нагиба. У том раду се претпоставља да је површина соларног пријемника окренута ка југу и прорачуни су засновани на измереним вредностима за дневну количину глобалног зрачења на површину острва. Затим се процењује директно и дифузно зрачење, а Сунчево зрачење на нагнутој површини се израчунава као угао нагиба који варира од 0° до 90°. Приказано је да уколико се угао нагиба мења четири пута годишње, једном за свако годишње доба, може се постићи скоро оптимална количина енергије [56]. *Yakup* и *Malik* су тражили вредности за максимално укупно зрачење за одређени период уз помоћ измерених података за глобално и дифузно зрачење и израчунали оптимални угао нагиба и оријентацију за соларни пријемник у Брунеју, на дневном нивоу или за одређено доба године. Оптимални угао је израчунат тако што су се тражиле вредности за које је укупно Сунчево зрачење на површини соларног пријемника максимално за одређени дан или одређено доба године. Резултати показују, ако се угао нагиба промени 12 пута у току године (користећи оптимални угао израчунат на месечном нивоу), укупна количина Сунчевог зрачења је близу максималне вредности која је добијена тако што се угао нагиба мењао сваког дана да би се добила оптимална вредност. Овим се добија 5% више соларне енергије него у случају када је стационаран соларни пријемник на хоризонталној површини [57]. На основу измерене просечне вредности Сунчевог зрачења на месечном нивоу, *Hartley* и други аутори су израчунали угао нагиба соларног пријемника. Угао нагиба је израчунат на основу забележених података о количини Сунчевог зрачења које падне на вертикалне површине, које су окренуте у правцу север, југ, исток и запад и на хоризонталне површине сваких десет минута, за време трајања сунчаних сати од јануара до децембра, у Валенсији у Шпанији. Ови подаци су упоређени са процењеном вредности Сунчевог зрачења модела са нагнутим површинама. Резултати показују да је модел коришћен да би се утврдила промена оптималног угла нагиба из сата у сат за соларни пријемник који је окренут ка југу. Овај модел је такође коришћен да би се израчунала просечна вредност овог угла на годишњем нивоу [58]. На основу месечних вредности хоризонталног зрачења, *Tang* и *Wu* су израчунали оптималне углове нагиба за соларне пријемнике у Кини. Поређењем оптималних вредности углова нагиба пријемника које су добијене од очекиваног месечног дифузног зрачења и реалног месечног дифузног зрачења показали су да овај метод даје добру процену оптималног угла нагиба, осим за места која имају низак индекс

прозрачности. На основу месечног хоризонталног зрачења у 152 места широм Кине, у комбинацији са оптималним углом нагиба у 30 градова, на основу реалног месечног дифузног зрачења на карти је приказан оптимални угао нагиба пријемника који су окренути у правцу југа и који се користе у Кини током целе године [59]. На основу података добијених од метеоролошке станице за Сунчево зрачење, *Shariah* и други аутори су израчунали оптимални угао нагиба соларних пријемника за загревање СТВ где је максимална вредност соларног удела коришћена као индикатор оптималног нагиба у северним и јужним деловима Јордана. Резултати показују да је угао нагиба пријемника, који одговара максималној вредности соларног удела, за северну и јужну област, 10 % и 20 %, респективно. Ове вредности су за 5 - 10 % веће од максималне вредности Сунчевог зрачења које падне на површину соларног колектора [49].

Да би оптимизовали ток енергије у зградама, *Hasan* и други аутори су смањили на минимум трошкове животног циклуса куће, користећи комбинацију симулације и оптимизације. У овом истраживању, *Hooke Jeeves* метода је коришћена да оптимизује токове енергије у СТВ [60]. За нискоенергетске зграде, *Peippo* и други аутори су извршили нумеричку мултиваријантну оптимизацију у циљу добијања оптималних променљивих. Приступ се заснива на интеграцији нелинеарне оптимизације, са димензионисањем зграде, где је објашњена интеракција основних физичких, техничких и економских фактора између опција за димензионисање зграде и токова енергије. Оптимизација се користи да нађе најјекономичније решење на основу датих услова, ограничења пројекта и циљане енергетске потрошње [61]. За различите италијанске школске зграде и климатске услове, *Calise* је извршио термо-економску анализу и оптимизацију високе ефикасности соларног грејања и расхладних система за различите метеоролошке услове у Италији. Анализа је извршена уз помоћ модела симулације у оквиру софтвера *TRNSYS*, а такође је укључена и анализа динамичког понашања зграде. Предложен је економски модел да би се добила процена оперативних и капиталних трошкова анализираних система. Поред тога, извршена је анализа параметара, а затим је имплементиран комбиновани алгоритам оптимизације у циљу утврђивања сета променљивих које доприносе максималној исплативости система. Резултати су добри у погледу потенцијалне уштеде енергије али са друге стране, економска исплативост оваквог система се може постићи само у случају да постоји политика финансирања (нпр. улазна такса), као што то иначе бива у случају већине система који користе обновљиве изворе енергије [62]. Поред тога, *Calise* и други аутори су извршили прелазну анализу и оптимизацију енергије за соларне грејне и расхладне системе са различитим конфигурацијама. Развијен је и економски модел да би се извршила процена оперативних и капиталних трошкова анализираних система. Поред тога, имплементиран је комбиновани алгоритам оптимизације у циљу утврђивања сета променљивих који доприносе максималној енергетској ефикасности сваке од анализираних конфигурација. Резултати студије случаја су анализирани на месечном и недељном нивоу, где је посебна пажња посвећена енергији и монетарном протоку код стандардних и оптимизованих конфигурација [63]. *Fraisie* и други аутори су упоредили различите критеријуме оптимизације СТВ и предложили нову глобалну процену [64]. У циљу оптимизације токова енергије у индустрији, *Nahman* и други аутори су рад индустријске мреже учинили ефикаснијом. Рад се бави рационализацијом снабдевања индустријске мреже електричном енергијом. Оптимизована је компензација реактивне енергије и пренос оптерећења, а добијени подаци су даље обрађени *Hooke Jeeves* алгоритмом претраге [65]. *Zaki* и *Al-Turki*

су извршили оптимизовану вишеслојну термалну изолацију цевних водова. Рад се бави економском анализом топлотне изолације система цевовода који су изоловани различитим материјалима. Анализа је заснована на нелинеарној функцији трошкова која укључује годишњи губитак енергије и иницијалне трошкове изолације. Анализа објашњава безбедносна ограничења температуре спољне површине изолационог материјала. Модификовани *Hooke Jeeves* алгоритам претраге је употребљен да би се пронашла оптимална дебљина и најмањи годишњи трошак у оквиру датих ограничења [66]. Да би оптимизовали рад различитих система, *Kinsara* и други аутори су предложили енергетски ефикасно решење за климатизацију користећи математичко моделирање различитих компоненти и особина предложеног система, као и компјутерски програм припремљен за проучавање перформанси система под различитим условима. Потрошња енергије код конвенционалних клима уређаја је веома висока, нарочито у топлим и влажним подручјима. [67]. *Tummala* и други аутори су симулирали и оптимизовали резервоар за чување водоника у возилима. Оптимизационим процедурама добили су најефикасније решење складиштења водоника у термо-контролисаним резервоарима возила са директним убризгавањем гаса [68]. *Ustai* и *Ileri* су извршили економску оптимизацију индустријских система за хлађење. Компјутерски програм је специјално развијен за одређивање оптималне вредности економских параметара расхладних система. Утицај одређених параметара је утврђен различитим студијама случајева и анализом осетљивости. Утврђено је да су тип кондензатора, температура околине, годишњи оперативни сати, цена електричне енергије, реална каматна стопа и расхладно средство најважнији параметри у економском оптималном пројектовању расхладних система [69].

Talebizadeh у истраживању приказује оптимални нагиб и угао азимута на основу добијених вредности из сата у сат, дневно, месечно, према годишњем добу и годишње. За добијање резултата коришћен је генетички алгоритам. Добијене су вредности соларног удела на оптималном нагибу. Осим тога, испитан је и утицај компоненти соларног зрачења на ефикасност соларних пријемника и фотонапонских плоча [70]. *Mohammadi* и *Khorasanizadeh* су уз помоћ модела соларног зрачења *Klein* и *Theilacke* оцењивали компоненте зрачења претпостављајући вредности углова азимута за неколико градова у Ирану, за различите периоде године [71]. *Gopinathan* је са групом аутора користио анизотропни модел, преузет од *Hay*-а, за одређивање вредности дневног соларног зрачења, за различите нагибе и орјентацију соларног пријемника. Одредио је за зиму, лето и годишње временске интервале оптималан нагиб, за различите вредности углова азимута у циљу максимирања годишњег укупног Сунчевог зрачења [72].

Прегледом и анализом релевантних научних радова закључено је да не постоје истраживања у погледу одређивања зависности оптималних величина углова (угао нагиба и угао азимута), као и распореда рада соларне инсталације током године, све то у функцији услова пројектовања инсталације, њеног инсталирања и услова њеног рада. У том смислу, ова докторска дисертација представља једно од првих систематских истраживања ове врсте.

5. Моделирање енергетских нултих кућа и инсталација соларних колектора

Моделирање и анализа соларних система за грејање СТВ, као део кућа нето-нулте потрошње енергије, извршена је на основу симулација добијених уз помоћ софтвера *EnergyPlus*, а оптимизација је извршена коришћењем *GenOpt* и *Hooke Jeeves* методе. У овом истраживању метода *Hooke Jeeves* је коришћена да оптимизује токове енергије у СТВ.

Да би употреба СТВ донела највише користи и да би се постигао концепт кућа нето-нулте потрошње енергије, СТВ мора бити адекватно димензиониран, инсталиран и пуштен у рад. Зато и постоји велико интересовање за истраживање СТВ методом симулације и оптимизације.

5.1 Симулациони софтвери

5.1.1 *EnergyPlus*

У овој докторској дисертацији коришћен је симулациони софтвер *EnergyPlus* (верзија 7.0.0). *EnergyPlus* је продукт лабораторије *Lawrence Berkley* у САД-у [73]. Његов развој је започео 1996. године на основама два програма: *DOE-2* као алат за симулацију енергетских оптерећења зграда и *BLAST* (енгл. *Building Loads Analysis and System Thermodynamics* - анализа оптерећења и термодинамичких система), који су у то време били у широкој примени. Софтвер служи за симулацију енергетског понашања зграда, као и симулацију употребе обновљивих извора енергије у зградама [74]. Симулације са обновљивом енергијом у овој докторској дисертацији се односе на рад соларних пријемника. У току симулације је одређена соларна и електрична енергија коришћена за рад соларног система за грејање СТВ у кућама нето-нулте потрошње енергије, за неколико градова у Србији. Затим, соларна фракција је одређена за различито дизајниране инсталације и различите радне параметре. Остале карактеристике симулација *EnergyPlus*-ом су: временски кораци који се могу мењати, модуларни системи које може да конфигурише корисник и улазно-излазне структуре података које дефинише корисник. Валидност софтвера је испитана по процедурама *IEA HVAC BESTEST E100-E200* и при том добијени резултати су поређени са поставкама *ASHRAE* стандарда [75].

На слици 5.1 приказана је организациона структура програма *EnergyPlus*. *EnergyPlus* садржи три основне компоненте: симулациони менаџер, симулациони модул масеног и топлотног биланса и симулациони модул система зграде. Симулациони менаџер контролише цео симулациони процес. Прорачун топлотног биланса се заснива на *BLAST*

верзији са интегрисаним системима за климатизацију, грејање и хлађење и симулацијом оптерећења зграде.

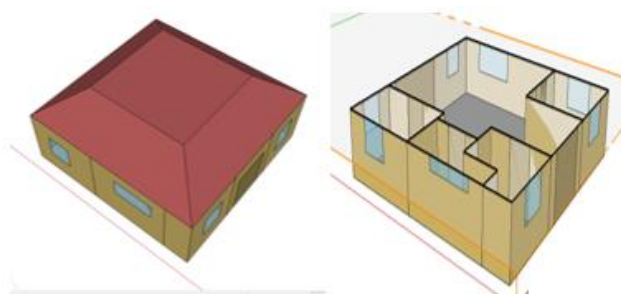


Слика 5.1 - Организациона структура програма EnergyPlus

Да би се приказао модел куће са системом за грејање топле воде у *EnergyPlus* окружењу, користе се модели различитих компоненти уграђених у *EnergyPlus*, као што су: модели соларног пријемника, бојлера, вентила за мешање загрејане воде хладном водом и проточног бојлера који догрева воду на жељену температуру. Вода у бојлеру се загрева соларном енергијом, а проточни бојлер користи електричну енергију [76].

5.1.2 Google SketchUp

Google SketchUp је бесплатан 3D софтверски алат који комбинује групу алатки са интелигентним системом за дизајнирање [4]. *Last Software Boulder* компанија из Колорада, САД, током 2000. године је развила овај софтвер као добру радну алатку архитектама, дизајнерима, градитељима, произвођачима и инжењерима. Зграда у *Google SketchUp* окружењу са својим пресецима је приказана на слици 5.2. Овај софтвер омогућава да се модели поставе помоћу координатног система реалног света, реалних координата. Коришћење *Google SketchUp*-а је веома једноставно. Постоје десетине видео лекција, центар за подршку и заједница корисника у читавом свету које објашњавају и олакшавају коришћење овог софтвера.



Слика 5.2 - 3D модел стамбеног објекта у *Google SketchUp*-у

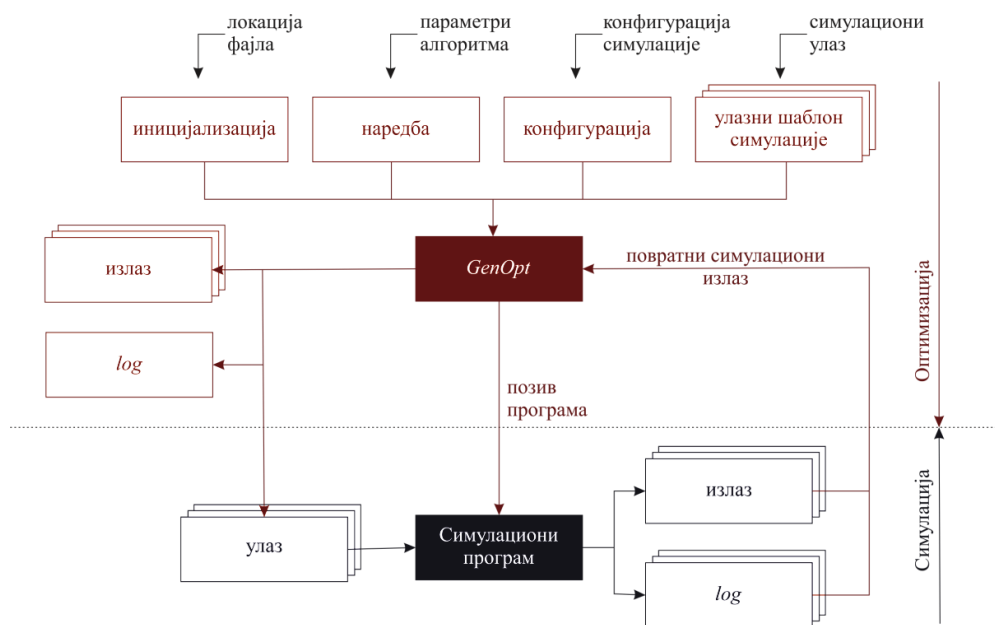
5.1.3 OpenStudio

OpenStudio је програмски додатак који додаје симулације енергетских својстава зграде *EnergyPlus*-а у *3D SketchUp* окружење. Овај софтвер омогућава креирање, уређивање и гледање *EnergyPlus* улазне датотеке у *SketchUp*-у. Овај додатак користи стандардне алате које пружа *SketchUp*. Софтвер додаје онолико елемената колико је потребно за зоне и површине. Програмски додатак омогућава да се лако направи геометрија зграда: додати зону, нацртати површине за пренос топлоте, нацртати прозоре и врата, нацртати осенчене површине, итд. Такође, омогућено је да се сачува оно што је нацртано као *EnergyPlus* улазна датотека. Овај програмски додатак уједно омогућава корисницима да покрену *EnergyPlus* симулације и виде резултате унутар *SketchUp*-а.

5.2 Методологија оптимизације

5.2.1 Оптимизациони софтвер *GenOpt*

GenOpt је оптимизациони програм за минимизацију вредности функције циља која се одређује екстерним симулационим програмом [77]. Оптимизациони и симулациони подаци које користи *GenOpt* у оптимизационим токовима приказан је на слици 5.3. Развијен је за проблеме оптимизације где је прорачун функције циља рачунски веома комплексан, а изводи те функције циља или нису доступни, или не постоје. *GenOpt* се може повезати са било којим симулационим програмом који чита своје улазне податке из текстуалних фајлова и записује своје излазне податке у текстуалне фајлове. Независне променљиве могу бити континуалне (са горњим или доњим граничним вредностима), дискретне, или и континуиране и дискретне. Ограничења на зависним променљивама могу се применити коришћењем функција ограничења. *GenOpt* је написан у *Javi* тако да не зависи од платформе. Независност од платформе и општи интерфејс чине *GenOpt* применљивим на велики спектар проблема оптимизације. *GenOpt* поседује библиотеку са адаптивним алгоритмом *Hooke Jeeves* и са низом једно-димензионалних и више-димензионалних оптимизационих алгоритама [78].



Слика 5.3 - Граф оптимизације *GenOpt* софтвером

GenOpt користи паралелно процесирање и није дизајниран и доступан за линеарно програмирање проблема, квадратне проблеме програмирања и проблеме у којима је градијент функција циља. За такве проблеме, као и за друге проблеме, прилагођени су и постоје посебни софтвери који су далеко ефикаснији.

5.2.2 Оптимизациони алгоритам *Hooke Jeeves*

Hooke Jeeves је оптимизациони алгоритам који користи директно претраживање [79, 80, 81]. У алгоритму *Hooke Jeeves* се користе функције циља и вредности ограничења за усмеравање претраживања. У овом истраживању употребљен је алгоритам *Hooke Jeeves* адаптивне тачности. Поређењем са алгоритмом *Hooke Jeeves* константне тачности, алгоритам *Hooke Jeeves* адаптивне тачности има тест који управља тачношћу апроксимације функције циља. Тест проузрокује да у почетним итерацијама оптимизациони алгоритми грубо апроксимирају функцију циља и да прогресивно увећавају тачност апроксимације функција циља, при чему се тачност приближава стационарној вредности. Друга разлика између адаптивног алгоритма *Hooke Jeeves* и алгоритма *Hooke Jeeves* константне тачности је да адаптивни алгоритам може да укључи параметре којима се претходно довољно смањује вредност функције циља. То су код шаблонских истраживачких алгоритама користили други истраживачи [82]. Алгоритам управљања адаптивном тачношћу смањује време израчунавања око четири пута у поређењу са стандардним алгоритмом *Hooke Jeeves*.

6. Математички модели

Основна хипотеза докторске дисертације од које се полази у овим истраживањима јесте да тачно одређен (оптималан положај) соларних пријемника у простору и времену одговара производњи максималне топлотне енергије из соларне енергије. Праћењем положаја Сунца, у сваком тренутку, обезбеђује се максимални могући интензитет расположивог зрачења, које у том тренутку пада на соларни пријемник. Стога, укључивањем савремених метода енергомониторинга и енергодијагностике, уз неопходну подршку савремених симулационих и оптимизационих рутина за систем соларних колектора за грејање санитарне воде на крову било које куће, добијамо максималне вредности соларних удела.

У овом поглављу су дати математички модели у *EnergyPlus* окружењу помоћу којих се генерише енергија и то за систем за грејање санитарне топле воде у домаћинству уз помоћ соларних колектора са одговарајућом инсталацијом, као и математички модел Сунчевог зрачења.

6.1 Математички модел Сунчевог зрачења

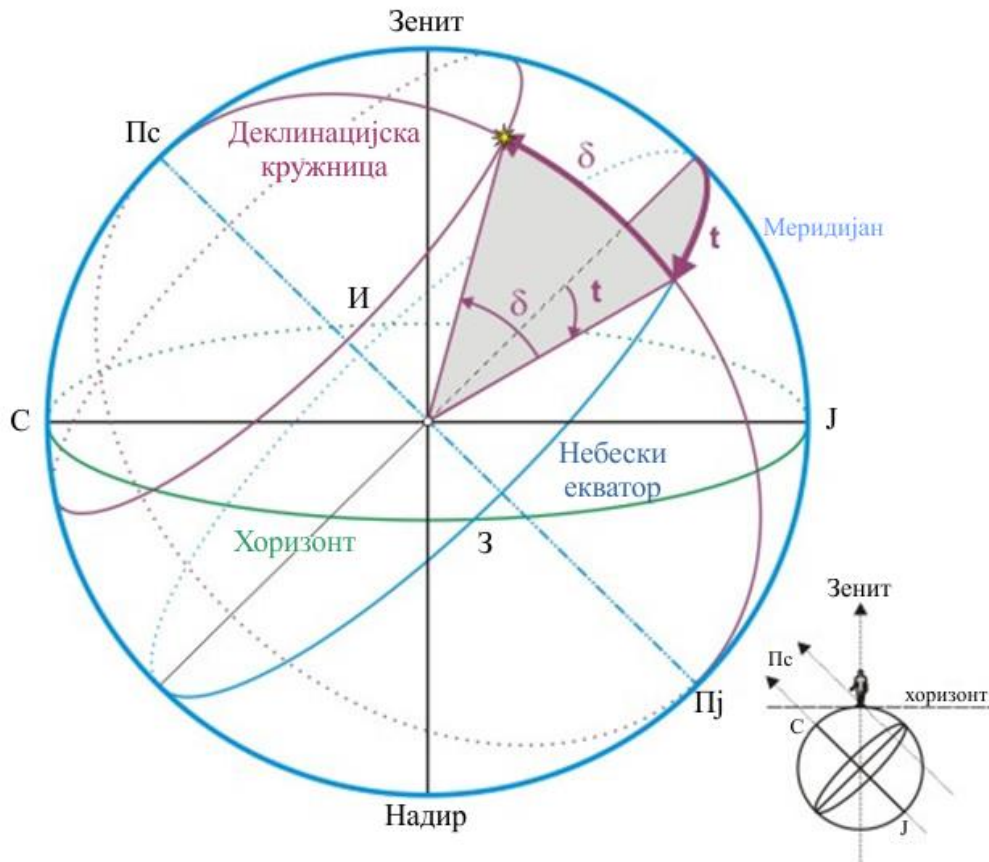
У циљу одређивања максимално расположиве соларне енергије, као и оптималне позиције пријемника на одређеној географској локацији, неопходно је претходно познавати положај Сунца. Осим тога, соларни пријемник мора да буде постављен под одређеним углом на хоризонталну површину, јер он у пракси никада није на хоризонталној површини. *Johann Heinrich Lambert* (1728 - 1777. година) је формулисао закон који је и познат по његовом имену: "Ламбертов косинусни закон". Захтев за постављање соларног пријемника на нагнуту површину дефинисан је по овом закону, по којем је интензитет зрачења у неком тренутку, који доспева на неку површину, највећи уколико се правац зрака поклапа се нормалом површине, односно ако је упадни угао зрака једнак нули. Ако је упадни угао зрака већи од нуле, интензитет тог зрачења сразмерно је мањи за косинус упадног угла. [2, 34].

6.1.1 Одређивање положаја Сунца

За одређивање положаја Сунца у односу на Земљу користимо два координатна система: екваторски и хоризонтски.

Екваторски координатни систем има координатни почетак у посматрачевом оку. Раван екватора је основна равна екваторског координатног система. Екватор је велики круг небеске сфере по којој се креће Сунце. Екватор је нормалан на Земљину осу ротације (светска осовина P_c и P_j). Места где вертикала сече хоризонт су зенит и надир.

Деклинацијски круг је велики круг небеске сфере коме припадају Земљина оса ротације и Сунце. Координате Сунца у екваторском координатном систему, приказаном на слици 6.1, су деклинација, δ и часовни угао, t .



Слика 6.1 - Екваторски координатни систем

Деклинација представља угао у равни деклинацијског круга који се мери од равни екватора до правца који спаја посматрача и Сунце и изражава се у степенима. Тачке северно од екватора имају позитивну, а јужно од екватора негативну деклинацију. Тако, деклинација северног небеског пола износи $+90^\circ$, а јужног небеског пола -90° .

Вредност деклинације за било који положај Сунца се може израчунати коришћењем једначине, а да при том има веома мала одступања од стварне деклинације (6.1):

$$\delta = \left(23 + \frac{27}{60} \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot brd_{21}}{365.25} \right) \cdot \frac{\pi}{180}, \quad (6.1)$$

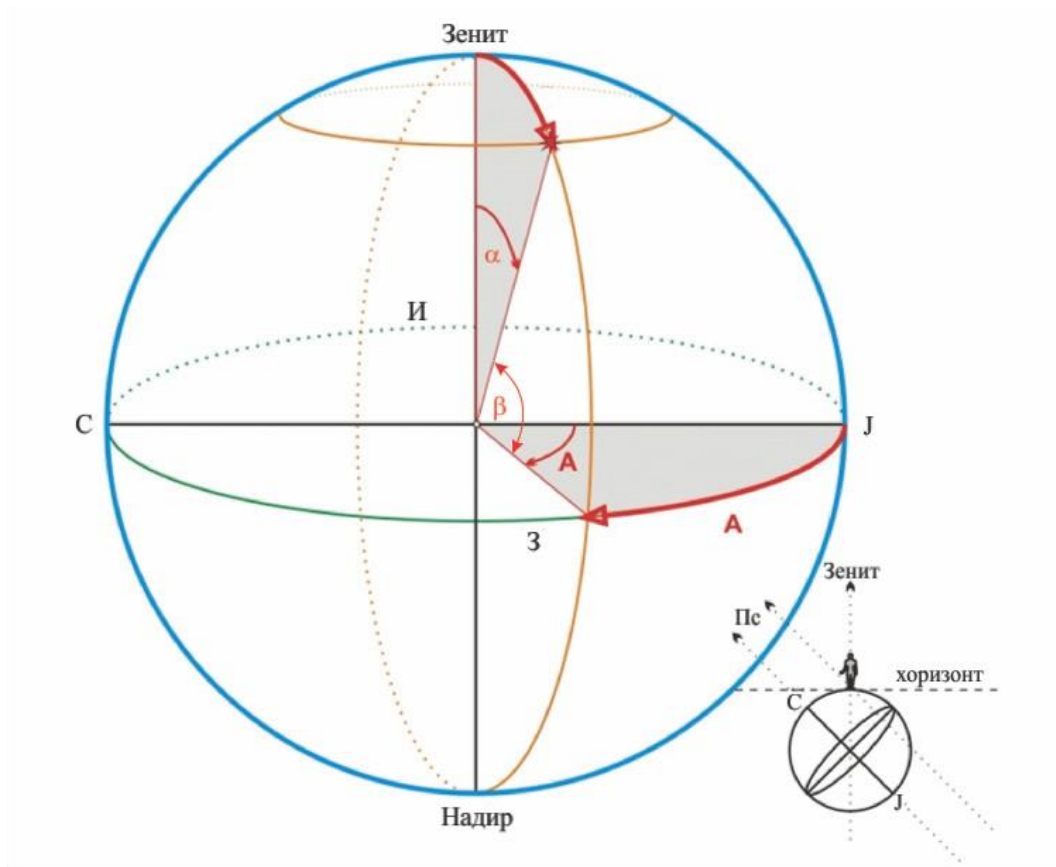
где је: brd_{21} (-) број дана протеклих од пролећне равнодневице на северној хемисфери.

Часовни угао дефинисан је као угаоно растојање између деклинацијског угла и меридијана посматрача, мерено у смеру кретања казаљке на часовнику. С обзиром да је деклинација непромењива у зависности од места посматрања и привидног дневног кретања Сунца, часовни угао се мења. Часовни угао, t одређује право сунчано време коришћењем једначине (6.2):

$$t = \left(t_0 - 12 - TZ + \frac{\lambda}{15} \right) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (6.2)$$

где је: t (rad) право сунчано време, t_0 (h) светско (локално) време које се читава на часовнику, TZ (-) временска зона географске локације пријемника, λ ($^\circ$) географска дужина места где је пријемник лоциран.

Хоризонтски (азимутски) координатни систем је сферни координатни систем који има координатни почетак у посматрачевом оку. Положаји Сунца у хоризонтском координатном систему нису стални и мењају се због Земљине ротације. Раван хоризонта је основна раван хоризонтског (азимутског) координатног система. Основни правац је правац ка јужној тачки на хоризонту. Основне тачке у овом координатном систему су зенит, надир и јужна тачка на хоризонту. Зенит је тачка у којој је права, која пролази кроз тачку на којој се налази посматрач, нормална на хоризонтску раван и сече небеску сферу, док је надир, њој супротна тачка (налази се испод хоризонта). На небеској сфери, у хоризонтском координатном систему, положај Сунца одређујемо помоћу углова, соларне алтитуде, α и азимута, ψ (слика 6.2):



Слика 6.2 - Хоризонтски (азимутски) координатни систем

Соларна алтитуа, α дефинише угаоно растојање, у вертикалној равни, од равни хоризонта, до правца који спаја посматрача и Сунце. Узима позитивне вредности за положај Сунца изнад равни хоризонта, односно негативне вредности за положај Сунца испод равни хоризонта.

Азимут, ψ се мери у равни хоризонта, од јужне тачке хоризонта до пројекције правца посматрач-Сунце на исту раван, у математички негативном, односно ретроградном смеру (смер казаљке на сату). Азимут може узимати вредности од 0° до 360° .

Хоризонтске координате су различите уколико се мере на два различита места у различито доба дана.

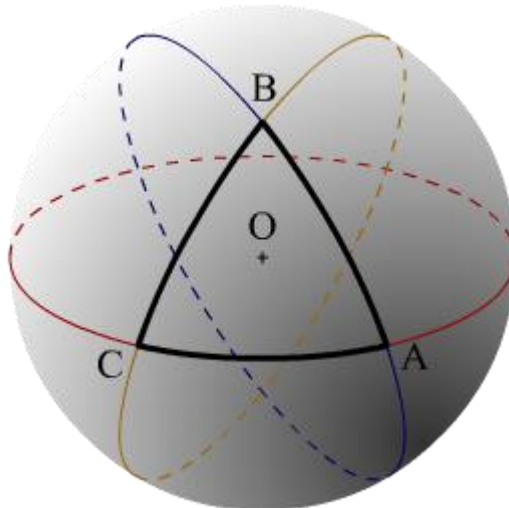
Познавајући координате положаја Сунца у екваторском координатном систему, могуће је одредити и положај Сунца у хоризонтском координатном систему преко једначина (6.3 - 6.5) применом сферне геометрије (синусне и косинусне теореме), која даје везе страница и углова сферног троугла и обратно.

$$\sin \beta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos t \cdot \cos \varphi; \quad (6.3)$$

$$\sin \gamma = -\frac{\sin t \cdot \cos \delta}{\cos \beta}; \quad (6.4)$$

$$\cos \gamma = \frac{\sin \delta - \sin \beta \cdot \sin \varphi}{\cos \beta \cdot \cos \varphi}. \quad (6.5)$$

На слици 6.3 је приказан сферни троугао [2, 34, 83].



Слика 6.3 - Сферни троугао

6.1.2 Модел Сунчевог зрачења на хоризонталну површину соларног пријемника у *EnergyPlus* окружењу

О Сунчевом зрачењу је било речи у поглављу 3.1. Сунчево зрачење се може апсорбовати, одбити (рефлектовати) или може, мање или више, несметано проћи кроз атмосферу (трансмитовати се). У складу са тим, на Земљину површину пада директно и дифузно Сунчево зрачење са неба и рефлектовано зрачење са Земље и околних предмета.

Количина дозрачене Сунчеве енергије на неку површину на Земљи зависи од локације пријемне површине, позиције површине соларног пријемника у простору, оријентације површине у односу на стране света, доба године, услова атмосфере, величине пријемне површине, карактеристика пријемне површине, времена озрачености, итд.

Постоје многи математички модели за тренутно и просечно Сунчево зрачење. Математички модели Сунчевог зрачења су саставни делови сложених софтвера за симулацију термичког понашања зграда и система. У овој докторској дисертацији

математички модели Сунчевог зрачења су саставни део софтвера *EnergyPlus*. У наредним поглављима је дат приказ математичких модела *EnergyPlus*. Који модел ће софтвер преузети зависи од локације за коју радимо прорачуне, тј. да ли се она налази на јужној или северној хемисфери.

Соларно моделирање је један од најзначајнијих ефеката који је постигнут у *EnergyPlus*-у. Модели који су уграђени у *EnergyPlus* су *ASHRAE Clear Sky Solar Model*, *ASHRAE Revised Clear Sky Model* ("*Tau Model*"), *Zhang-Huang Solar Model* [76].

6.1.2.1 *ASHRAE Clear Sky Solar Model*

ASHRAE Clear Sky Solar Model је основни модел соларног зрачења које је развило Америчко друштво за грејање, климатизацију и соларну енергију 2005. године. Користи се за одређивање вредности соларног зрачења по сату у току ведрога дана за било који месец у години, на локацијама са умереним климатским условима на северној хемисфери, док за јужну хемисферу *EnergyPlus* има развијене сложеније прорачуне за процену соларног зрачења на хоризонталну површину (модел *ASHRAE Revised Clear Sky Model*) допуњен 2009. године.

На површини Земље када је ведар дан, директно нормално зрачење је представљено једначином:

$$\text{ДиректноНормалноЗрачење} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin \alpha}\right)}, \quad (6.6)$$

где је:

- A - соларно зрачење изнад Земљине атмосфере када је оптичка ваздушна маса једнака нули $m = 0$;
- B - атмосферски коефицијент екстинкције (слабљење Сунчевог сјаја услед апсорпције његове светлости при пролазу кроз атмосферу);
- α - соларна алтитуда (rad).

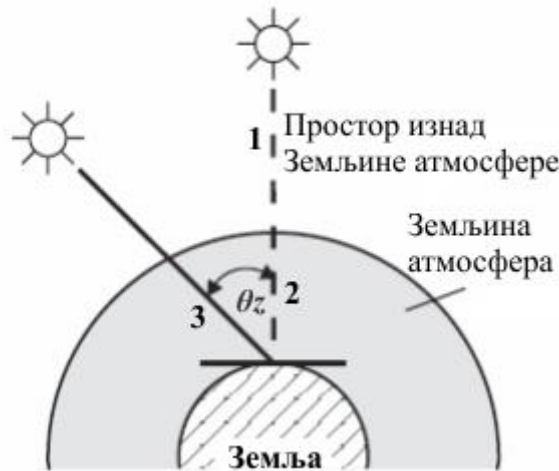
Вредности за A и B варирају, због сезонских промена у садржају паре у атмосфери и због промене удаљености Земља-Сунце. Једначина (6.6) не даје максималне вредности директног нормалног соларног зрачења које се могу добити у сваком месецу, међутим даје приближну вредност која представља услове дана за релативно суву и ведру атмосферу. Вредности директног нормалног соларног зрачења за услове јасне атмосфере су за 15 % веће од вредности које показује једначина (6.6), узимајући вредности за A и B дате у литератури за екстратерестријално соларно зрачење. За локације где јасна и сува атмосфера доминирају, једначина (6.6) даје велика одступања, па је зато потребно извршити прорачун и помножити дату једначину са бројем ведрих дана, да би процена била са већом тачношћу.

6.1.2.2 *ASHRAE Revised Clear Sky Model*

ASHRAE Revised Clear Sky Model ("*Tau Model*") је проширен математички модел који на основу локације узима у обзир релативне оптичке коефицијенте. Ове вредности су доступне за 5564 локација на читавој Земљиној кугли.

У соларној енергетици релативна оптичка ваздушна маса представља однос дужине пута Сунчевих зрака кроз атмосферу и дужине пута Сунчевих зрака кроз Земљину

атмосферу када је Сунце у зениту. За Сунчево зрачење изнад Земљине атмосфере узима се да је оптичка ваздушна маса једнака нули, при чему се спектрална дистрибуција енергије тог зрачења означава са $AM0$. Уколико на надморској висини нула, Сунчево зрачење пада вертикално на Земљу, оптичка ваздушна маса се обележава са $m = 1$, а спектрална дистрибуција енергије Сунчевог зрачења са $AM1$. Када Сунчево зрачење заклапа угао од 60° са нормалом на површину Земље, оптичка ваздушна маса је $m = 2$, а спектрална дистрибуција енергије Сунчевог зрачења означава се са $AM2$.



Слика 6.4 - Енергија Сунчевог зрачења у зависности од упадног угла Сунчевог зрачења и оптичке ваздушне масе: 1) $AM0$; 2) $\theta_z = 0$, $AM1$ и 3) $\theta_z = 60^\circ$, $AM2$, где је θ_z угао између упадних Сунчевих зрака и нормале на површину Земље

У зависности од географског положаја датог места и положаја Сунца, односно оптичке ваздушне масе, у литератури се могу наћи различити подаци за спектралну дистрибуцију енергије Сунчевог зрачења [85].

У коришћеном симулационом софтверу *EnergyPlus*, за израчунавање вредности m користи се једначина (6.7):

$$m = \frac{1}{\sin \alpha + 0.50572 \cdot (6.07995 + \alpha)^{-1.6364}}, \quad (6.7)$$

где је: α - соларна алтитуда (rad).

Директна и дифузна компонента зрачења у овом моделу *EnergyPlus*-а се израчунава апроксимативним изразом узимајући у обзир релативне оптичке коефицијенте масе ваздуха, m по следећим једначинама (6.8, 6.9):

$$H_{dir} = H_0 \cdot \exp[-\xi_b \cdot m^{a-b}], \quad (6.8)$$

$$H_{dif} = H_0 \cdot \exp[-\xi_d \cdot m^{a-d}], \quad (6.9)$$

где је:

- H_{dir} - енергија директног Сунчевог зрачења која у јединици времена пада на хоризонталну површину, (W/m^2);
- H_0 - енергија екстратерестријалног зрачења која у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине, (W/m^2);

- H_{dif} - енергија дифузног Сунчевог зрачења која у јединици времена пада на хоризонталну површину, (W/m^2);
- ξ_b и ξ_d - директна и дифузна оптичка константа (-);
- $a \cdot b$ и $a \cdot d$ - директни и дифузни масени експоненти (-).

Услед умањења светлосне енергије у дубини, атенуације Сунчевог зрачења која се јавља као последица механизма расејавања и апсорбције услед промена у атмосфери имамо и оптичке константе.

Директна и дифузна оптичка константа, ξ_b и ξ_d су подаци који се налазе у *ASHRAE* климатским подацима. Вредности ξ_b и ξ_d зависе од локације пријемника и мењају се у току године. Масени експоненти се рачунају у зависности од вредности оптичких константи директног и дифузног зрачења и дате су емпиријским изразима:

$$a \cdot b = 1.219 - 0.043 \cdot \xi_b - 0.151 \cdot \xi_d - 0.204 \cdot \xi_b \cdot \xi_d, \quad (6.10)$$

$$a \cdot d = 0.202 + 0.852 \cdot \xi_b - 0.007 \cdot \xi_d - 0.357 \cdot \xi_b \cdot \xi_d. \quad (6.11)$$

6.1.2.3 Zhang-Huang Solar Model

Zhang-Huang Solar Model је модел *EnergyPlus* окружења, развијен за соларно моделирање типичне метеоролошке године у Кини, а касније се показало да се веома добро примењује и на друге локације. Он узима у обзир надморску висину, облачност, релативну влажност, температуру сувог термометра, брзину ветра и укупно (глобално хоризонтално) соларно зрачење. Представљен је следећом једначином 6.12:

$$H = \frac{I_0 \cdot \sin \alpha \cdot (C_0 + C_1 \cdot CC + C_2 \cdot CC^2 + C_3 \cdot (T_n - T_{n-3}) + C_4 \cdot \varphi + C_5 \cdot V_w) + d}{k}, \quad (6.12)$$

где је:

- H - процењено соларно зрачење, (W/m^2);
- I_0 - глобална соларна константа, $1355 (W/m^2)$;
- α - угао соларне алтитуде, (rad);
- CC - облачност;
- ρ - релативна влажност, (%);
- T_n, T_{n-3} - температура сувог термометра у истраживаним сатима n до $n-3$, респективно, (K);
- V_w - брзина ветра, (m/s);
- $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, k, d$ - коефицијенти;
- $C_0 = 0.5598, C_1 = 0.4982, C_2 = -0.6762, C_3 = 0.02842, C_4 = -0.00317, C_5 = 0.014, d = -17.853, k = 0.843$.

6.1.3 Модел соларног зрачења на нагнуту површину соларног пријемника у *EnergyPlus* окружењу

Математички модел соларног зрачења на нагнуту површину у *EnergyPlus* окружењу заснива се на емпиријском моделу који је описао *Perez* са групом аутора 1990. године, а који је урађен на основу серије мерења компонената зрачења и који је детаљно је приказан у [76]. Укупно Сунчево зрачење које пада на произвољно орјентисану и произвољно позиционирану површину соларног пријемника зависи од директне компоненте зрачења,

дифузионе компоненте зрачења и рефлектоване компоненте зрачења. На слици 6.5 показано је укупно соларно зрачење које пада на нагнуту површину соларног пријемника, са компонентама зрачења.



Слика 6.5 - Укупно соларно зрачење које пада на нагнуту површину соларног пријемника

Једначине су апроксимативни изрази у *EnergyPlus* окружењу.

Укупно соларно зрачење које пада на нагнуте површине соларног колектора H дато је једначином:

$$H = H_{ref} + H_{dif} + H_{dir}, \quad (6.13)$$

где је:

- H_{ref} - рефлектована компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом β у односу на хоризонталну раван на Земљи (W/m^2);
- H_{dif} - дифузна компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом β у односу на хоризонталну раван на Земљи (W/m^2);
- H_{dir} - директна компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом β у односу на хоризонталну раван на Земљи (W/m^2).

На нагнуту површину у односу на Земљу пада директно и дифузно Сунчево зрачење са неба и рефлектовано зрачење H_{ref} са Земље и околних предмета. Након проласка кроз атмосферу, Сунчево зрачење наилази на различите површине. У зависности од својстава подлоге, већи или мањи део зрачења ће се рефлектовати, па се јавља компонента рефлектованог зрачења H_{ref} . Могућа су три процеса рефлексије. Огледалска (спекуларна) рефлексија на равним површинама (у природи на мирним водама), када је храпавост површине мања од таласне дужине Сунчевог зрачења. Ако је храпавост површине упоредива са таласном дужином зрачења, могућа је распршујућа рефлексија која се састоји од више огледалских рефлексија у свим елементарним равнима од које се површина састоји. Запреминска рефлексија се догађа када зрачење продре кроз површину и одбије се од различитих слојева испод површине. Укупна рефлексија представља збир огледалске, дифузне и запреминске рефлексије [2, 85].

За израчунавање енергије рефлектованог Сунчевог зрачења H_{ref} које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом β у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану погодан је користити апроксимативни израз (6.14):

$$H_{ref} = H_h \cdot F_2 \cdot \sin \beta, \quad (6.14)$$

где је:

- H_h - компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на јединичну хоризонталну површину на Земљи (W/m^2);
- β - угао нагиба пријемне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи (rad);
- F_2 - рефлективни коефицијент осветљености (-).

Својство подлоге да одбије зрачење се може изразити коефицијентом рефлексije или албедом. Алbedo представља однос јачине рефлектованог зрачења према укупном упадном зрачењу на посматрано тело. Потпуно бело тело има алbedo 1 јер потпуно одбија зрачење, а потпуно црно тело има алbedo нула.

Дифузно Сунчево зрачење настаје расејавањем Сунчевог зрачења на атомима и молекулама гасова и честицама нечистоћа у ваздушном омотачу Земље. Са повећањем облачности, концентрацијом водене паре и аеросоли у ваздуху, повећава се удео дифузног у глобалном Сунчевом зрачењу.

С обзиром на стохастичку природу дифузног Сунчевог зрачења, аналитички модел дифузног зрачења је веома компликован. Постоје различити модели функције расподеле дифузног Сунчевог зрачења.

За израчунавање енергије дифузног Сунчевог зрачења, H_{dif} које у јединици времена пада под неким углом на квадратни метар површине нагнуте под углом β , у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану у *EnergyPlus* окружењу, користимо апроксимативни израз (6.15):

$$H_{dif} = H_h \cdot (1 - F_1) \cdot (1 + \cos \beta) / 2, \quad (6.15)$$

где је:

- H_h - компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на јединичну хоризонталну површину на Земљи (W/m^2);
- β - угао нагиба пријемне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи (rad);
- F_1 - директни коефицијент осветљености (-).

Када Сунчево зрачење на свом путу доспе до молекула гасова и честица, оно их побуђује на осциловање и зрачење, чиме они постају извор електромагнетног зрачења одређене таласне дужине. На тај начин, примљена енергија предаје се неједнако у свим смеровима, у зависности од својстава гасова или честица. Енергија се више не шири у једном смеру, као пре уласка у атмосферу, већ на све стране. Утицај дифузије је двојак: с једне стране смањује јачину директног Сунчевог зрачења, а са друге стране узрокује

распршено зрачење неба. Један део Сунчевог зрачења се враћа у међупланетарни простор и он је изгубљен за процесе у атмосфери.

Побуђени молекули или честице не емитују електромагнетну енергију са истом спектралном расподелом енергије, већ мењају релативни удео појединих таласних дужина.

Дифузно Сунчево зрачење садржи више краткоталасну него дуготаласну енергију Сунчевог зрачења. При малим оптичким путевима зрачења, средином дана, дифузно зрачење садржи највише краткоталасно зрачење дајући небу плаву боју. Спуштањем Сунца, расејавање краткоталасног зрачења се повећава, оно све више слаби и његов релативни удео у укупном расејаном зрачењу се смањује [84, 85].

Директно Сунчево зрачење представља компоненту укупног (глобалног) Сунчевог зрачења које директно доспева на површину Земље.

За израчунавање енергије директног Сунчевог зрачења, H_{dir} које у јединици времена доспева под неким углом на квадратни метар површине нагнуте под углом β у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану, у *EnergyPlus* окружењу, погодно је користити апроксимативни израз (6.16):

$$H_{dir} = H_h \cdot F_1 \cdot \frac{a}{b}, \quad (6.16)$$

где је:

- H_h - компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на јединичну хоризонталну површину на Земљи (W/m^2);
- a - $\max(0, \cos \alpha)$;
- b - $\max(0.087, \cos Z)$;
- F_1 - директни коефицијент осветљености (-).

Соларно зрачење се израчунава укључујући ефекте засенчења и рефлексије од других површина (ако постоје) који су такође дефинисани у улазној датотеци.

Коефицијенти осветљености F_1 и F_2 су функције параметара који су одређени условима неба и дати су следећим релацијама:

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon) \cdot \Delta + F_{13}(\varepsilon) \cdot Z, \quad (6.17)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon) \cdot \Delta + F_{23}(\varepsilon) \cdot Z, \quad (6.18)$$

где је:

- F_{ij} - коефицијенти који су уграђени у датотеке *EnergyPlus*-а;
- ε - коефицијент прозирности неба (-) који се израчунава према обрасцу 6.20.

Величина Δ у горњим једначинама представља коефицијент осветљености неба:

$$\Delta = H_h \cdot m / I_0, \quad (6.19)$$

где је:

- H_0 - енергија екстратерестричног зрачења које у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине (соларна константа 1353 W/m^2 - средња годишња вредност);
- m - оптичка ваздушна константа, зависи од упадног угла соларног зрачења (-);
- Z - зенитни угао Сунца (rad).

Коефицијент прозирности неба се израчунава према обрасцу 6.20:

$$\varepsilon = \frac{(H + H_h)/H_h + \kappa \cdot Z^3}{1 + \kappa \cdot Z^3}, \quad (6.20)$$

где је:

- H - директно нормално соларно зрачење (W/m^2);
- $\kappa = 1.041$ за Z (rad);
- Z - зенитни угао Сунца (rad).

Енергију екстратерестричног зрачења такође можемо добити применом једначине 6.21 [85]:

$$C = 1160 + 75 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (n - 275)}{365} \right], \quad (6.21)$$

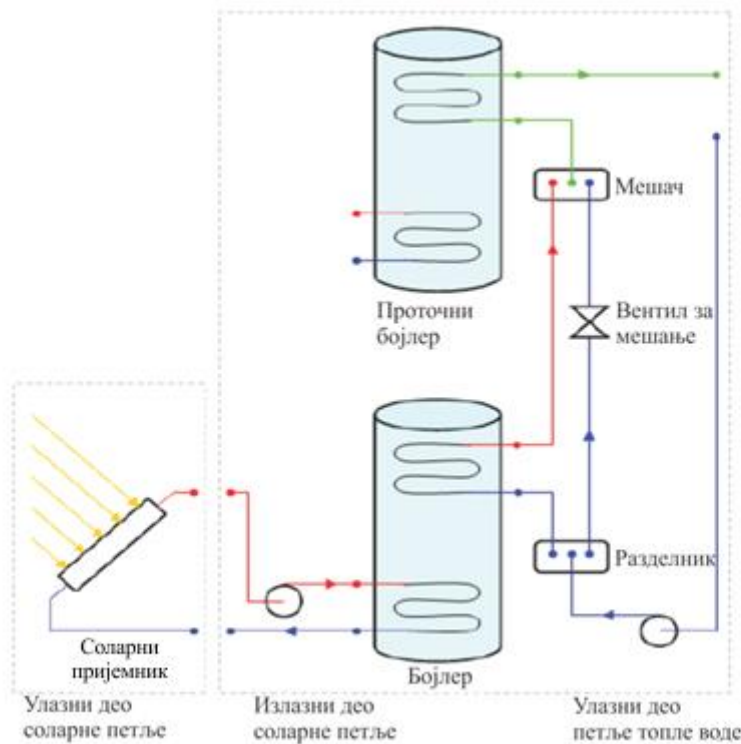
где је: n - редни број дана у години почевши од 1. јануара.

Удео компоненте директног соларног зрачења, у укупном соларном зрачењу, најчешће је далеко већи од удела дифузног зрачења.

6.2 Математички модел соларног система за грејање санитарне воде у *EnergyPlus* окружењу

Да би се оптимизовао рад соларног система за грејање санитарне воде са соларним колектором (СТВ), СТВ је анализиран уз помоћ симулације и оптимизације. Математички модел је развијен у *EnergyPlus* симулираном окружењу, а оптимизација је вршена у окружењу *GenOpt*. Оптимизација је извршена уз помоћ *Hooke Jeeves* алгоритма претраге. СТВ служи за загревање санитарне топле воде. Инсталација загрева воду помоћу соларне и електричне енергије. Санитарна топла вода се употребљава за ручно прање судова, туширање и за машине за прање веша и судова. У оквиру овог поглавља приказан је математички модел који се користио да би се симулирао ток енергије у СТВ и различитим деловима овог система, у равном плочастом соларном пријемнику, бојлеру, проточном бојлеру и вентилу за мешање загрејане воде са хладном водом и контролних уређаја система.

Модел соларног система за грејање санитарне воде састоји се од неколико различитих делова: равног плочастог соларног пријемника, бојлера, проточног бојлера и вентила за мешање загрејане воде са хладном водом и контролног уређаја система (слика 6.6 [89]). Ови елементи су смештени у две унутрашње петље соларног система за загревање санитарне воде: соларне петље и потрошачке петље.



Слика 6.6 - Шема соларног система за грејање санитарне воде

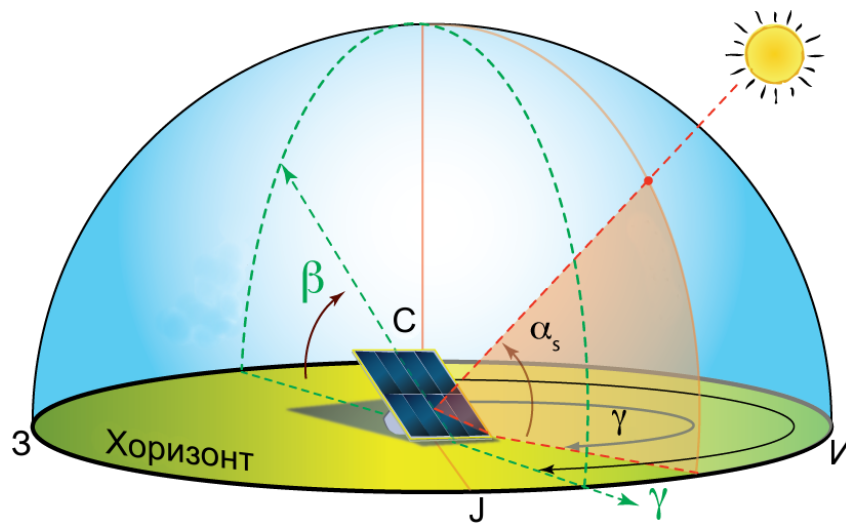
Соларна петља је круг који пролази кроз соларни пријемник. Потрошна петља је круг за потрошњу санитарне топле воде. Соларна петља се састоји од соларног пријемника, водене пумпе и спиралног размењивача топлоте (унутар бојлера за акумулацију топле воде). Потрошачка петља се састоји од разделника, акумулационог бојлера, проточног бојлера и вентила за мешање загрејане воде са хладном водом.

Унутар соларне петље, соларни пријемник апсорбује соларну енергију. Управо та енергија загрева воду која тече кроз соларни пријемник. Затим, топла вода загрева санитарну воду у акумулационом бојлеру. У потрошачкој петљи, хладна санитарна вода долази до разделника. Одатле санитарна вода може отићи у акумулациони бојлер или до вентила за мешање воде. У акумулационом бојлеру, санитарна вода се загрева кроз соларну петљу преко спиралног размењивача топлоте. Из акумулационог бојлера, санитарна вода се греје од соларног круга преко спиралног размењивача топлоте. Из акумулационог бојлера топла вода иде до грејача где се може додатно загрејати. Затим, топла вода која долази од грејача и хладна вода која долази од вентила се мешају и настаје санитарна топла вода која одлази до потрошача. Температура воде у акумулационом бојлеру може бити виша или нижа од потребне (задате). Ако је температура санитарне топле воде виша од потребне, она се снижава мешањем са хладном водом преко вентила. Ако је температура нижа од потребне, вода се загрева електричном енергијом у проточном бојлеру.

6.2.1 Соларни пријемник

6.2.1.1 Геометрија површине соларног пријемника

Прорачуни, поред већ унапред дефинисаног модела куће, захтевају да површина соларног пријемника буде геометријски описана. На слици 6.7 су приказани углови азимута ψ и угао нагиба β соларног пријемника, којим дефинишемо положај соларног пријемника у односу на Сунце.



Слика 6.7 - Орјентација соларни пријемник-Сунце

Када ови углови имају своје оптималне вредности добијене симулацијом инсталираног система у кући нето-нулте потрошње енергије и оптимизацијом соларног удела у функцији оптималних вредности углова, тада добијамо највећи износ топлотне енергије из соларне енергије. Постављањем соларног пријемника у оптимални положај постижемо и његову већу ефикасност.

У овом случају соларни пријемник се поставља на кров куће, правоугаоног облика показан на слици 6.8 [90]. Његова величина и облик су исти као и код крова, при чему је дужина пријемника означена са (a) и ширина са (b) . Висина куће је означена са h . Површина соларног пријемника је описана помоћу координата његових темена 1, 2, 3, и 4 у тродимензионалном Декартовом координатном систему. Овај десни координатни систем има осу X која је усмерена ка истоку, Y осу ка северу и осу Z нормалну на ове две осе, што је карактеристика Декартовог координатног система у *EnergyPlus* окружењу.

Теме 1 има координате: $x_1 = b \cos\beta \sin\gamma$, $y_1 = b \cos\beta \cos\gamma$, $z_1 = b \sin\beta + h_{12}$,

теме 2 има координате: $x_2 = 0$, $y_2 = 0$, $z_2 = h_{12}$,

теме 3 има координате: $x_3 = a \cos\gamma$, $y_3 = a \sin\gamma$, $z_3 = h_{12}$ и

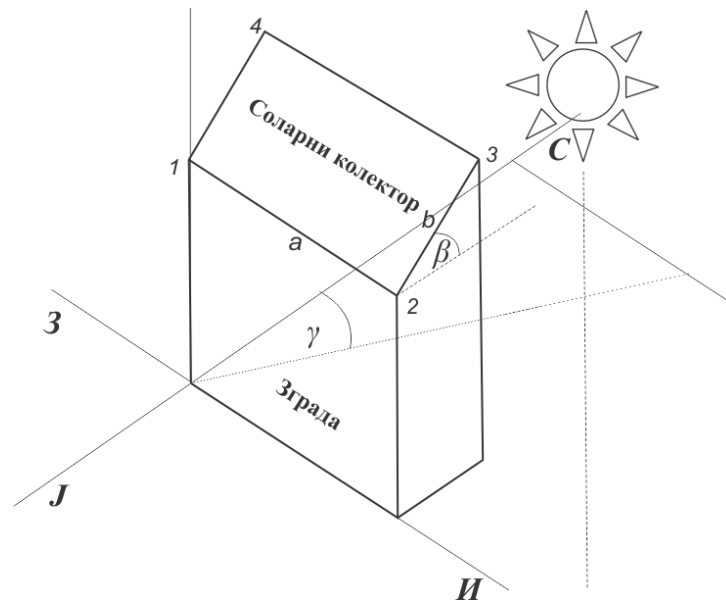
теме 4 има координате: $x_4 = b \cos\beta \sin\gamma + a \cos\gamma$, $y_4 = b \cos\beta \cos\gamma + a \sin\gamma$, $z_4 = h_{12} + b \sin\beta$.

Координате тачке 4 можемо дефинисати и преко положаја тачака у хоризонталној равни xOy соларног пријемника. Угао између позитивног смера $X_{осе}$ и пројекције дијагонале соларног пријемника на xOy раван је угао ω , а d дијагонала соларног пријемника. Изрази за ω и d дати су једначинама 6.22 и 6.23:

$$\omega = \gamma - \arctan\left(\frac{b}{a} \cos\beta\right), \quad (6.22)$$

$$d = \sqrt{a^2 + b^2 \cdot \cos^2\beta}. \quad (6.23)$$

Тада теме 4 има координате: $x_4 = d \cos\omega$, $y_4 = d \sin\omega$, $z_4 = h_{12} + b \sin\beta$.



Слика 6.8 - Модел куће са соларним пријемником на крову. Површина соларног пријемника 12341 поклапа се са површином крова зграда

Соларни пријемник је окренут ка југу. Његов угао нагиба, β је угао између осе Z и нормале на површину соларног пријемника (или између површине соларног пријемника и хоризонтале). Према договору који користимо је $-90^\circ < \beta < 90^\circ$, при чему, када је $\beta > 0$, соларни пријемник је окренут ка југу, а када $\beta < 0$ соларни пријемник је окренут ка северу. Угао азимута, γ се дефинише као угао померања између пројекције на хоризонталну раван и нормале на површину пријемника, у односу на правац севера. Ако је $\gamma > 0$ соларни пријемник је окренут ка истоку, а када је $\gamma < 0$, соларни пријемник је окренут ка западу. Према договору који користимо узима вредности од $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$.

6.2.1.2 Прорачун ефикасности соларног пријемника

Термичка ефикасност колектора се дефинише једначином (6.24) као однос корисног топлотног добитка радног флуида колектора и укупног сунчевог зрачења које пада на нагнуту површину колектора:

$$\eta = \frac{q}{A \cdot H_{solar}}, \quad (6.24)$$

где је:

- H_{solar} - укупно Сунчево зрачење које пада на нагнуту површину колектора, (W/m^2);
- q - користан топлотни добитак радног флуида, (W);
- A - површина соларног пријемника, (m^2).

Треба имати у виду да је ефикасност соларног колектора, η дефинисана једино у случају када је $H_{solar} > 0$.

Једначина енергетског биланса (6.25) равног застакљеног соларног колектора показује везу између особина стакла, апсорбционе плоче и услова спољашње средине:

$$\frac{q}{A} = H_{solar} \cdot \tau_{g1} \cdot \tau_{g2} \cdot \alpha_a - \frac{T_{abs}^4 - T_{g2}^4}{R_{rad}} - \frac{T_{abs} - T_{g2}}{R_{conv}} - \frac{T_{abs} - T_{air}}{R_{cond}}, \quad (6.25)$$

где је:

- τ_{g1} - пропустљивост првог слоја стакла (-);
- τ_{g2} - пропустљивост другог слоја стакла (-);
- α_a - коефицијент апсорпције апсорбционе плоче (-);
- R_{rad} - отпор преноса топлоте зрачењем од апсорбера до унутрашњег слоја стакла (Km^2/W);
- R_{conv} - отпор преносу топлоте конвекцијом од апсорбера до унутрашњег слоја стакла (Km^2/W);
- R_{cond} - отпор преносу топлоте кондукцијом апсорбера кроз изолацију до спољашње околине (Km^2/W);
- T_{abs} - температура апсорбционе плоче-апсорбера ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{g2} - температура унутрашњег слоја стакла ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{air} - температура спољашњег ваздуха ($^{\circ}\text{C}$).

Једначина (6.25) се може апроксимирати изразом (6.26):

$$\frac{q}{A} = F_R \cdot [I_{sol} \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_{in} - T_{air})], \quad (6.26)$$

где је:

- F_R - пропустљивост првог слоја стакла (-);
- $\tau \cdot \alpha$ - оптичка ефикасност соларног колектора (-);
- U_L - укупни топлотни губитак зрачењем, конвекцијом и кондукцијом ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
- T_{in} - температура унутрашњег радног флуида ($^{\circ}\text{C}$).

Имајући у виду једначине (6.24) и (6.26), добија се израз за ефикасност соларног колектора:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}}. \quad (6.27)$$

Линеарна корелација се може успоставити ако се $F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)$ и $F_R \cdot U_L$ сматрају константама соларног колектора:

$$\eta = c_0 + c_1 \cdot \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}}. \quad (6.28)$$

Слично, квадратна корелација се може поставити као:

$$\eta = c_0 + c_1 \cdot \frac{(T_{in} - T_{air})}{I_{sol}} + c_2 \cdot \frac{(T_{in} - T_{air})^2}{I_{sol}}. \quad (6.29)$$

Коефицијенти првог и другог реда у горњој једначини имају вредност $c_0 = 0.691 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, $c_1 = 3.396 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ и $c_2 = 0.00193 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^2$. Оба наведена коефицијента ефикасности соларног колектора првог и другог реда су дефинисани у [74].

6.2.1.3 Прорачун корекције упадног угла соларног зрачења

Као и код обичних прозора, прозачност стакла соларног пријемника зависи од упадног угла соларног зрачења. Обично је прозачност највећа када је соларно зрачење нормално на стаклену површину. Приликом тестирања коефицијенти ефикасности се одређују за углове соларног зрачења који су нормални на површину стакла. За углове

соларног зрачења који нису нормални на ту површину, прозачност стакла се модификује коефицијентима упадног угла једначином:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n}. \quad (6.30)$$

Додатни тестови одредили су корекцију упадног угла зрачења у функцији упадног угла θ . Одређене су корелације првог и другог реда. Линеарна корелација, првог реда дата је једначином (6.31):

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right), \quad (6.31)$$

а квадратна корелација, другог реда дата је једначином (6.32):

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2. \quad (6.32)$$

Коефицијенти добијени корекцијом упадног угла зрачења $b_0 = -0.1939$ и $b_1 = -0.0055$ су обично негативни и важе само за упадне углове који су мањи или једнаки 60° . Како ове криве нису валидне за упадне углове веће од 60° , *EnergyPlus* не узима у обзир соларне добитке на пријемницима за те углове. Ови коефицијенти су наведени у [74].

6.2.1.4 Прорачун излазне температуре радног флуида

Излазна температура радног флуида се рачуна преко корисних топлотних добитака q , улазне температуре радног флуида T_{in} и масеног протока који се добија као резултат симулације:

$$\frac{q}{A} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}), \quad (6.33)$$

где је:

- \dot{m} - масени проток (kg/s);
- c_p - специфична топлота радног флуида (J/kgK).

Решење за излазну температуру радног флуида је:

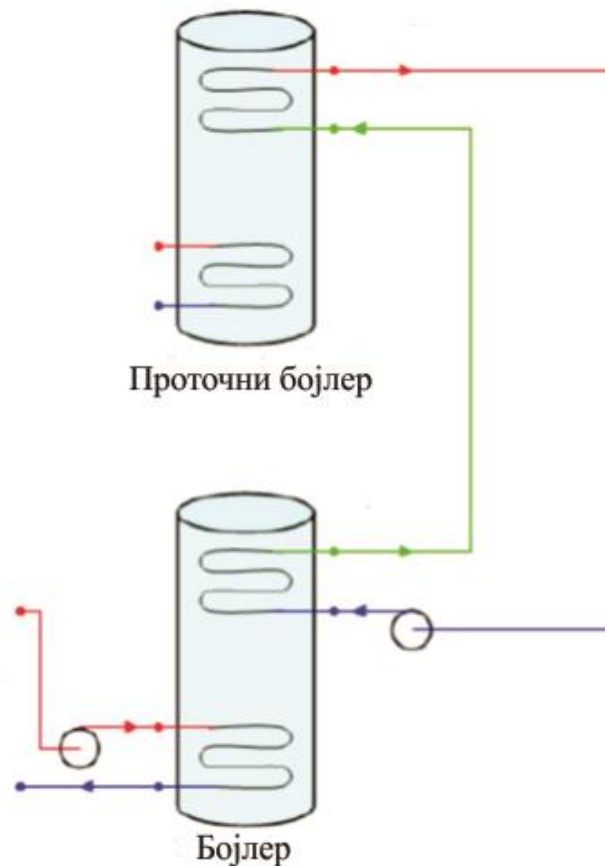
$$T_{out} = T_{in} + \frac{q}{\dot{m} \cdot c_p \cdot A}. \quad (6.34)$$

Ако не постоји проток радног флуида кроз колектор, излазна температура је температура радног флуида у стању мировања.

6.2.2 Модел централног бојлера

У циљу уштеде енергије у соларном систему за грејање санитарне воде најбоље је користити модел два бојлера. Бојлер за воду је уређај за акумулацију топлотне енергије у води. У бојлеру се директно из соларног пријемника загрева вода и шаље даље ка потрошачима. Проточни бојлер не акумулира топлотну енергију у води, већ је само загрева електричном енергијом ако вода у бојлеру не достиже задату температуру. Улазни објекат *Energy Plus*-а (*WaterHeater:Mixed*) представља модел који може симулирати топлотно понашање и бојлера и проточног бојлера. На слици 6.9 (адаптирана из [74]) је показана шема повезивања бојлера и проточног бојлера. Код бојлера топла вода је добро измешана. Једначине на којима се заснивају ови модели су дате у [74].

У соларном систему за грејање санитарне воде могуће је вршити загревање воде у бојлеру на температуре које су далеко веће од температура које желимо на крајњим потрошачима. Међутим, овакве апликације за грејање санитарне топле воде се избегавају из безбедносних разлога. На излазу из бојлера је могуће уз помоћ троструког вентила мешати прегрејану воду са хладном водом и на излазу добити жељене температуре на потрошачима.



Слика 6.9 - Шема повезивања бојлера и проточног бојлера

6.2.2.1 Енергетски биланс

Због доброг процеса мешања топле и хладне воде, температура воде у читавом бојлеру је уједначена. За израчунавање температуре воде у резервоару модел аналитички решава диференцијалну једначину енергетског биланса бојлера (6.35):

$$\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = q_{net}, \quad (6.35)$$

где је:

- ρ - густина воде (kg/m^3);
- V - запремина бојлера (m^3);
- c_p - специфична топлота воде (J/kgK);
- T - температура воде у бојлеру (K);
- t - време (s);
- q_{net} - нето пренешена количина топлоте на воду у резервоару (J/s).

Преко масе воде у резервоару, једначина енергетског биланса може да се прикаже једначином (6.36):

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = q_{net} \cdot \quad (6.36)$$

Нето пренешена количина топлоте представља суму топлотних добитака и топлотних губитака због вишеструког преноса топлоте:

$$q_{net} = q_{heater} + q_{oncy\text{c}par} + q_{offcy\text{c}par} + q_{oncy\text{c}loss} + q_{offcy\text{c}loss} + q_{use} + q_{source} \cdot \quad (6.37)$$

где је:

- q_{heater} - топлота додата грејачем или колектором (J/s);
- $q_{oncy\text{c}par}$ - топлота додата паразитским оптерећењем током рада (J/s);
- $q_{offcy\text{c}par}$ - топлота додата паразитским оптерећењем када систем не ради (J/s);
- $q_{oncy\text{c}loss}$ - пренос топлоте ка/од спољашње средине током рада система (J/s);
- $q_{offcy\text{c}loss}$ - пренос топлоте ка/од спољашње средине када систем не ради (J/s);
- q_{use} - пренос корисне топлоте ка/од петље (J/s);
- q_{source} - пренос корисне топлоте ка/од соларног колектора (J/s);

Топлоте $q_{oncy\text{c}loss}$ и $q_{offcy\text{c}loss}$ су дефинисане као:

$$q_{oncy\text{c}loss} = UA_{oncy\text{c}} \cdot (T_{amb} - T), \quad (6.38)$$

$$q_{offcy\text{c}loss} = UA_{offcy\text{c}} \cdot (T_{amb} - T), \quad (6.39)$$

где је:

- $UA_{oncy\text{c}}$ - коефицијент губитака када систем ради (0 када је искључен);
- $UA_{offcy\text{c}}$ - коефицијент губитака када систем не ради (0 када је укључен);
- T_{amb} - амбијентална температура.

Топлоте q_{use} и q_{source} су дефинисане у једначинама (6.40, 6.41):

$$q_{use} = \varepsilon_{use} \cdot \dot{m}_{use} \cdot c_p \cdot (T_{use} - T), \quad (6.40)$$

$$q_{source} = \varepsilon_{source} \cdot \dot{m}_{source} \cdot c_p \cdot (T_{source} - T), \quad (6.41)$$

где је:

- ε_{use} - ефективност размене топлоте током преноса у соларној петљи;
- \dot{m}_{use} - масени проток у соларној петљи;
- T_{use} - улазна температура флуида у бојлер;
- ε_{source} - ефективност размене топлоте током преноса од колектора;
- \dot{m}_{source} - масени проток од колектора до бојлера;
- T_{source} - излазна температура флуида из бојлера.

Увођењем ових једначина у једначину (6.37) добија се диференцијална једначина (6.42):

$$\frac{dT}{dt} = a + b \cdot T, \quad (6.42)$$

где су константе a и b дате изразима (6.43, 6.44):

$$a = \frac{1}{mc_p} \cdot (q_{heater} + q_{oncycpar} + q_{offcycpar} + UA_{oncyc} \cdot T_{amb} + UA_{offcyc} \cdot T_{amb}) + \frac{1}{mc_p} \cdot (\varepsilon_{use} \cdot \dot{m}_{use} \cdot c_p \cdot T_{use} + \varepsilon_{source} \cdot \dot{m}_{source} \cdot c_p \cdot T_{source}), \quad (6.43)$$

$$b = -\frac{1}{mc_p} \cdot (UA_{oncyc} + UA_{offcyc} + \varepsilon_{use} \cdot \dot{m}_{use} \cdot c_p + \varepsilon_{source} \cdot \dot{m}_{source} \cdot c_p). \quad (6.44)$$

Решење диференцијалне једначине (6.42) преко константи a и b гласи:

$$T(t) = \left(\frac{a}{b} + T_i \right) \cdot e^{bt} - \frac{a}{b}, \quad (6.45)$$

где је:

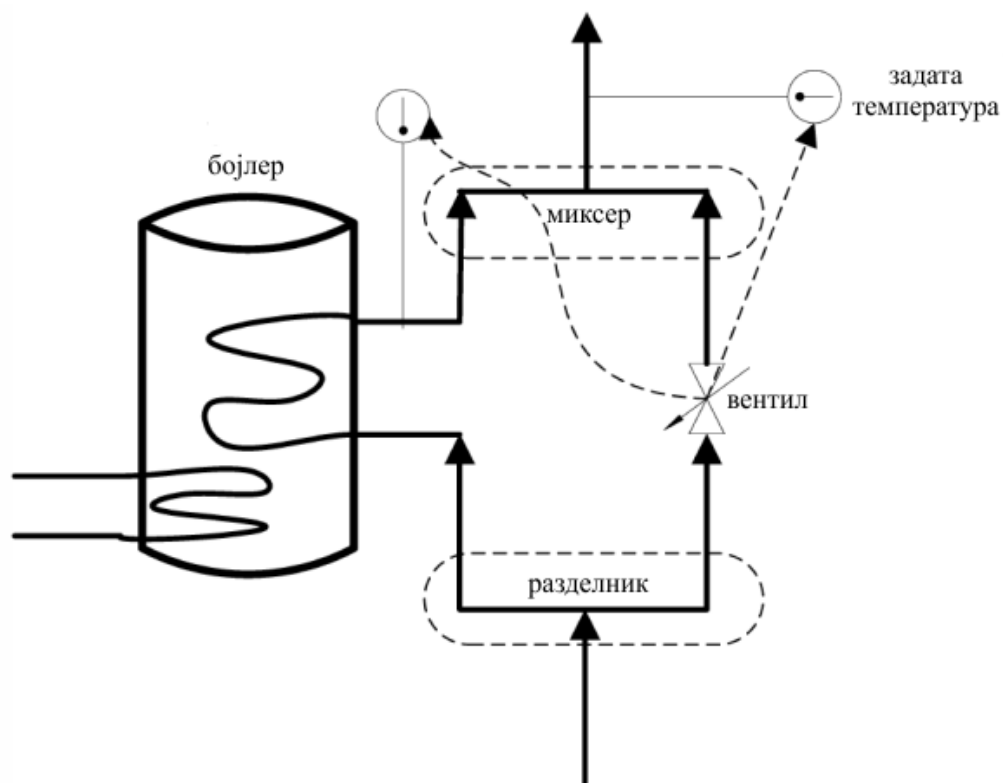
- $T(t)$ - температура воде у бојлеру у времену t ;
- T_i - почетна температура воде у бојлеру у тренутку $t = 0$.

6.2.3 Вентил за мешање загрејане са хладном водом

У појединим случајевима у инсталацијама СТВ, овај вентил се користи у специјалним ситуацијама када је потребно контролисати проток у циљу обезбеђивања ефикасног коришћења бојлера за топлу воду. У неким случајевима долази до прегрејавања воде у бојлеру и зато је потребно обезбедити безбедну употребу те топле воде. У реалним ситуацијама, потребно је вентилом за мешање мешати хладну воду из система са прегрејаном у резервоару да би добили жељену температуру на излазу. За многе инсталације где вода улази директно у разделник, из мреже, моделирањем овог објекта обезбеђујемо термодинамичку равнотежу.

Значи, вентил за мешање у датом моделу делује тако што шаље део топлог воденог тока кроз једну од својих грана да би прилагодио температуру воде на излазу из мешача.

На слици 6.10 је приказана шема вентила за мешање загрејане са хладном водом (адаптирана [74]). Вентил може преко заобилазне цеви да скрене ток око једне или више производних компоненти. То се може постићи на једној од две гране између миксера и разделника у циљу постизања жељене температуре на излазу из мешача. Ако је температура на грани која излази из бојлера већа од задате температуре, онда регулатором одређујемо колико ток треба да заобиђе резервоар топле воде да би постигли жељену радну тачку.



Слика 6.10 - Шема модела са вентилом за мешање загрејане са хладном водом

6.2.4 Контрола соларног система за грејање санитарне воде

Контрола соларног система је неопходна и могућа је на више начина у *EnergyPlus* окружењу. За контролу соларне петље користи се диференцијални термостат који пореди температуру воде у соларном колектору са температуром воде у централном бојлеру. Само када постоји топлотни добитак укључује се пумпа у рад, а уколико не постоји топлотни добитак пумпа се не укључује. У улазној датотеци *EnergyPlus* дефинише се разлика температура за укључивање (*Temperature Difference On Limit*) и искључивање пумпе (*Temperature Difference Off Limit*). Ове вредности износе 8-12 °C и 1-3 °C, респективно. Уколико је ова разлика мала или проток кроз соларни колектор велики систем брзо укључи и искључи пумпу без великог корисног топлотног добитка.

7. Карактеристике соларног система за грејање СТВ

У овом поглављу је описан систем за генерисање енергије соларног система за грејање санитарне воде. Приказане су основне карактеристике система, као и основне карактеристике соларног пријемника за генерисање енергије. Описани су временски распореди по којима се дефинише рад соларног систем. На крају поглавља дати су и метеоролошки услови локација где се анализира кућа са инсталираним системом за генерисање енергије налазила.

Као што је раније наведено, енергија код анализираних зграда се генерише преко соларних колектора који су постављени на крову куће. Површина соларног пријемника поклапа се са површином крова зграде. Соларни пријемник је окренут ка југу. Његову оптималну позицију одређује угао нагиба, β и угао азимута, γ . Највећи износ генерисане соларне енергије је одређен када је соларни пријемник оптимално позициониран. Веома је важно да постоји висок ниво ефикасности соларног пријемника приликом претварања соларне енергије у топлоту. У том случају добија се највећа количина избегнуте употребе примарне енергије (фосилне), избегнуте употребе електричне енергије, избегнуте ексергије и смањење емисије гасова.

7.1 Карактеристике соларног колектора

Објекат у *EnergyPlus-y*, *SolarCollectorPerformance - FlatPlate*, садржи термичке и оптичке карактеристике модела соларног пријемника. Ове карактеристике засноване су на методологији тестирања које су описане у *ASHARE* стандардима 93 и 96 [87], који се заснивају на једначинама које се налазе код *Duffie* и *Beckman* (1991) [2].

Прорачун осенчења је дефинисан углом нагиба колекторске површине и углом азимута, као и површином соларног пријемника. Улазни и излазни чворови су дефинисани од стране произвођача према захтевима потрошачке петље.

Коефицијенти који одређују ефикасност конверзије соларне у топлотну енергију и модификатори упадног угла, дати су једначинама првог реда (линеарне једначине) или другог реда (квадратне једначине) у поглављу 6.2.1.3. Да би се користила корелација првог реда, корелација другог реда мора да се постави на нулу. Само у том случају модел ће функционисати исправно.

Соларни пријемник коришћен у овом истраживању је раванског типа, двоструко застакљен, произведен од стране *Alternate Energy Technologies AE-32*, дужине 3.66 m и ширине 2.43 m. Укупна површина соларног пријемника је $A = 8.89 \text{ m}^2$. Флуид који је

коришћен у соларном пријемнику је вода, а максималан запремински проток је $0.00006 \text{ m}^3/\text{s}$. Коefицијент ефикасности једначина енергетске конверзије је 0.691 и он је бездимензионална величина. Коefицијенти ефикасности једначина енергетске конверзије првог и другог реда су 0.0193 и $3.396 \text{ W/m}^2\text{K}^2$. Коefицијенти корекције упадног угла зрачења су -0.1939 и -0.0055 [74].

7.2 Карактеристике бојлера и значајне температуре за контролу рада соларног система

У претходном поглављу је наведено да су основни делови система за грејање санитарне топле воде централни и проточни бојлер. Централни бојлер има запремину 0.75 m^3 , а помоћни проточни бојлер је запремине 0.00568 m^3 . Максимална дозвољена температура воде у оба бојлера је ограничена на $82.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимална пројектована разлика температура воде при врху и при дну централног бојлера износи $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значајне температуре воде у соларној петљи и петљи топле воде тачно су дефинисане за контролу рада соларног система и дате су у табели 7.1. Значајне температуре воде у соларној петљи за управљање радом инсталације су: температура воде у петљи, горња гранична температура при којој се искључује проток воде унутар соларне петље, горња гранична температура при којој се укључује проток воде у соларној петљи, температурска разлика при којој соларна петља ради (диференцијални термостат) и температурска разлика при којој соларна петља не ради (диференцијални термостат). Значајне температуре воде у петљи топле воде су: температура топле воде у бојлеру и максимална температура у бојлеру.

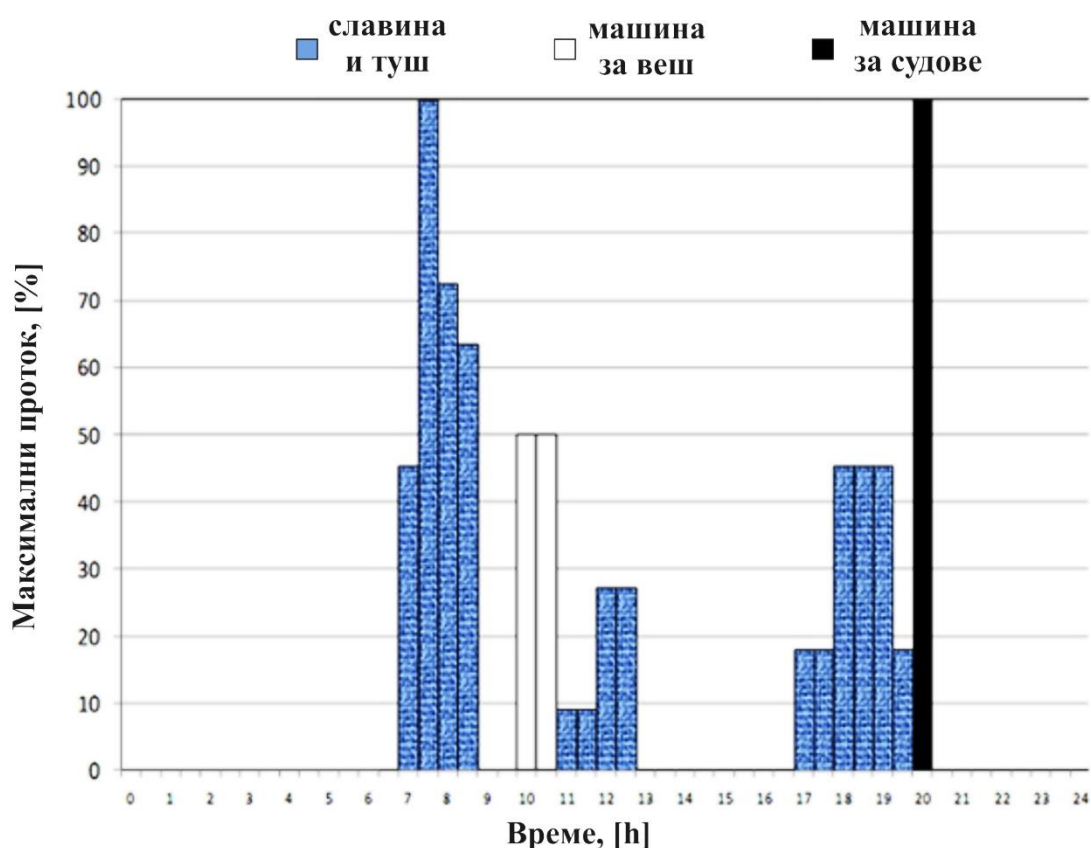
Табела 7.1 - Вредности температура за контролу рада соларног система за грејање СТВ

Петља	Температуре за контролу рада соларног система	Вредности	Јединица
Соларна	температура воде у петљи	60	$^\circ\text{C}$
Соларна	горња гранична температура при којој се искључује проток воде унутар соларне петље	60	$^\circ\text{C}$
Соларна	горња гранична температура при којој се укључује проток воде у соларној петљи	0	$^\circ\text{C}$
Соларна	температурска разлика при којој соларна петља ради (диференцијални термостат)	10	$^\circ\text{C}$
Соларна	температурска разлика при којој соларна петља не ради (диференцијални термостат)	2	$^\circ\text{C}$
Топле воде	температура топле воде у бојлеру	50	$^\circ\text{C}$
Потрошачка	максимална температура у бојлеру	82.2	$^\circ\text{C}$

Средња годишња температура хладне воде која се користи у кући износи $14.72 \text{ }^\circ\text{C}$.

7.3 Потрошња топле воде

Инсталација генерише четири различита типа топле воде: топлу воду за употребу на славинама, тушу, машини за судове и машини за веш. Слика 7.1 приказује карактеристике топле воде: температуре, максималне протоке и дневне распореде, који могу важити за четворочлану породицу у Србији. Што се тиче њене примене, вода се греје на две вредности температура: 43.3 °C (за употребу на славини и тушу са максималним протоком 0.0000945 m³/s) и 50 °C (за употребу на машини за судове и веш са максималним протоком 0.000063 m³/s). Дневни распоред је исти за сваки дан током читавог лета за воду са нижим температурама и за воду са вишим температурама коју користи машина за судове. Машина за прање веша ради само недељом. За воду са високом температуром коју користи машина за веш, дневни распоред је исти за сваку недељу током целог лета.



Слика 7.1 - Распореде коришћења соларног система за грејање санитарне топле воде (а) за употребу на славини и тушу; (б) за употребу на машини за судове и веш

7.4 Прорачун климатских карактеристика

Анализирани соларни систем грејања санитарне топле воде се налази у Београду, на Балканском полуострву у Републици Србији. Његова надморска висина је 117 m, географска ширина N 44.82°, и географска дужина E 20.27°.

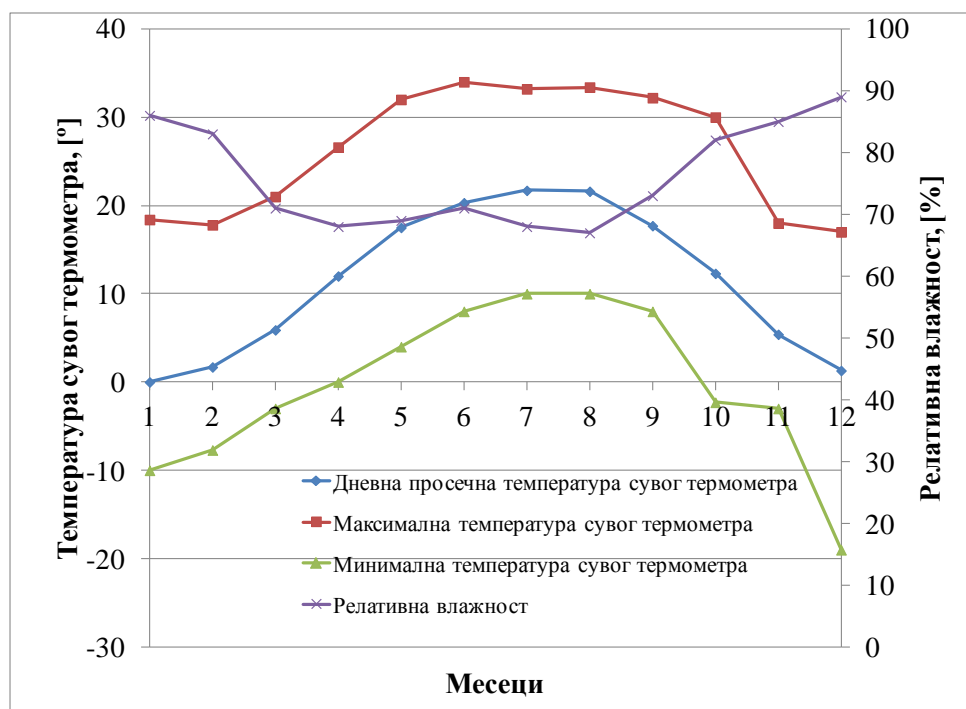
Такође, истраживања су рађена и за градове у Србији: Крагујевац, Нови Сад и Ниш. Основни подаци као што су надморска висина, географска ширина, географска дужина и извор метеоролошких података наведени су у табели 7.2 за ове градове.

Табела 7.2 - Надморска висина, географска ширина, географска дужина и извор метеоролошких података у неколико градова у Србији

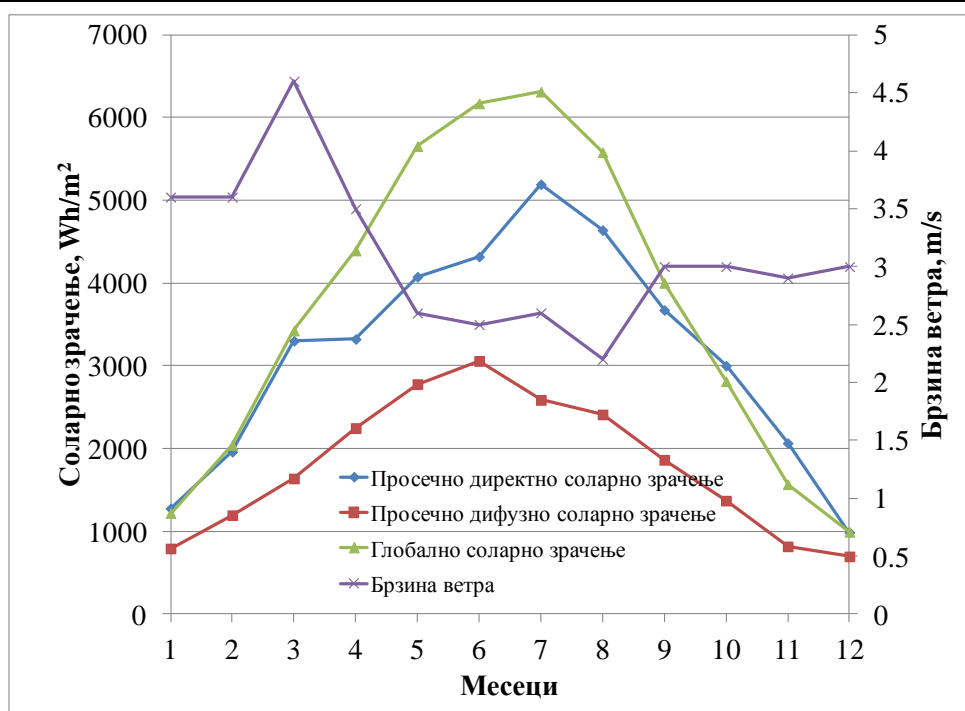
Локација	Надморска висина, [m]	Географска ширина (Ф), [°]	Географска дужина, [°]	Извор
Крагујевац	209	N 44.02	E 20.92	<i>Meteonorm</i> [88]
Нови Сад	84	N 45.32	E 19.85	<i>Meteonorm</i> [88]
Београд	99	N 44.82	E 20.27	<i>Meteorological St.</i> [87]
Ниш	202	N 43.32	E 21.88	<i>Meteorological St.</i> [87]

Метеоролошки подаци су измерени у метеоролошкој станици која је према Светској метеоролошкој организацији обележена бројем 132720. Метеоролошки подаци за Београд коришћени у овом раду су *ASHRAE International Weather data for Energy Calculatuons (IWEC)*. Коришћени су као временски подаци добијени софтвером *EnergyPlus*.

У циљу бољег упознавања климатских карактеристика у Београду на сликама 7.2 и 7.3 дат је статистички приказ временских података на месечном нивоу. Слика 7.2 приказује температуре (минималну, просечну и максималну) и релативну влажност ваздуха за сваки месец у години. Слика 7.3 приказује директно, дифузно зрачење Сунца, као и просечно Сунчево зрачење на глобалном нивоу и дневну просечну брзину ветра за сваки месец у години. На основу ових слика може се закључити да град има умерено-континенталну климу са постепеним прелазима у четири годишња доба (зима, пролеће, лето и јесен). Лета су топла и влажна са температурама и до 34 °С. Зиме су хладне и снежне, са температурама и до -19 °С. Соларни колектори се штите од смрзавања коришћењем адекватног воденог раствора гликола који служи као проводник топлоте унутар колектора.

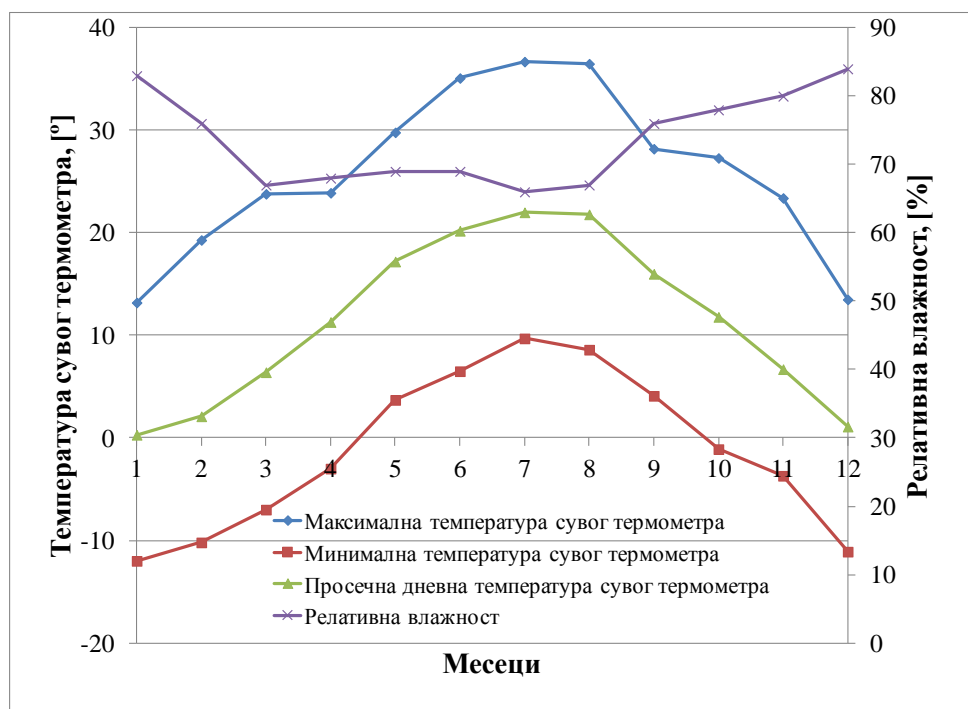


Слика 7.2 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Београд, Србија

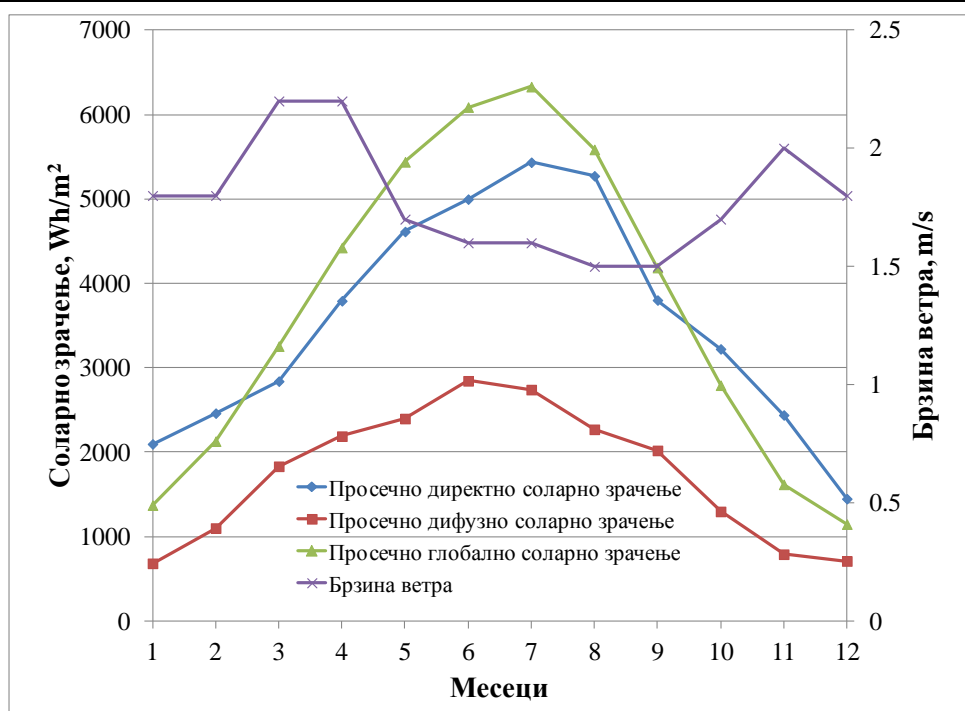


Слика 7.3 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Београд, Србија

У циљу бољег упознавања климатских карактеристика за град Крагујевац на сликама 7.4 и 7.5 дат је статистички приказ временских података на месечном нивоу. Слика 7.4 приказује температуре (минималну, просечну и максималну) и релативну влажност ваздуха за сваки месец у години. Слика 7.5 приказује директно, дифузно зрачење Сунца, као и просечно Сунчево зрачење на глобалном нивоу и дневну просечну брзину ветра за сваки месец у години.

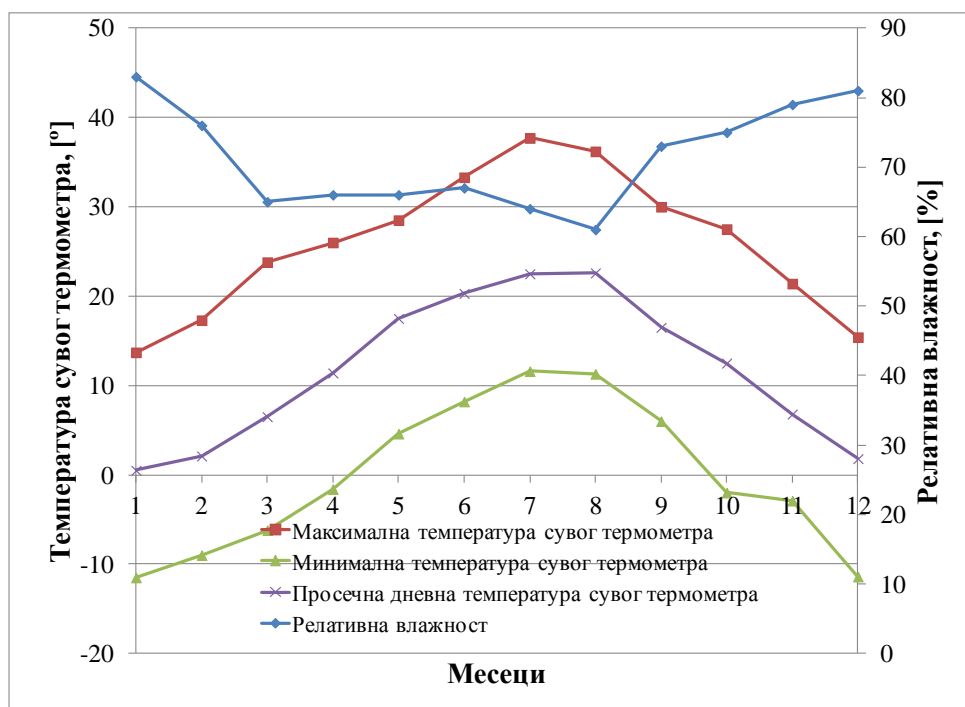


Слика 7.4 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Крагујевац, Србија



Слика 7.5 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Крагујевац, Србија

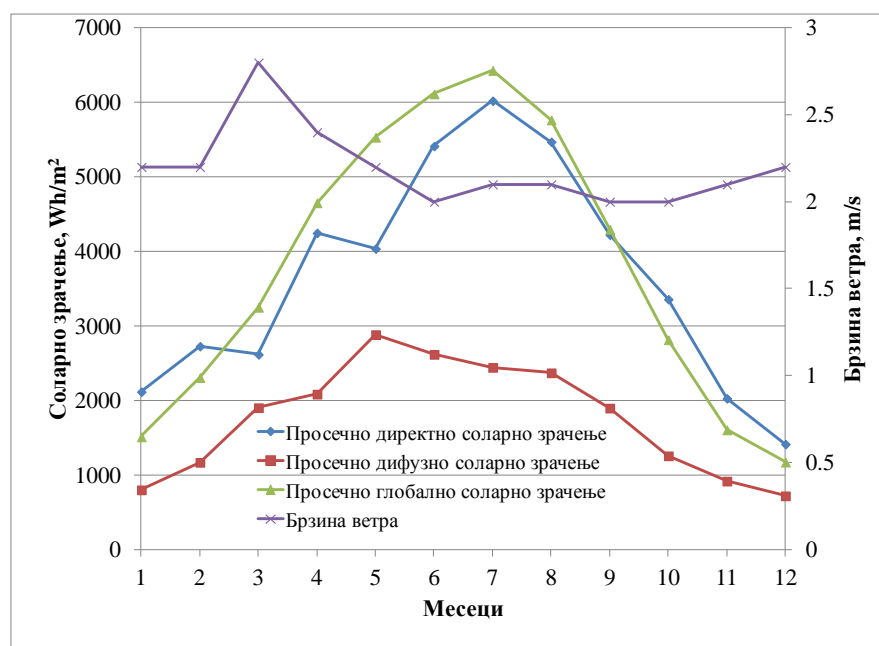
На основу ових слика може се закључити да град има умерено-континенталну климу са постепеним прелазима у четири годишња доба (зима, пролеће, лето и јесен). Лета су топла и влажна са температурама и до 37 °С. Зиме су хладне и снежне, са температурама и до -12 °С.



Слика 7.6 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Ниш, Србија

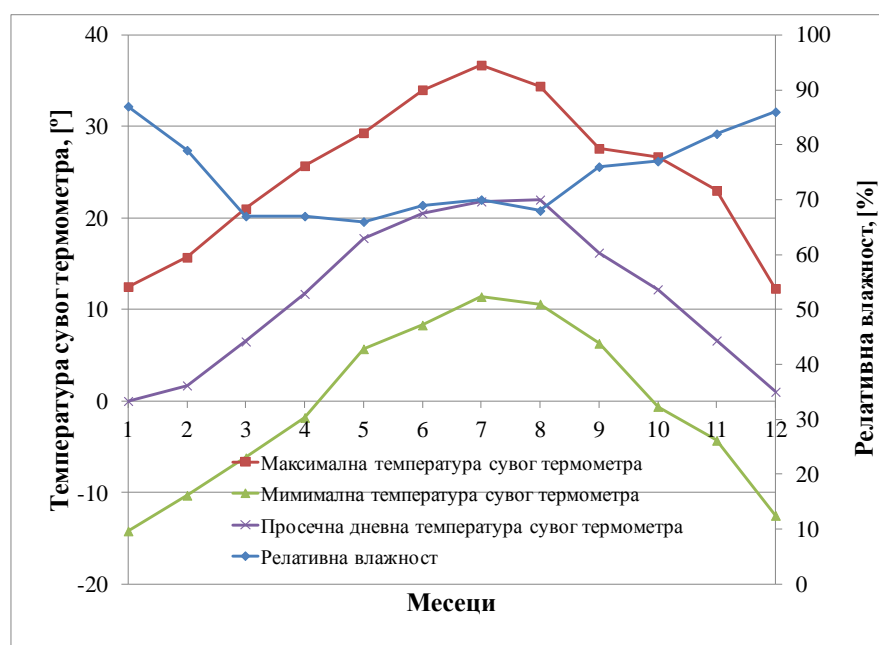
У циљу бољег упознавања климатских карактеристика у Нишу на сликама 7.6 и 7.7 дат је статистички приказ временских података на месечном нивоу. Слика 7.6 приказује

температуре (минималну, просечну и максималну) и релативну влажност ваздуха за сваки месец у години. Слика 7.7 приказује директно, дифузно зрачење Сунца, као и просечно Сунчево зрачење на глобалном нивоу и дневну просечну брзину ветра за сваки месец у години.



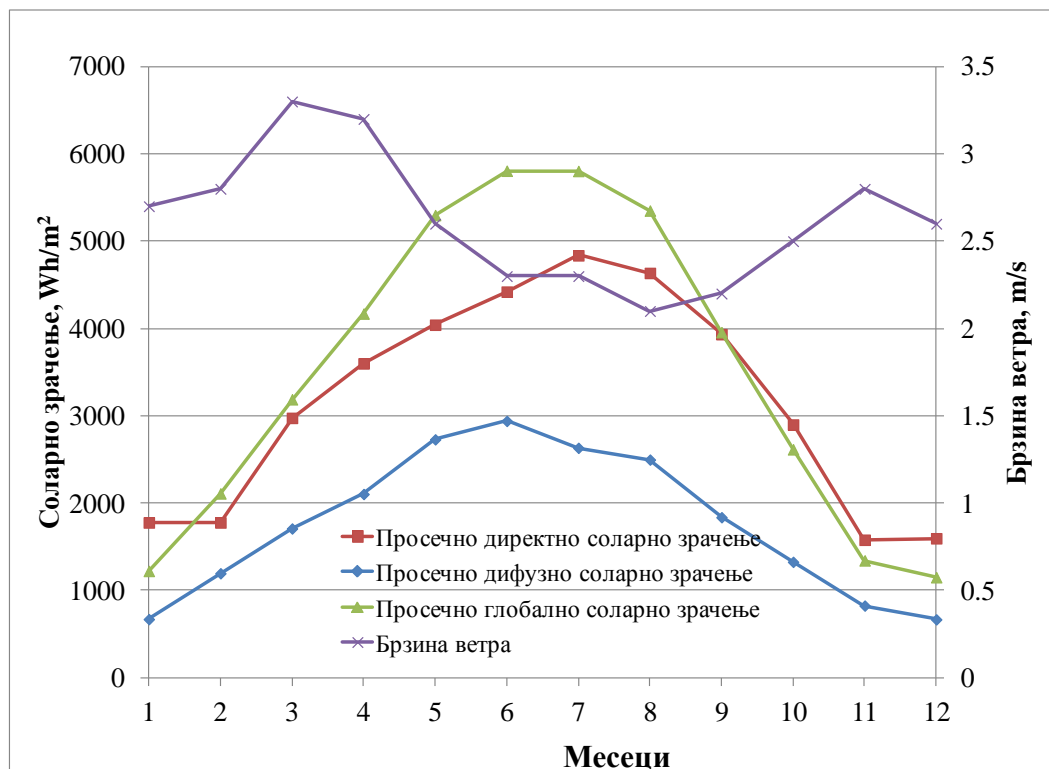
Слика 7.7 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Ниш, Србија

На основу ових слика може се закључити да град има умерено-континенталну климу са постепеним прелазима у четири годишња доба (зима, пролеће, лето и јесен). Лета су топла и влажна са температурама и до 38 °С. Зиме су хладне и снежне/снеговите, са температурама и до -12 °С.



Слика 7.8 - Релативна влажност, температуре сувог термометра (дневна просечна, минимална или максимална) за сваки месец у току године, за Нови Сад, Србија

У циљу бољег упознавања климатских карактеристика у Новом Саду на сликама 7.8 и 7.9 дат је статистички приказ временских података на месечном нивоу. Слика 7.8 приказује температуре (минималну, просечну и максималну) и релативну влажност ваздуха за сваки месец у години. Слика 7.9 приказује директно, дифузно зрачење Сунца, као и просечно Сунчево зрачење на глобалном нивоу и дневну просечну брзину ветра за сваки месец у години.



Слика 7.9 - Просечно директно, дифузно и глобално соларно зрачење и просечна дневна брзина ветра за сваки месец у току године, за Нови Сад, Србија

На основу ових слика може се закључити да град има умерено-континенталну климу са постепеним прелазима у четири годишња доба (зима, пролеће, лето и јесен). Лета су топла и влажна са температурама и до 38 °С. Зиме су хладне и снежне/снеговите, са температурама и до -15 °С.

Локација објекта која се анализира је од изузетног значаја за одређивање потрошње енергије. У *EnergyPlus*-у током симулације се користе временски фајлови добијени од овлашћених метеоролошких институција. Улазни објекат *EnergyPlus*-а - "*Site:Location*", укључује параметре који омогућавају *EnergyPlus*-у да израчуна положај Сунца (користећи географску ширину, географску дужину и временску зону) за било који дан у години, као и атмосферски притисак (користећи податак о надморској висини). Временски фајлови садрже значајне метеоролошке податке потребне за прорачун и дати су у даљем излагању (тј. температуру сувог термометра, температуру росе, релативну влажност, атмосферски притисак, директно нормално зрачење, дифузно хоризонтално зрачење, облачност, смер ветра, брзину ветра, итд.). Подаци су дати или за сваки сат, или за временске интервале мање од једног часа.

8. Поступак симулације и оптимизације соларног система за грејање СТВ

У анализи соларног система за грејање СТВ коришћен је софтвер *EnergyPlus*, који симулира рад система, и *Hooke Jeeves* алгоритам који се користи за оптимизацију рада система.

Рад соларног система за грејање СТВ се симулира за различите непрекидне симулације које могу трајати 1, 3, 6 и 12 месеци.

За време сваке непрекидне симулације, соларног система за грејање СТВ, бележи се вредност нагиба колектора β_i , као и вредност азимута γ_i . Овде "i" представља интервал трајања симулације. Ако симулација траје месец дана онда је $i = m$, за три месеца $i = q$, за шест месеци $i = h$ и за 12 месеци $i = a$.

8.1 Енергетска анализа

Софтвер *EnergyPlus* користи се за рачунање електричне енергије коју соларни систем за грејање СТВ потроши за време симулације. Добијени резултати су $E_{i,e}$ и $E_{i,tot}$. Променљива $E_{i,e}$ представља електричну енергију коју соларни систем за загревање СТВ потроши у случају да постоји соларни колектор.

Променљива $E_{i,e} = E_{i,hr} + E_{i,wp}$, је електрична енергија коју потроши електрични грејач да загреје СТВ ($E_{i,hr}$) и пумпа која воду покреће кроз соларну петљу ($E_{i,wp}$). Променљива $E_{i,tot}$ је електрична енергија коју потроши електрични грејач да загреје СТВ ако соларни колектор не постоји. Енергија $E_{i,s} = E_{i,tot} - E_{i,hr}$ представља топлоту добијену од соларне енергије која загрева СТВ уместо електричне енергије. Сходно томе, $E_{i,s}$ представља количину електричне енергије из електромереже која би била потрошена да соларни систем за загревање СТВ није прикупио соларну енергију. Ово је избегнута електрична енергија означена као $E_{i,ae} = E_{i,s}$. То значи да се електрична енергија може искористити за неке друге потребе захваљујући чињеници да је електричну енергију заменио извор соларне енергије.

Количина избегнуте употребе фосилних горива коју користи мрежа за дистрибуцију је такође сразмерна избегнутој електричној енергији што је представљено $E_{i,af} = C_f E_{i,ae}$, где је C_f фактор фосилне енергије.

Фактор фосилне енергије C_f . Овај фактор се процењује за производњу електричне енергије од стране Електропривреде Србије (ЕПС) - јединог произвођача електричне енергије у Србији. За производњу електричне енергије, ЕПС користи електране на фосилна

горива и хидроелектране [91]. Фосилна горива која се користе су угаљ из Колубаре, угаљ из Костолца и природни гас. C_f се процењује коришћењем једначине 8.1:

$$C_f = \frac{m_{c1} \cdot H_{d1} + m_{c2} \cdot H_{d2} + m_{c3} \cdot H_{d3}}{E_{t,f}}. \quad (8.1)$$

Овде, $m_{c1} = 27.4$ Мт означава искоришћену годишњу масу колубарског угља, $H_{d1} = 8.2$ кЈ/кг означава просечну доњу калоријску вредности за угаљ из Колубаре, $m_{c2} = 8.28$ Мт означава искоришћену годишњу масу угља из Костолца, $H_{d2} = 8.8$ кЈ/кг означава просечну доњу калоријску вредности за угаљ из Костолца, $m_{c3} = 0$ Мт означава масу годишње потрошеног природног гаса (његова потрошња је занемарљива у односу на потрошњу угља), H_{d3} означава просечну доњу калоријску вредност за природни гас, и $E_{t,f} = 97769$ ТЈ означава годишње потрошену електричну енергију од стране крајњих корисника. На крају, израчуната вредност $C_f = 3.04$ представља однос фосилне енергије по Ј, по крајњем потрошачу електричне енергије.

Еквивалент CO_2 за електричну мрежу. Током производње енергије из фосилних горива, ЕПС генерише емисије CO_2 . Еквивалент CO_2 за ЕПС електричну мрежу Србије се обрачунава коришћењем следећег израза (8.2):

$$C_c = \frac{P_{ff}}{E_{t,f}}, \quad (8.2)$$

где је $P_{ff} = 26266000$ т/години, наведена вредност за укупне емисије у 2007. години од стране ЕПС-а [92]. Затим, укупна електрична енергија потрошена на излазу из електране је $E_{t,pe} = 123.804$ ТЈ. Електрична енергија потрошена од стране крајњих потрошача је дата кроз следећи израз (8.3):

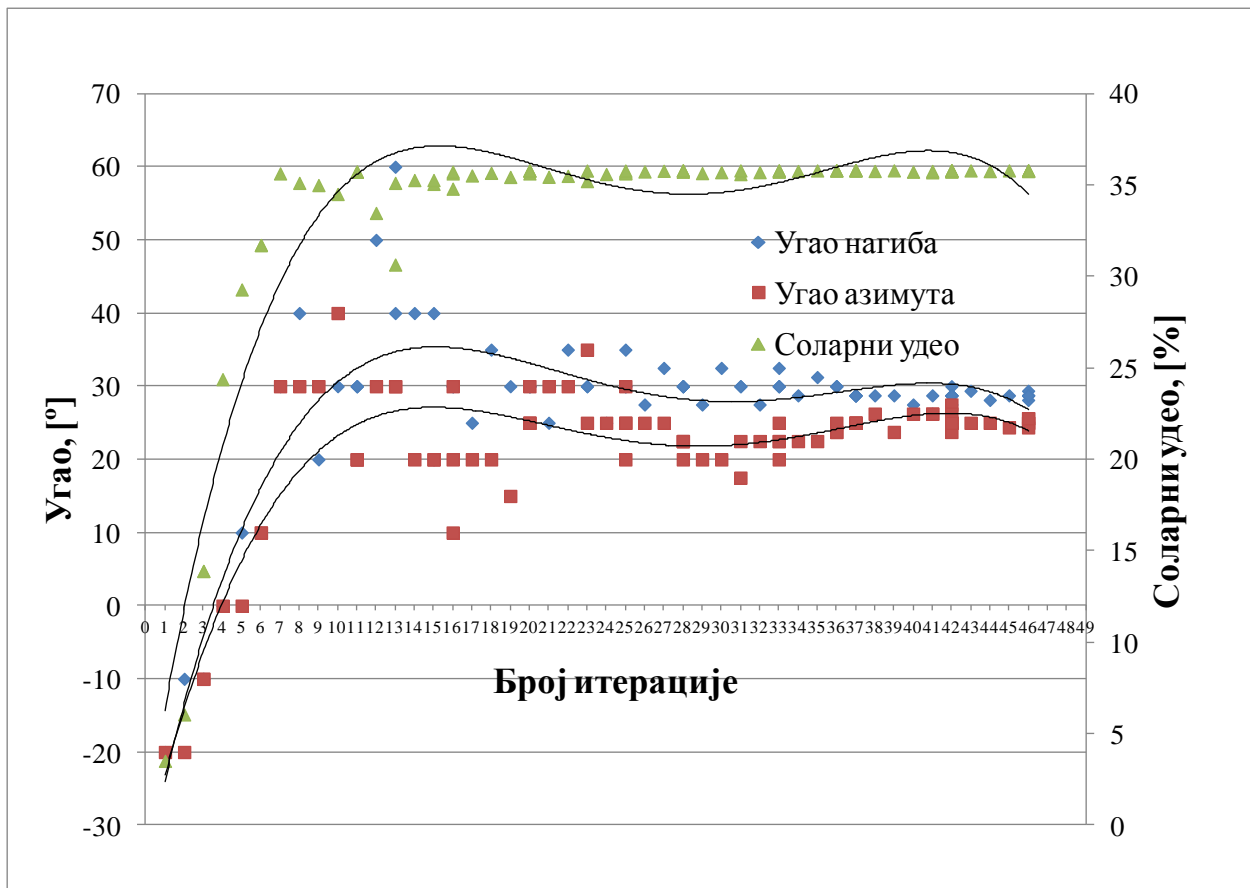
$$C_{t,f} = \frac{E_{t,pe}}{k_{pe,f}}, \quad (8.3)$$

где је $k_{pe,f} = 0.755$, процењен коефицијент губитка при испоруци електричне енергије за 2009. годину [91]. Израчуната вредност је: $E_{t,f} = 93472$ ТЈ и $C_c = 281$ кг/ГЈ од електричне енергије потрошене од стране крајњег потрошача.

Рад соларног система за грејање СТВ се оцењује тако што се израчуна соларни удео (f_i). Ово је објективна функција циља која се користи у алгоритму *Hooke Jeeves*, која треба да се максимизује, и дата је једначином (8.4):

$$f_i = \frac{100 \cdot (E_{i,tot} - E_{i,ae})}{E_{i,tot}} = f(\beta_i). \quad (8.4)$$

Ако је f_i већи, соларни систем за грејање СТВ има повољнији утицај на заштиту животне средине. Променљива f_i је функција угла нагиба β_i и угла азимута γ_i соларног пријемника. Потребно је максимизирати соларни удео у функцији оптималног положаја соларног пријемника (угла нагиба β_i и угла азимута γ_i). Као резултат оптимизације, добија се максимални соларни удео ($f_{i,max}$) и оптимални нагиб ($\beta_{i,opt}$), као и оптимални угао азимута ($\gamma_{i,opt}$). Слика 8.1 приказује како се вредности f_i и β_i и γ_i приближавају $f_{i,max}$ и $\beta_{i,opt}$, $\gamma_{i,opt}$ и број понављања.



Слика 8.1 - Историја f_i , β_i , γ_i и број понављања

Сваки соларни колектор који остане на вредности $\beta_{i,opt}$ и $\gamma_{i,opt}$ ствара највећу количину топлоте $(E_{i,s})_{max}$ од прикупљене соларне енергије. Затим, соларни систем за грејање СТВ користи ту топлоту уместо електричне енергије из електро мреже да загреје СТВ. То значи да соларни систем за грејање СТВ избегава употребу највеће количине електричне енергије из дистрибутивне мреже. Додатно, овим се избегава и производња највеће количине електричне енергије у државним електранама.

Ако из неког разлога соларни колектор не остане на оптималном нагибу или оптималном углу азимута, у том случају ће произвести мању количину топлоте за загревање СТВ од максималне количине коју производи када је на оптималном нагибу и оптималном азимуту.

Будући да се за загревање СТВ користи електрична енергија, соларни колектор ће користити више електричне енергије за загревање СТВ него у случају када је на оптималном нагибу и оптималном углу азимута. То значи да ће соларни колектор изгубити електричну енергију. У овом случају дефицит соларних фракција је дефинисан следећом једначином (8.5):

$$D_i = \frac{100 \cdot (f_{i,tot} - f_{i,max})}{f_{i,max}} \quad (8.5)$$

8.2 Ексергетска анализа

Соларни систем за грејање санитарне воде је најпопуларнији вид искоришћења соларне енергије због техничке изводљивости и економичности у поређењу са другим видовима искоришћења соларне енергије. Кроз ексергетску анализу одређена је максимална вредност ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање СТВ. Максимални ексергетски степен ефикасности се аналогно максималном соларном уделу постиже када је соларни пријемник оптимално позициониран.

Ексергетски степен ефикасности, η_x је функција циља у процесу оптимизације, и дат је једначином (8.6) [92, 93, 94]:

$$\eta_x = \frac{E_{x,nom}}{E_{x,C}}, \quad (8.6)$$

где је:

- $E_{x,nom}$ - ексергија добијена од потрошача (славина, туш, маш. за судове и веш) [J];
- $E_{x,C}$ - ексергија Сунца [J].

Ексергија Сунца је рачуната на основу вредности средње годишње инсолације за Београд $I = 5.22 \text{ J/m}^2$, а за шестомесечне прорачуне, за период од 15. априла до 14. октобра узима вредност $I = 1.328 \text{ J/m}^2$, и период од 15. октобра до 14. априла узима вредност $I = 3.724 \text{ J/m}^2$, прорачунате на основу средњих дневних инсолација по месецима [34].

Ексергије крајњих потрошача односе се на туш $E_{x,туш}$, судоперу $E_{x,судопера}$, веш-машину $E_{x,маш.веш}$ и судо-машину $E_{x,маш.суд}$. Због ниже температуре воде потребне за туш и судоперу неопходно је мешање са хладном водом, па је у ексергетској оптимизацији узета у обзир ексергија хладне воде која се додаје систему $E_{x,хл.вода}$. Ексергија хладне воде је рачуната за вредности средње годишње температуре хладне воде које се користи у кући и она износи $14.72 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурске разлике су мање у шестомесечним прорачунима за период од 15. октобра до 14. априла, а веће за период 15. априла до 14. октобра.

Ексергија која се добија преко соларног колектора у систему за грејање санитарне воде $E_{x,nom} = E_{x,потрошача}$ једнака је збиру ексергија крајњих потрошача:

$$E_{x,nom} = E_{x,туш} + E_{x,судопера} + E_{x,маш.суд} + E_{x,маш.веш} \quad (8.7)$$

Ексергетска ефикасност соларног пријемника представља однос ексергије соларног колектора $E_{x,сол.кол}$ и ексергије Сунца, дата је једначином (8.8):

$$\eta_{сол.кол} = \frac{E_{x,сол.кол}}{E_{x,C}} \quad (8.8)$$

Ексергија соларног колектора $E_{x,сол.кол}$ дата је једначином (8.9):

$$E_{x,сол.кол} = C_p \cdot \dot{m} \cdot \left[(T_{кол} - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T_{кол}}{T_0} \right], \quad (8.9)$$

где је: $T_{кол} = 323 \text{ [K]}$ (дефинисана у улазној датотеци *EnergyPlus-a*), \dot{m} - масени проток соларног пријемника [kg/s], T_0 - температура околине [K], $C_p = 4186 \text{ [J/kgK]}$.

Ексергија на излазу из акумулационог бојлера може се представити помоћу једначине (8.10) [93], под претпоставком да је вредност температуре у бојлеру линеарна.

$$E_{x,\delta} = C_p \cdot \dot{m} \cdot \left(\frac{T_{улаз} - T_{излаз}}{2} - T_0 \right) - C_p \cdot \dot{m} \cdot T_0 \left(\ln \frac{T_{излаз}}{T_0} - 1 \right) - \frac{T_{излаз} \cdot C_p \cdot \dot{m} \cdot T_0}{T_{улаз} - T_{излаз}} \cdot \ln \frac{T_{улаз}}{T_{излаз}} \quad (8.10)$$

где је: $E_{x,\delta}$ - ексергија на излазу из акумулационог бојлера [J], $T_{улаз}$ - температура на улазу у акумулациони бојлер [K], $T_{излаз}$ - температура на излазу из акумулационог бојлера [K].

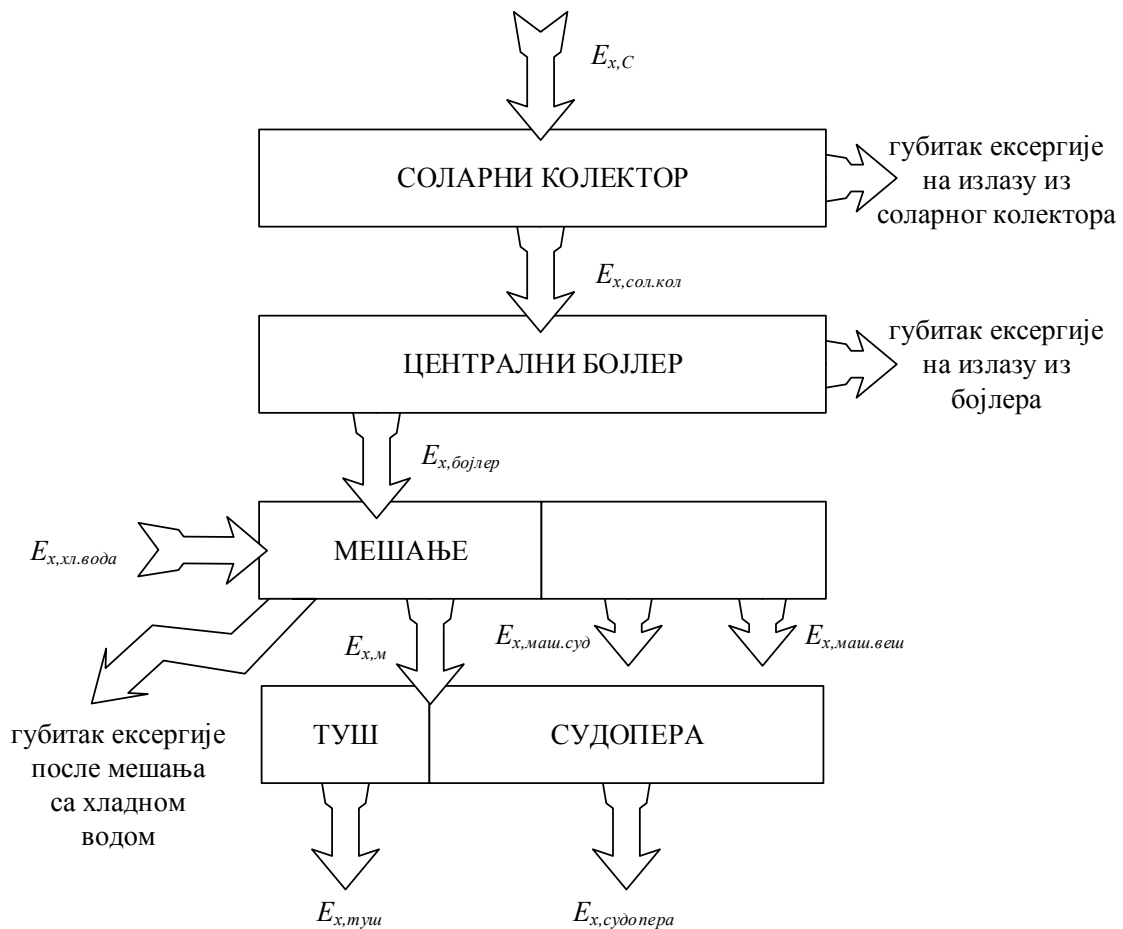
Ексергија бојлера $E_{x,бојлер}$ представља збир ексергије на излазу из бојлера и електричне енергије, где је електрична енергија E_e која служи за догрејавање воде у бојлеру када температура падне испод задате.

$$E_{x,бојле} = E_{x,\delta} + E_e \quad (8.11)$$

Дефинисан је и однос потребне и добијене ексергије e_x , соларних система:

$$e_x = \frac{e_{x,потребна}}{e_{x,добијена}} \quad (8.12)$$

Односи потребне и добијене ексергије на потрошачима $e_{x,потребна}$ и $e_{x,добијена} = E_{x,пот} = E_{x,потрошача}$, треба да буде што мањи, јер је у том случају добијена ексергија већа.



Слика 8.2 - Ексергетско билансирање соларног система за грејање СТВ

Дијаграм ексергетских токова у систему за грејање санитарне воде дат је на слици 8.2, где су као излазне величине дате ексергије које се добијају на потрошачима и односе се на туш $E_{x,туш}$, судоперу $E_{x,судопера}$, веш-машину $E_{x,маш.веш}$ и судо-машину $E_{x,маш.суд}$.

Ако из неког разлога соларни колектор не остане на оптималној позицији вредности добијене ексергије, $E_{x,i}$ у том случају је вредност ексергије мања од максималне количине ексергије коју добијамо када је соларни колектор оптимално позициониран, $E_{x,max}$. То значи да ће соларни колектор изгубити ексергију. У овом случају дефицит избегнуте ексергије је дефинисан следећом једначином (8.12):

$$DE_{xi} = \frac{100 \cdot (E_{x,i} - E_{i,max})}{E_{i,max}}. \quad (8.13)$$

9. Резултати и анализа

Соларне пријемнике могуће је поставити у један оптимални стационарни положај. Међутим, доказано је да тај положај није оптималан током читаве године. Због тога се, ради добијања веће количине енергије из соларне енергије, соларни пријемници могу поставити у неколико различитих положаја током године. Најчешће се положај соларних пријемника мења 2, 4 или 12 пута годишње. Потребно је било урадити одговарајуће симулационе и оптимизационе рутине које ће подржати овакву примену соларних пријемника. Ти алгоритми су омогућили одређивање положаја соларног пријемника у простору (азимута и нагиба), као и оптималног времена почетка и краја коришћења одређеног просторног положаја, и то све у зависности од особина соларних пријемника, особине њихових инсталација, као и метеоролошких услова места где је постављена та соларна инсталација и кућа са нето-нултом енергетском потрошњом.

Истраживање укључује четири различита соларна система за загревање санитарне воде (СТВ) у неколико градова Србије. Анализирани соларни системи су СК#1 (са фиксираним соларним пријемником), СК#2 (са соларним пријемником који годишње промени два положаја), СК#4 (са соларним пријемником који годишње промени 4 положаја) и СК#12 (са соларним пријемником који годишње промени 12 положаја). Соларни пријемници ових система су постављени на крововима кућа у правцу север-југ. За различите соларне системе, у току истраживања дошло се до оптималних положаја соларних пријемника на годишњем, полугодишњем, тромесечном и месечном нивоу. Оптималним позиционирањем пријемника соларне енергије одређене су максималне вредности соларног удела. Оптимални углови доприносе избегнутој употреби електричне енергије, избегнутој ексергији, избегнутој употреби фосилне енергије, и избегнутој емисији CO_2 које се добију употребом соларних система за загревање санитарне воде.

Енергетска и ексергетска оптимизација соларног система за загревање СТВ је урађена за:

- случај оптимизације соларног удела f_i у функцији угла нагиба β_i соларног пријемника, $f_i(\beta_i)$;
- случај оптимизације соларног удела f_i у функцији угла нагиба β_i и угла азимута γ_i соларног пријемника, $f_i(\beta_i, \gamma_i)$;
- случај оптимизације соларног удела f_i у функцији угла нагиба β_i и угла азимута γ_i соларног пријемника када је $\beta_i = \beta_{a,opt}$, $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$;
- случај оптимизације соларног удела f_i у функцији угла нагиба β_i и угла азимута γ_i соларног пријемника када је $\beta_i = \beta_{q,opt}$, $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, \gamma_i)$.

Да би се ефикасно користио систем за СТВ, неопходно је да он буде оптимално пројектован, инсталиран и да се на одговарајући начин употребљава. Кроз широк спектар истраживања у овој докторској дисертацији, приказано је како се СТВ може оптимално инсталирати и како његов дизајн, инсталација и режим рада утичу на соларни удео када се СТВ користи у Србији. Истраживани су соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12.

Римски бројеви у раду представљају месеце у години по принципу I (јануар), II (фебруар), III (март), IV (април), V (мај), VI (јун), VII (јул), VIII (август), IX (септембар), X (октобар), XI (новембар) и XII (децембар).

9.1 Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i)$

Истраживања показују четири различита соларна система за загревање санитарне топле воде са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12. Њихови соларни пријемници су окренути у правцу север-југ.

Ови системи се разликују у дизајну својих носача који им омогућавају да имају различите вредности нагиба соларних колектора β_i у току године. СК#1 је систем који има стационарни соларни пријемник и његов нагиб је $\beta_{a,opt}$. СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи два нагиба $\beta_{h,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#4 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи четири нагиба $\beta_{q,opt}$ годишње - по један на три месеца. СК#12 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи 12 нагиба $\beta_{m,opt}$ годишње - по један за сваки месец.

Овом приликом је за сваки соларни систем за грејање санитарне топле воде израчунат соларни удео у функцији угла нагиба користећи се одговарајућим симулационим и оптимизационим рутинама са модификованом методологијом *Hooke Jeeves* алгоритма.

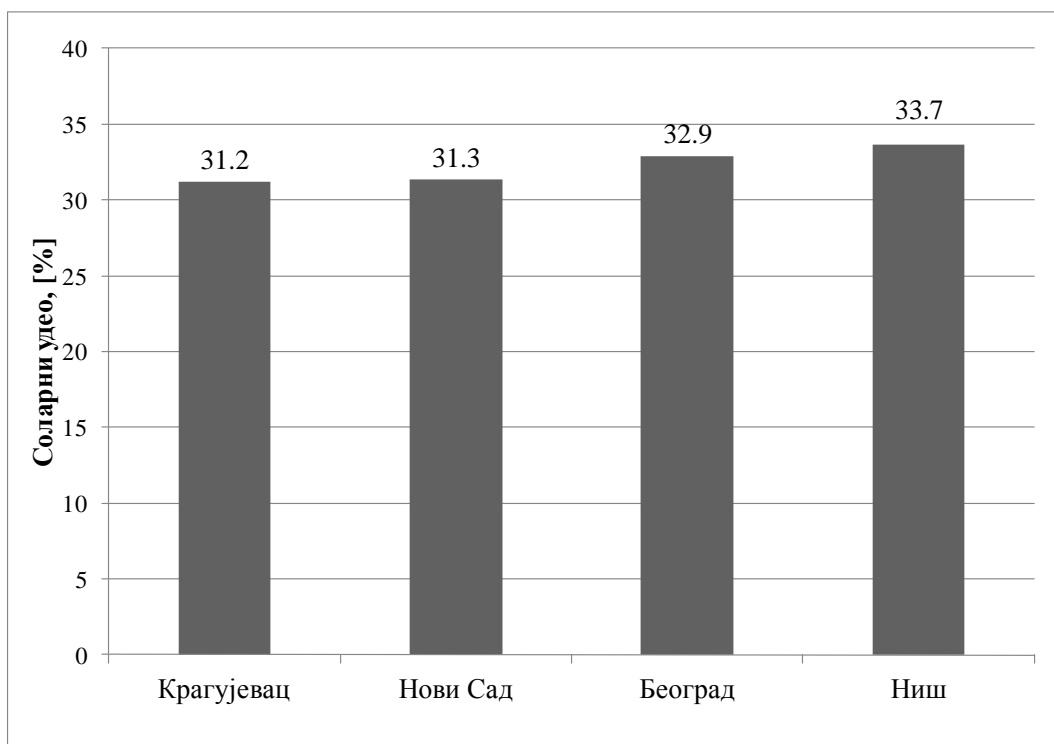
9.1.1 Соларни систем за загревање СТВ са СК#1

Као прво, истраживан је соларни систем за загревање СТВ са СК#1 који има стационарни соларни пријемник и који годишње функционише на једном нагибу. У табели 9.1 приказане су вредности $\beta_{a,opt}$ и одговарајућег $f_{a,max}$ за четири града у Србији: Крагујевац, Нови Сад, Београд и Ниш. Соларни пријемник постављен на $\beta_{a,opt}$ би годишње генерисао максималну количину топлоте и имао би $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ. $\beta_{a,opt}$ је забележен у распону од 36.88° до 38.75° . $\beta_{a,opt} - \Phi$ је од 6.44 до 8.32° . $\beta_{a,opt}$ од 36.88° је забележен у Нишу, док $\beta_{a,opt}$ од 38.75° је забележен за Нови Сад. Вредности за $f_{a,max}$ максимално су у распону од 31.2% до 33.7% . Највећа вредност $f_{a,max}$ од 33.7% је забележена за Ниш. Вредност $f_{a,max}$ за Београд је за 0.8% нижа него за Ниш. Вредност $f_{a,max}$ за Нови Сад је мања него за Београд и до 1.6% . Вредност $f_{a,max}$ за Крагујевац је готово иста као за Нови Сад.

Табела 9.1 - $\beta_{a,opt}$ и $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији

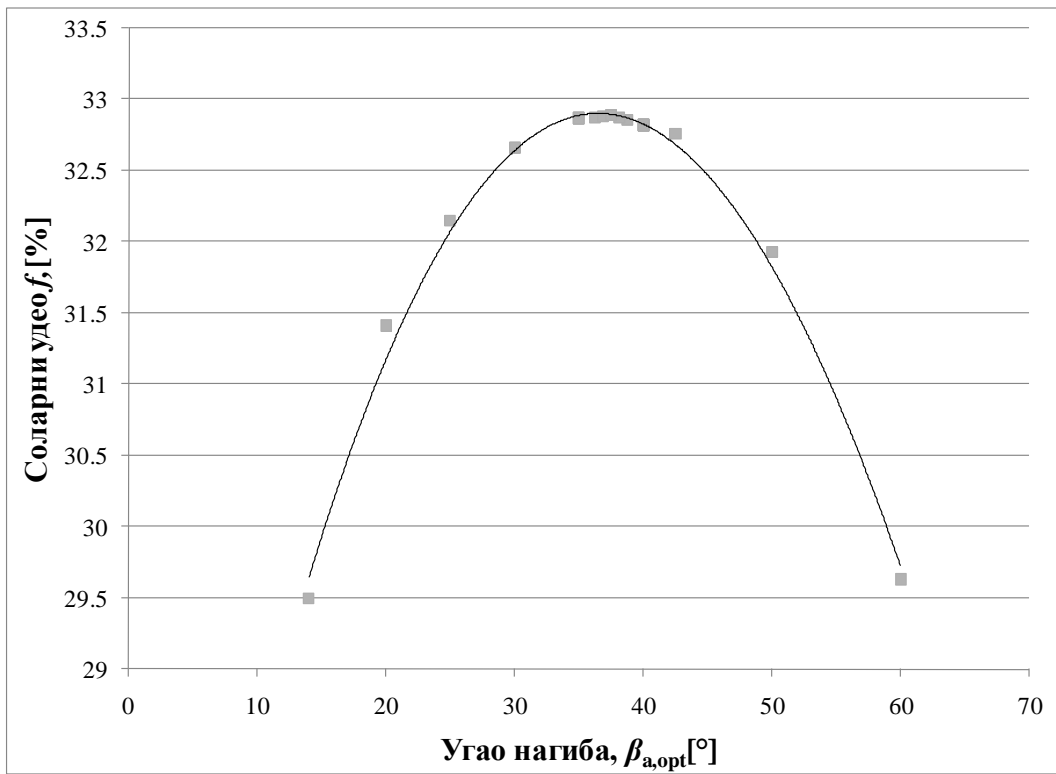
Локација	$\beta_{a,opt}$, [°]	$\beta_{a,opt}$, [°]	$f_{a,max}$, [%]
Крагујевац	38.12	Ф – 5.89	31.2
Нови Сад	38.75	Ф – 6.57	31.3
Београд	37.50	Ф – 8.32	32.9
Ниш	36.88	Ф – 6.44	33.7

На слици 9.1 су дате оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији. Надаље су истраживања урађена за метеоролошке услове Београда, а резултати истраживања оптималног позиционирања соларних пријемника за остале градове у Србији су дати у глави 9.6.

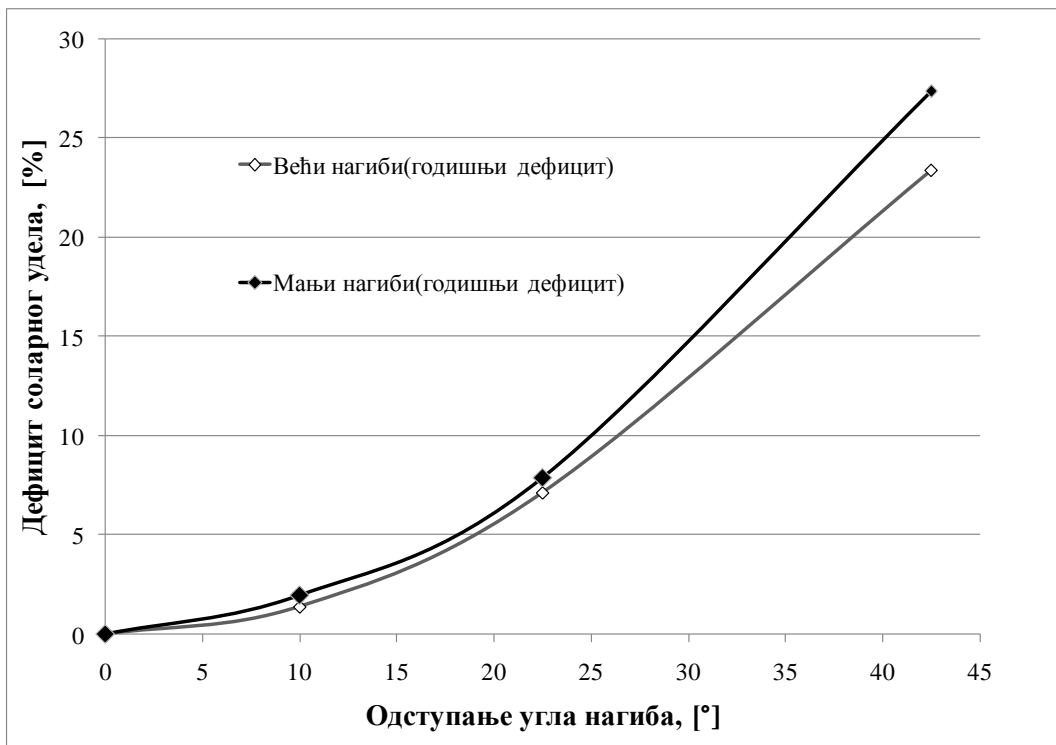


Слика 9.1 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији

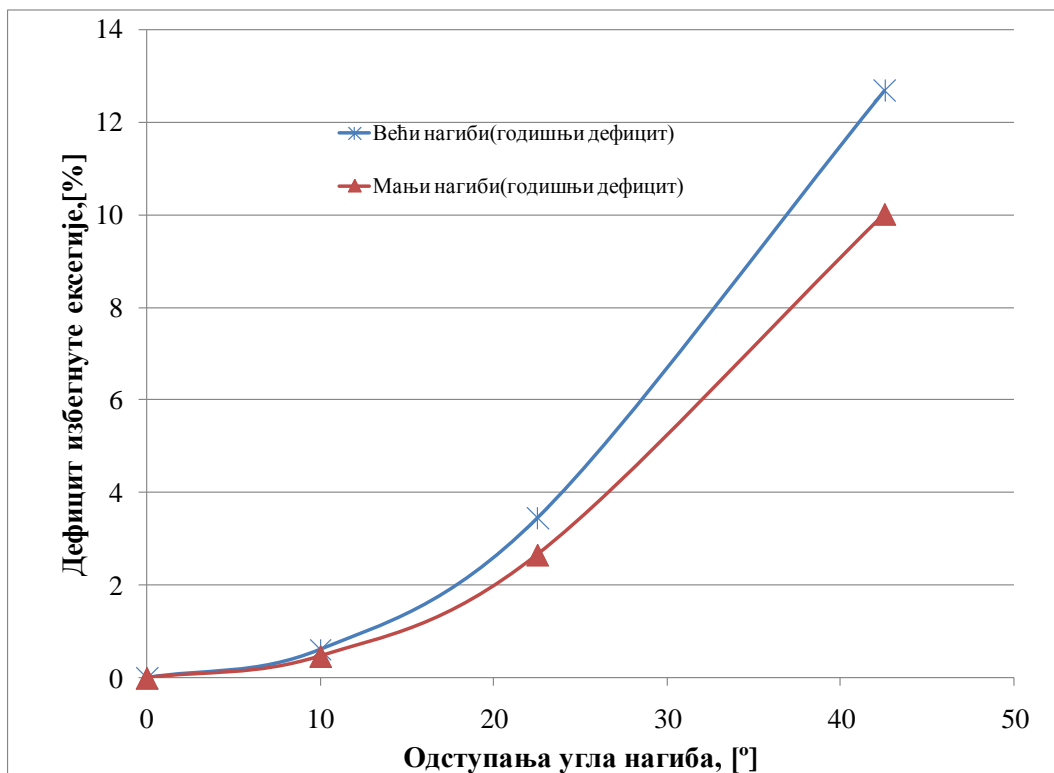
За соларни систем за загревање СТВ са СК#1, $f = f_a$ је приказан на слици 9.2 у функцији β_a , за Београд. Његова једначина је приказана у табели 9.4 као полином трећег реда. Крива има своју максималну вредност $f_{a,max}$ за $\beta_{a,opt}$. Ако соларни пријемник не стоји на $\beta_{a,opt}$ током његовог рада, соларни систем за загревање СТВ са СК#1 има годишњи f_a нижи од годишњег $f_{a,max}$.



Слика 9.2 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#1



Слика 9.3 - Дефицит соларног удела наспрам одступања угла нагиба са оптималним нагибом



Слика 9.4 - Дефицит избегнуте ексергије наспрам одступања угла нагиба са оптималним нагибом

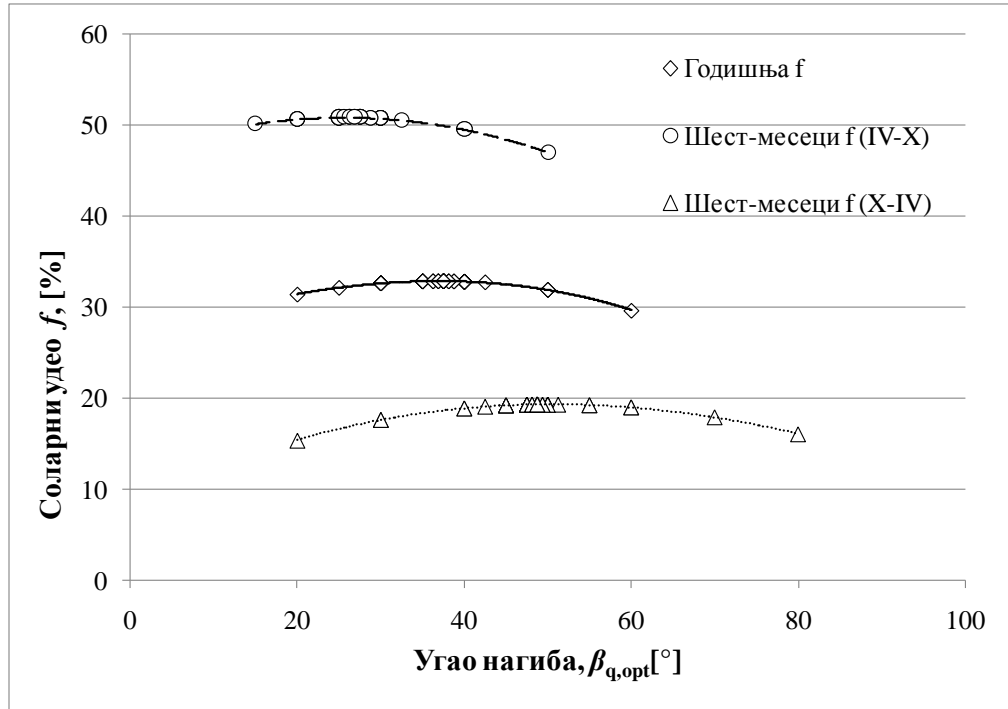
Слика 9.4 приказује да за СК#1, када вредност β_a падне испод вредности $\beta_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$, избегнута ексергија је нижа него у случају када вредност β_a пређе вредност $\beta_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$. Ако је $\Delta\beta_a = 10^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 0.5 %. Ако је $\Delta\beta_a = 42^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 10 % за вредност β_a која је испод вредности $\beta_{a,opt}$ док је дефицит избегнуте ексергије око 12.5 % за вредност β_a која је изнад вредности $\beta_{a,opt}$.

9.1.2 Соларни систем за загревање СТВ са СК#2

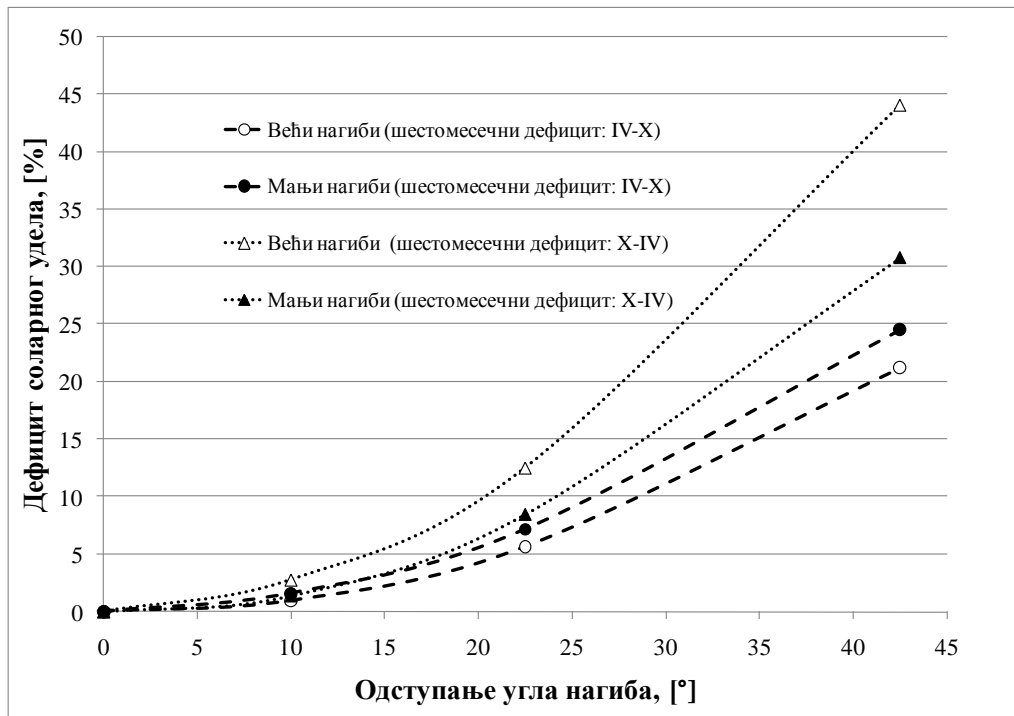
СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи два нагиба $\beta_{h,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#2 ради на једном нагибу $\beta_{h,opt}$ од 15. октобра до 14. априла, а на другом нагибу $\beta_{h,opt}$ од 15. априла до 14. октобра.

На слици 9.5 две криве (које су означене као X-IV и IV-X) приказују соларни систем за загревање СТВ са СК#2. Свака крива представља соларну фракцију f_h по соларном систему за загревање СТВ као функцију СК#2 са нагибом β_h . Крива X-IV представља рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла (182 дана). Крива IV-X представља рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра (183 дана). Свака крива има максималну вредност f_h (која је у даљем тексту означена $f_{h,max}$) на оптималном нагибу $\beta_{h,opt}$. Ако СК#2 нема оптималан нагиб $\beta_{h,opt}$, онда је $f_h < f_{h,max}$. Криве приказане на слици 9.5 су добијене на основу израчунатих резултата (f_i за СК#2 у функцији нагиба β_i) добијених у поступку приближавања оптималном решењу по методологији алгоритма оптимизације *Hooke Jeeves*. Вредност $f_{h,max}$ се добија овим поступком као резултат *Hooke Jeeves* алгоритма оптимизације; међутим, ове криве су приказане да би се проценила разлика између вредности f када нагиб није оптималан. Њихове једначине су приказане у табели 9.4 као полином трећег реда.

За град Београд, у току првог периода (који укључује зимске месеце), СК#2 има вредност $\beta_{h,opt} = 48.8^\circ$, а соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 19.3\%$. Током другог периода (који укључује летње месеце) соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 50.9\%$, а вредност $\beta_{h,opt} = 26.9^\circ$. Током другог периода вредност $\beta_{h,opt}$ је нижа за 21.9° него у првом периоду, а вредност $f_{h,max}$ је око 2.6 пута виша од вредности у првом периоду.



Слика 9.5 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#2



Слика 9.6 - Дефицит соларног удела у функцији одступања угла нагиба при оптималном нагибу за СК#2

Слика 9.6 приказује да за СК#2 у периоду IV-X, када вредност β_h падне испод вредности $\beta_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ соларни удео је нижи него у случају када вредност β_h пређе вредност $\beta_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$. Ако је $\Delta\beta_h = 10^\circ$, дефицит соларног удела је око 2 % у оба случаја. Ако је $\Delta\beta_h = 42^\circ$, дефицит соларног удела је око 25 % за вредност β_h која је испод вредности $\beta_{h,opt}$ док је дефицит соларног удела око 21.5 % за вредност β_h која је изнад вредности $\beta_{h,opt}$.

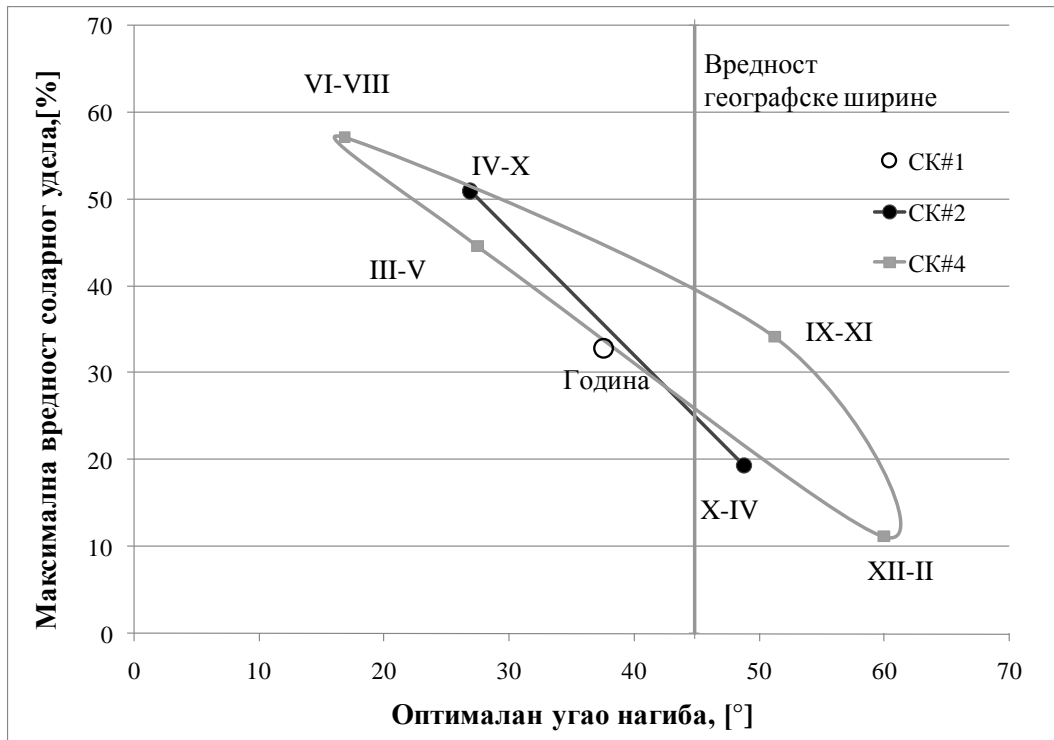
Слика 9.6 приказује да за СК#2 у периоду X-IV када вредност β_h падне испод вредности $\beta_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$, количина изгубљеног соларног удела је виша него када β_h пређе вредност $\beta_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$. Ако је $\Delta\beta_h = 10^\circ$ онда је дефицит соларног удела око 3 % у оба случаја. Ако је $\Delta\beta_h = 42^\circ$, онда је дефицит соларног удела око 31 % за вредност β_h испод вредности $\beta_{h,opt}$, док је дефицит соларног удела око 44 % за вредност β_h изнад $\beta_{h,opt}$.

Табела 9.2 - Соларни удео $f_{h,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 који узима два $\beta_{h,opt}$ у току године

Период	Почетак рада СК	Крај рада СК	Број дана рада СК	$f_{i,max}$, [%]	Оптимални угао нагиба, [°]	
					$\beta_{i,opt}$	$\beta_{q,opt}$
X-IV	15. октобар	14. април	182	19.3	$\Phi + 4.0$	48.8
IV-X	15. април	14. октобар	183	50.9	$\Phi - 17.9$	26.9

За град Београд у табели 9.2 наведене су различите карактеристике соларног система за загревање СТВ са СК#2: почетак шестомесечног рада, крај шестомесечног рада, број дана рада, $\beta_{h,opt}$ и шестомесечни $f_{h,max}$

9.1.3 Соларни систем за загревање СТВ са СК#4

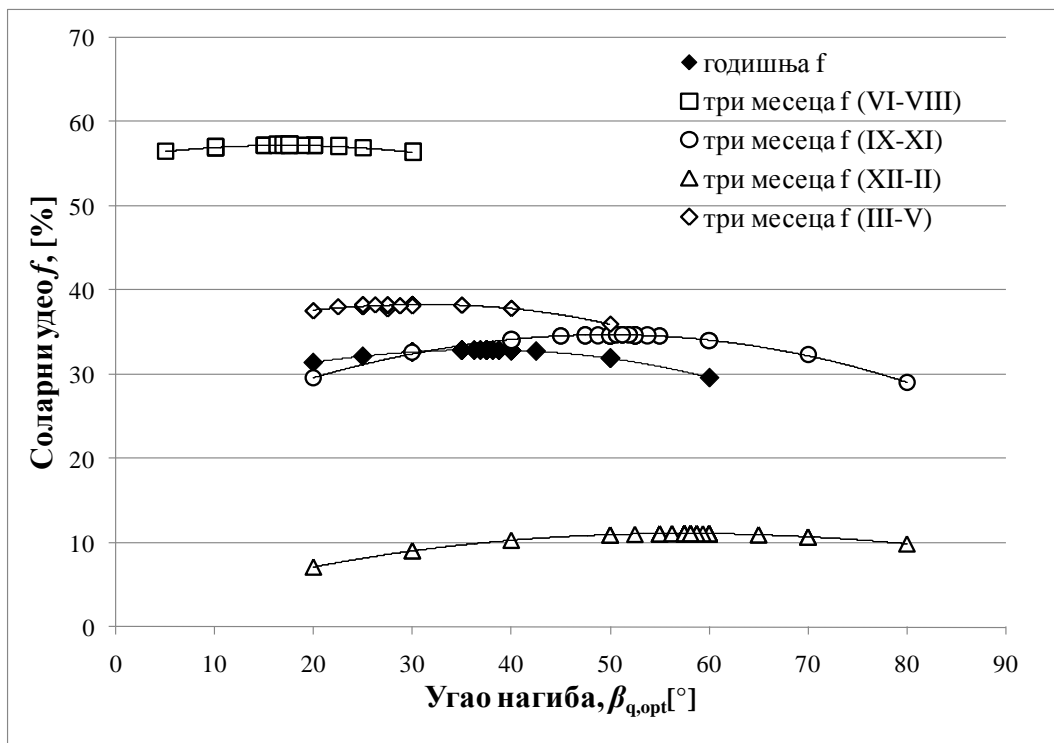


Слика 9.7 - $\beta_{q,opt}$ соларног пријемника и $f_{q,max}$ за свако тромесечје у току године, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

На слици 9.7 максимални соларни удео је дат као функција оптималног угла нагиба за СК#1, СК#2, СК#4. Ова слика је приказана на овај начин да би се представили нацрт енергетског приказа за овај соларни пријемник годишње, полугодишње и тромесечно. Слика 9.7 приказује да је опсег вредности $\beta_{q,opt}$ између 17.5° (лети) и 58.125° (зими). Максимална годишња разлика у вредности $\beta_{q,opt}$ је 40.6° . Вредност $f_{q,max}$ се креће између 57.32% (лети) и 11.14% (зими).

На слици 9.8 за СК#4 приказане су 4 криве (по једна за сваки период) за град Београд. Криве представљају f_q као функцију β_q соларног пријемника. Свака крива има своју максималну вредност која одговара вредностима $\beta_{q,opt}$ и $f_{q,max}$ соларног система за загревање СТВ.

СК#4 мења четири нагиба годишње - један нагиб на сваких три месеца. То значи да функционише са четири $\beta_{q,opt}$ током године. СК#4 ради са првим $\beta_{q,opt}$ у периоду XII-II (90 дана од 1. децембра до 28. фебруара), са другим $\beta_{q,opt}$ у периоду III-V (92 дана од 1. марта до 31. маја), са трећим $\beta_{q,opt}$ у периоду VI-VIII (92 дана од 1. јуна до 31. августа) и са четвртим $\beta_{q,opt}$ у период IX-XI (91 дан од 1. септембра до 30. новембра). Током периода XII-II, соларни систем за загревање СТВ произведе $f_{q,max}$ од 11.1% са $\beta_{q,opt} = 58.1^\circ$. Током периода III-V, соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max}$ од 38.2% са $\beta_{q,opt} = 26.9^\circ$. Током периода VI-VIII, соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 57.3\%$ са $\beta_{q,opt} = 17.5^\circ$. Током периода IX-XI соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 34.7\%$ са $\beta_{q,opt} = 51.2^\circ$. Може се закључити да је током периода VI-VIII $\beta_{q,opt}$ мањи за 40.6° , а $f_{q,max}$ је око 5.16 пута већи него у периоду XII-II. Њихове једначине су приказане у табели 9.4 као полиноми трећег реда.



Слика 9.8 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

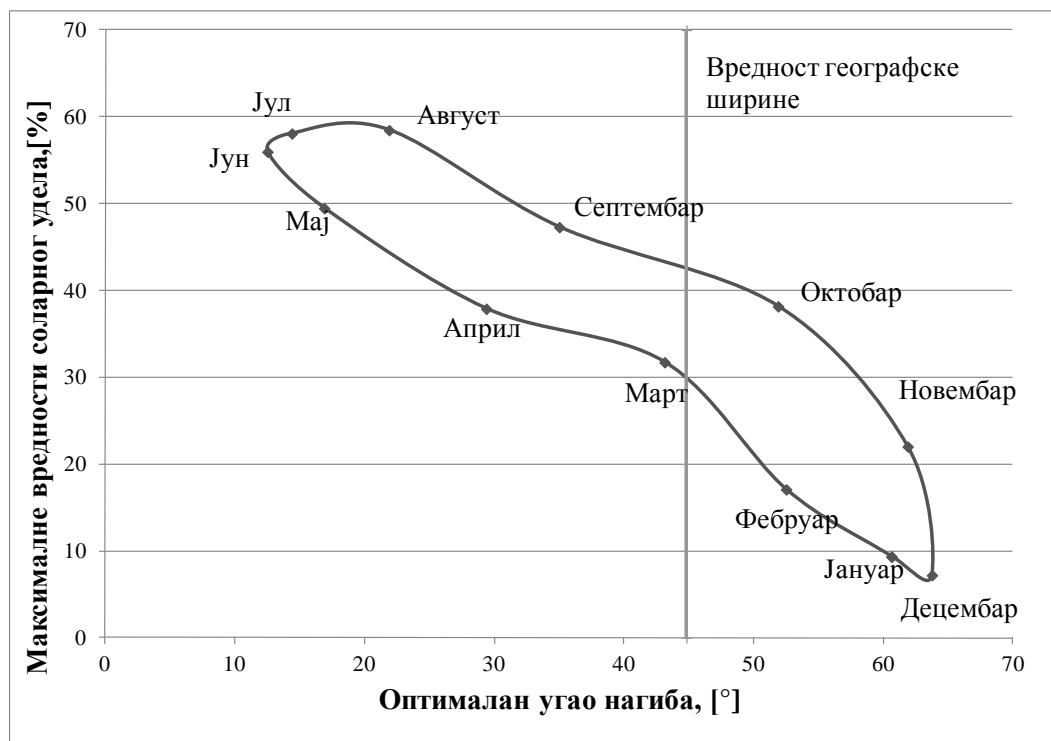
Табела 9.3 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла нагиба $|\beta - \beta_{opt}| = 42^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

Период	$\beta_{q,opt}$, [°]	$f_{q,max}$, [%]	Дефицит соларног удела, [%]	
			β_q одступа испод $\beta_{q,opt}$	β_q одступа изнад $\beta_{q,opt}$
ХП-П	60	11.2	37.6	45.3
Ш-V	27.5	44.5	29.3	27.9
VI-VIII	27.5	57.1	16.0	16.3
IX-XI	51.2	34.1	34.3	27.0

Дефицит соларног удела је дат за све периоде у табели 9.3 за вредност β_q вишу за 42° од вредности $\beta_{q,opt}$ за СК#4 за Београд у Србији. За период IX-XI, дефицит соларног удела је већи када је β_q испод вредности $\beta_{q,opt}$, него када је вредност β_q за 42° већа од вредности $\beta_{q,opt}$. Угао од 42° је узет насумично (под претпоставком) са циљем да се добију довољно велике разлике у вредности f и да би се разликовале у употреби соларног пријемника у различитим годишњим добима.

9.1.4 Соларни систем за загревање СТВ са СК#12

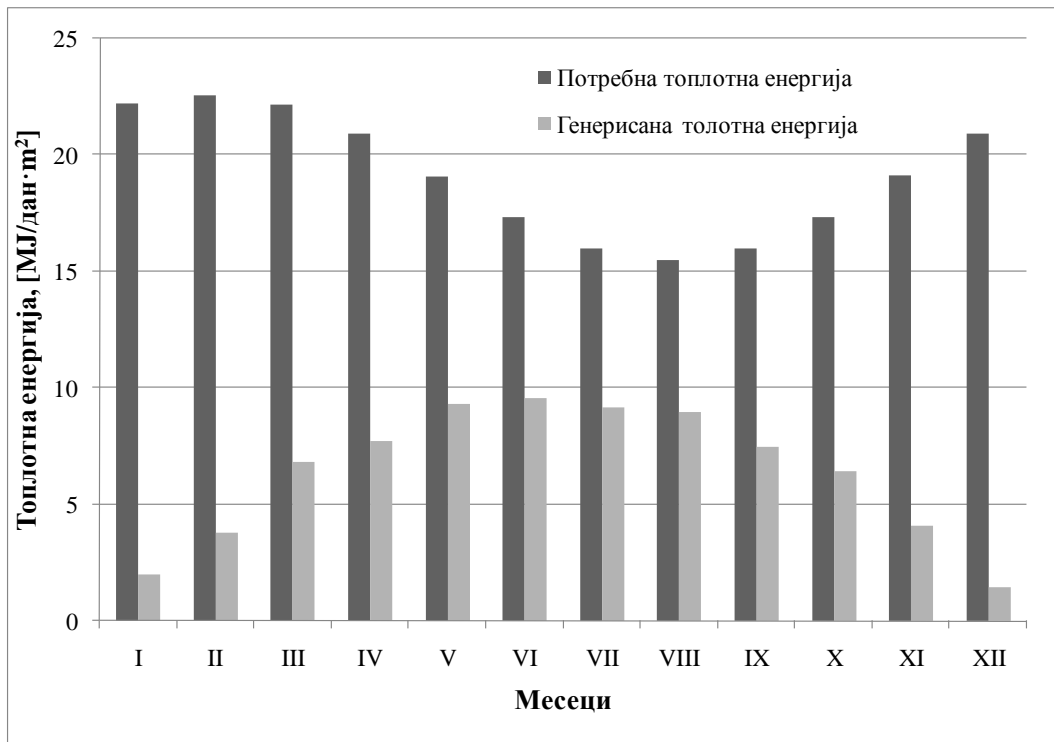
СК#12 годишње мења 12 нагиба - један нагиб $\beta_{m,opt}$ сваког месеца. Затим, $\beta_{m,opt}$ производи максималну количину топлоте од соларне енергије на месечном нивоу да би достигао максималну вредност $f_{m,max}$.



Слика 9.9 - Месечни β_{opt} соларног пријемника и месечна f_{max} за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

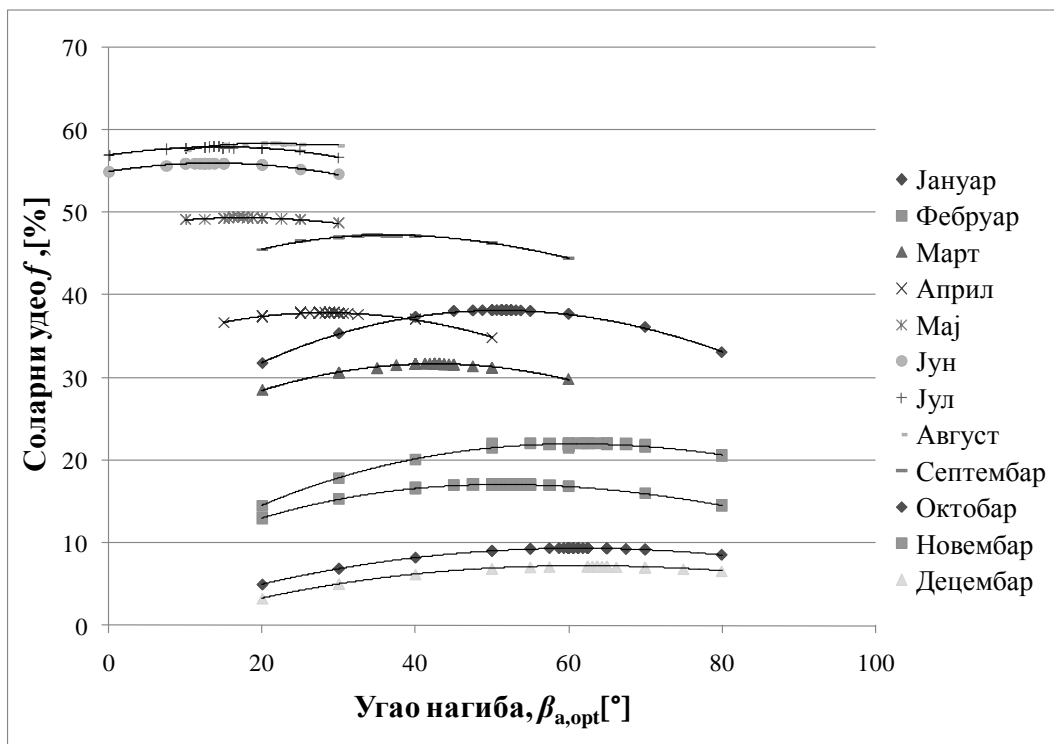
На слици 9.9 максимални соларни удео је дат као функција оптималног нагиба за сваки месец. Слика 9.9 је приказана на овај начин да би се представио нацрт енергетског приказа за овај соларни пријемник. Ова слика приказује да је опсег вредности $\beta_{m,opt}$ између 11° (у јуну) и 64° (у децембру). Максимална годишња разлика у вредности $\beta_{m,opt}$ је 53° . Вредност $f_{m,max}$ се креће између 59 % (у августу) и 8 % (у децембру).

Слика 9.10 показује дневне просечне вредности у току месеца две променљиве за соларни систем за загревање СТВ са СК#12. Прва променљива је потребна топлотна енергија за један месец $E_{1,tot,m}$ за грејање санитарне топле воде. Друга променљива је максимална количина генерисане топлотне енергије $E_{1,m}$ која се користи за грејање санитарне топле воде. Овде, $E_{1,m}$ има свој максималну вредност за летње месеце у јуну, а истовремено има минималну вредност за зимске месеце у јануару. $E_{1,tot,m}$ има минималну вредност за летње месеце у августу, а максималну вредност за зимске месеце у фебруару. Осим тога, $E_{1,m} < E_{1,tot,m}$ за све месеце, $E_{1,tot,m} - E_{1,m}$ има минималну вредност у току летњих месеци, а максималну вредност у току зимских месеци.



Слика 9.10 - Потребна топлотна енергија за грејање санитарне топле воде и максимални износ генерисане топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Слика 9.11 приказује дванаест кривих за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 који ради у Београду. Криве представљају соларне уделе који се добијају ако СК#12 у својој примени има другачији нагиб. За сваки месец је дата по једна крива. Криве на слици 9.12 су добијене уз помоћ израчунатих резултата ($f_i(\beta_i)$ за СК#12) у поступку за одређивање приближавања оптималном решењу по принципу *Hooke Jeeves* алгоритму оптимизације.

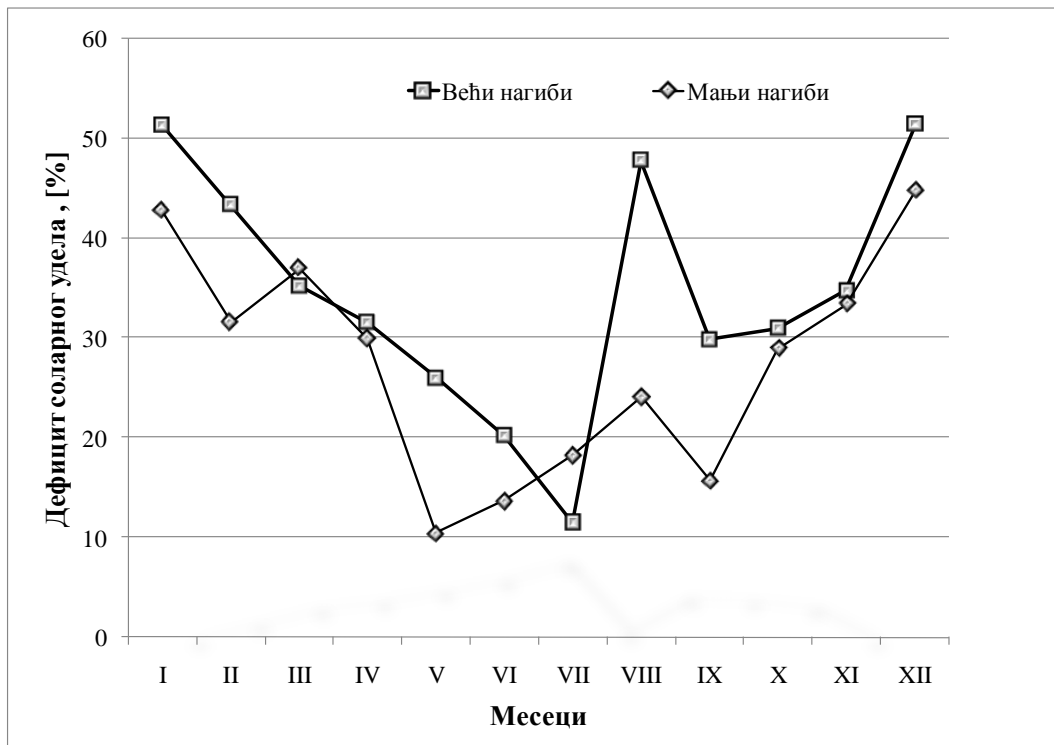


Слика 9.11 - Соларни удео у функцији угла нагиба за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Ако соларни пријемник са СК#12 не заузме оптималне нагибе у својој примени, мања количина електричне енергије ће бити избегнута употребом соларног система за загревање СТВ. Њихове једначине су приказане у табели 9.5 као полиноми трећег реда. Ако соларни пријемник нема максималне вредности углова нагиба током његовог рада, имаћемо губитке у генерисању топлотне енергије.

Слика 9.12 приказује дефицит соларног удела за соларни систем за загревање СТВ у Београду, Србији у случају када је нагиб СК#12 у неким месецима већи или мањи од β_{opt} за 42° . Постоје две ситуације:

- (1) за месеце јануар, фебруар, мај, јун, август, септембар и децембар, када је β већи од β_{opt} за 42° дефицит соларног удела је већи него када је β мањи од $\beta_{opt} = 42^\circ$. Највећа разлика у дефициту од око 24 % постоји у VIII месецу. У XII, I, и VIII месецу, када је β_m за 42° већи од β_{opt} , постоји највећи дефицит у вредности f од око 50 %.
- (2) За месец јули, када је β за 42° већи од β_{opt} , дефицит соларног удела је мањи него када је β за 42° мањи од β_{opt} .
- (3) За месеце март, април, октобар и новембар, дефицит соларне фракције је исти као када је вредност β_m испод или изнад вредности β_{opt} .



Слика 9.12 - Месечни дефицит соларног удела, за одступања угла нагиба $|\beta - \beta_{opt}| = 42^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Табела 9.4 - Једначине соларног удела у зависности од угла нагиба за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4

Број нагиба	Период	Број дана	Соларни удео, [%]	Коефицијент тачности (R^2)
1	година	365	$f = -2.5527 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 2.6461 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 2.9986 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 26.707$	0.999
2	октобар - април	182	$f = 9.8143 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 5.4426 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 4.7343 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 8.0428$	0.999
2	април - октобар	183	$f = -2.0525 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 6.2646 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 3.2456 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 46.703$	0.999
4	јесен	92	$f = -6.2957 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 4.9190 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 5.3585 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 20.962$	0.998
4	зима	90	$f = 8.0310 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 3.9476 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 3.7326 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 1.1863$	1
4	пролеће	91	$f = -5.4429 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 5.4311 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2 + 1.9422 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 34.449$	0.928
4	лето	92	$f = 4.8337 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 5.3840 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 + 1.7971 \cdot 10^{-1} \cdot \beta + 55.763$	0.984

Табела 9.5 - Једначине соларног удела у зависности од угла нагиба за соларне системе за загревање СТВ са СК#12, дате за сваки месец

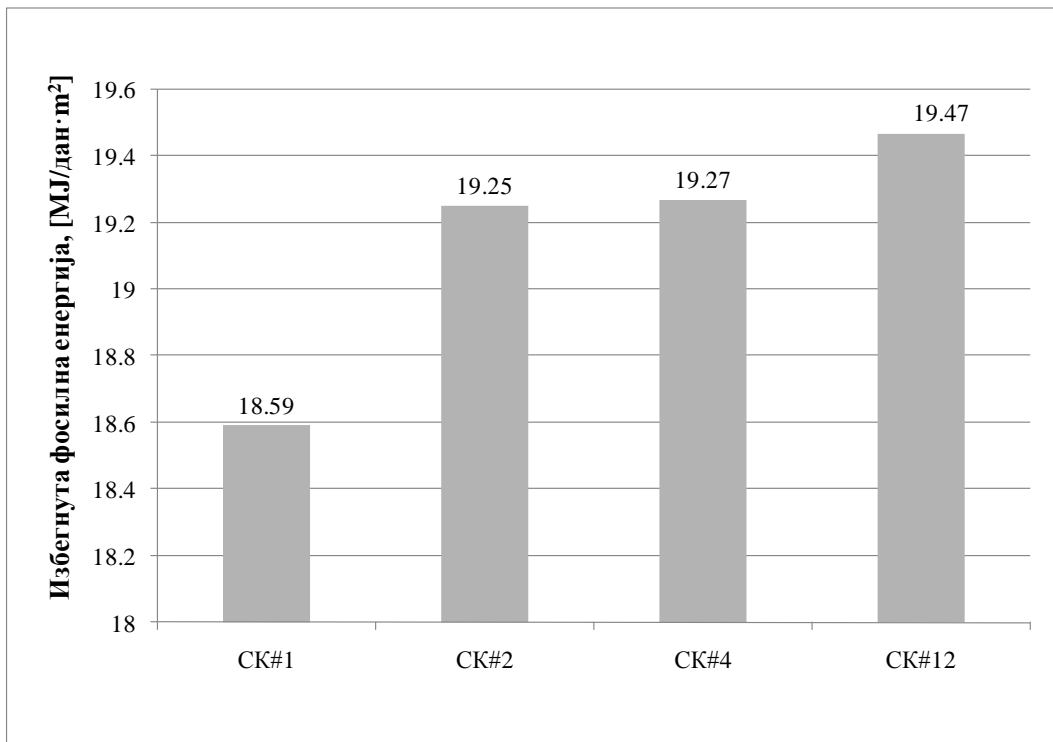
Месец	Број дана	Соларни удео, [%]	Коефицијент тачности (R^2)
Јануар	31	$f = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^3 - 0.003 \cdot \beta^2 + 0.331 \cdot \beta - 0.498$	0.999
Фебруар	28	$f = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.006 \cdot \beta^2 + 0.506 \cdot \beta + 5.287$	0.999
Март	31	$f = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \beta^3 - 0.006 \cdot \beta^2 + 0.541 \cdot \beta + 20.20$	0.986
Април	30	$f = 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.007 \cdot \beta^2 + 0.39 \cdot \beta + 32.49$	0.994
Мај	31	$f = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.006 \cdot \beta^2 + 0.201 \cdot \beta + 47.78$	0.967
Јун	30	$f = -6 \cdot 10^{-8} \cdot \beta^3 - 0.005 \cdot \beta^2 + 0.142 \cdot \beta + 54.98$	0.988
Јул	31	$f = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.003 \cdot \beta^2 + 0.125 \cdot \beta + 57.00$	0.924
Август	31	$f = \beta^3 - 0.022 \cdot \beta^2 + 0.564 \cdot \beta + 53.89$	0.909
Септембар	30	$f = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.009 \cdot \beta^2 + 0.554 \cdot \beta + 37.94$	0.991
Октобар	31	$f = 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.007 \cdot \beta^2 + 0.726 \cdot \beta + 20.33$	0.999
Новембар	30	$f = 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.006 \cdot \beta^2 + 0.630 \cdot \beta + 4.398$	0.991
Децембар	31	$f = 7 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 0.003 \cdot \beta^2 + 0.324 \cdot \beta - 1.989$	0.999

9.1.5 Поређење различитих соларних пријемника са различитим нагибом пријемника

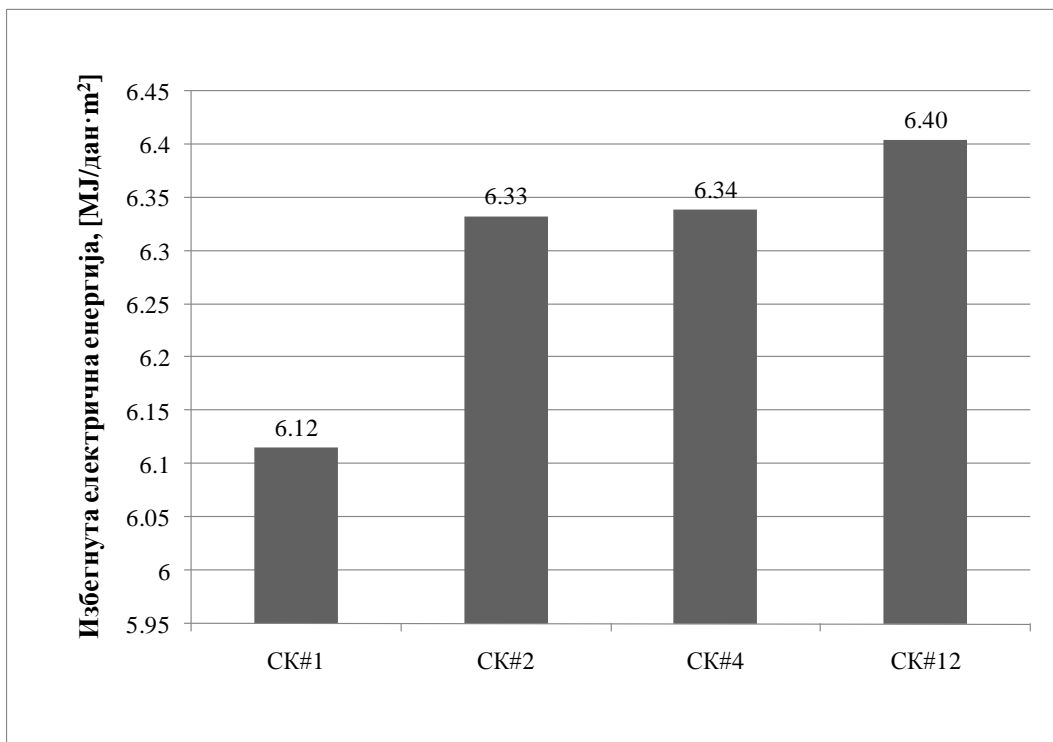
Током примене, соларни системи за загревање СТВ са различитим соларним пријемницима (СК) могу да произведу различите количине топлотне енергије из соларне енергије. Као резултат тога могу се добити различите количине избегнуте електричне енергије или избегнуте фосилне енергије, или избегнуте ексергије, а емитују се и различите количине CO_2 .

9.1.5.1 Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12

Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите соларне системе за загревање СТВ који су коришћени у Београду, су дате на слици 9.13 и слици 9.14. Фактор фосилне енергије $C_f = 3.04$ је добијен на основу [91]. Такође, на слици 9.15 је приказана годишња разлика у максималној количини избегнуте електричне енергије за различите соларне системе за загревање СТВ и оне са стационарним соларним пријемником. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном нагибу у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и сходно томе $f = f_{a,max} = 32.9\%$ су дате за Београд, Србија.



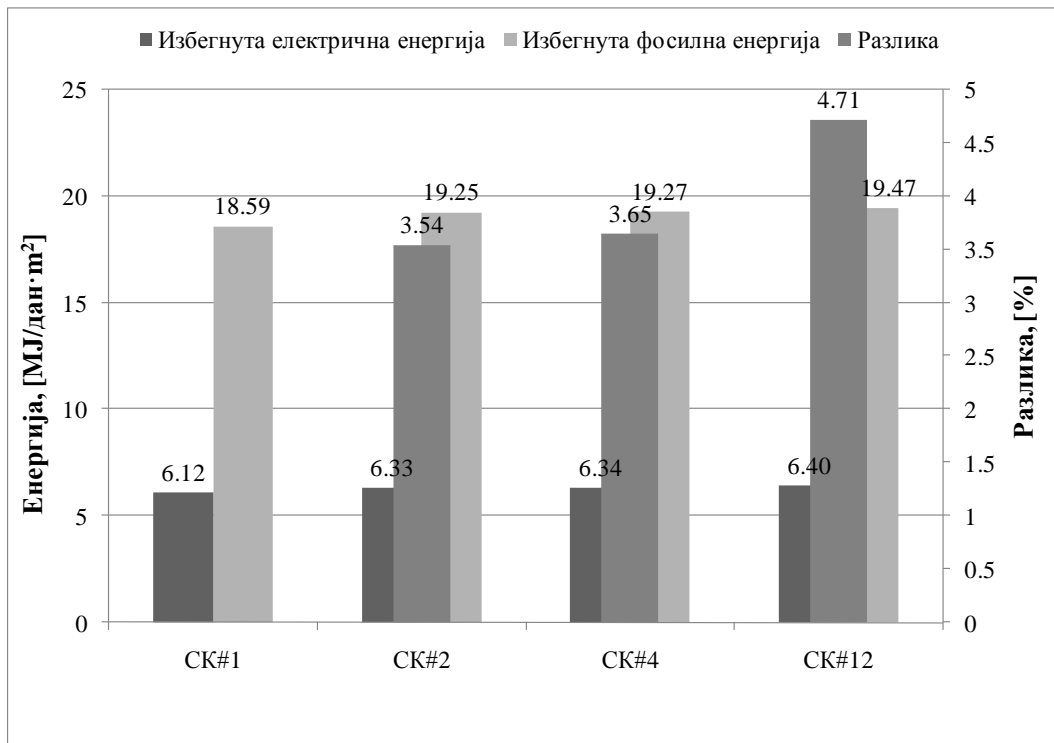
Слика 9.13 - Максималне количине избегнуте фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК



Слика 9.14 - Максималне количине избегнуте електричне енергије на годишњем нивоу за различите СК

За СК#2, количина избегнуте електричне енергије је за 3.54 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, количина избегнуте електричне енергије је за 3.65 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 количина избегнуте електричне енергије је за око 4.71 % виша од

оне која се постигне са стационарним соларним пријемником. Узевши у обзир ове податке, израда СК#2 уместо стационарног непокретног соларног пријемника може бити корисна. У току истраживања закључујемо да СК#4 и СК#12 не производе много више уштеде од СК#2.

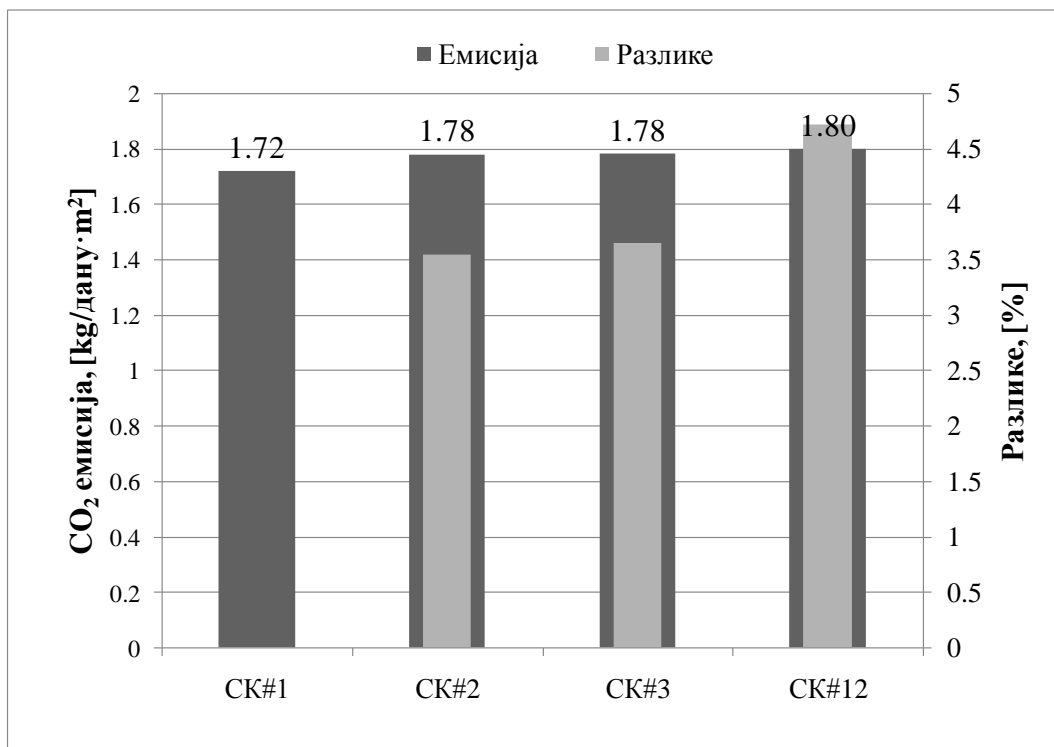


Слика 9.15 - Разлике максималних количина избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК у односу на СК#1

За СК#2, количина избегнуте фосилне енергије је за 3.54 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, количина избегнуте фосилне енергије је за 3.65 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 количина избегнуте фосилне енергије је за око 4.71 % виша од оне која се постигне са стационарним соларним пријемником. Узевши у обзир ове податке, који су сразмерни избегнутој електричној енергији, имамо исте резултате, па израда СК#2 уместо стационарног непокретног соларног пријемника може бити корисна. У овим анализама треба имати у виду да цена праћења тј. економски аспект није узета у обзир.

9.1.5.2 Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12

Максималне вредности избегнуте емисије CO_2 на годишњем нивоу приказане су на слици 9.16 за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12, за Београд. Такође, годишња разлика максималних вредности избегнуте емисије CO_2 за различите соларне системе за загревање СТВ са различитим СК поређени су са СК#1. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном нагибу у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и сходно томе $f = f_{a,max} = 32.9\%$ су дате за Београд, Србија.



Слика 9.16 - Максимална годишња избегнута емисија CO₂ услед максимално избегнуте електричне енергије у функцији броја оптималних нагиба соларног пријемника за соларни систем за загревање СТВ у току године.

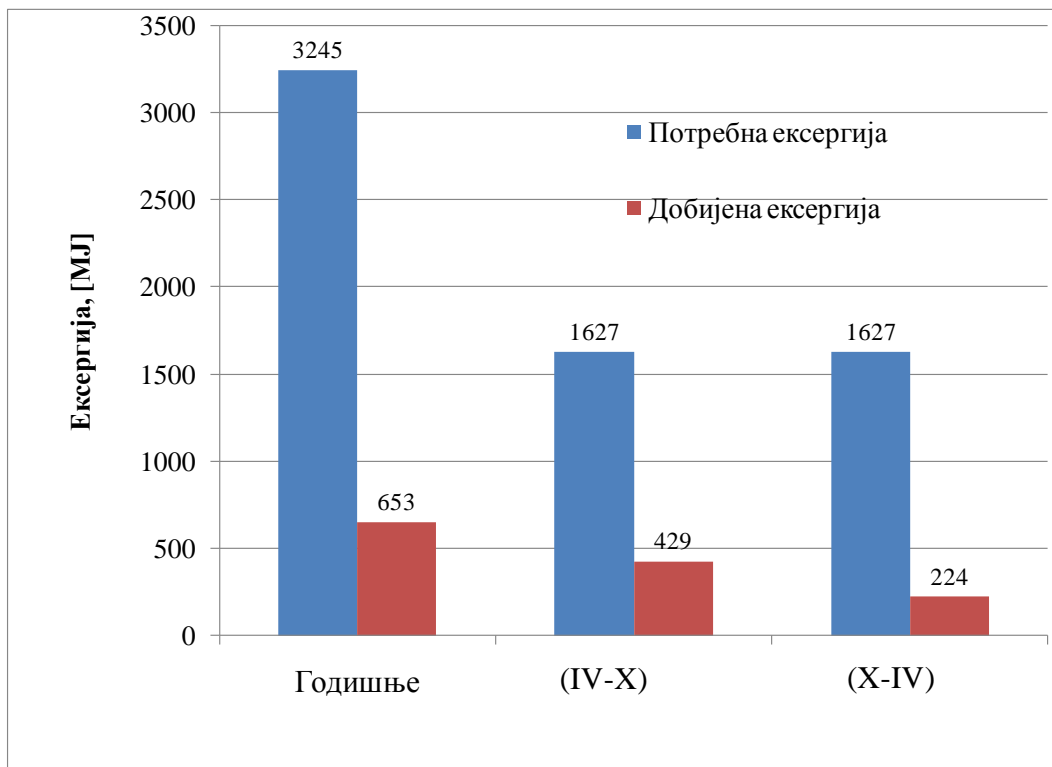
За СК#2, разлика је за 3.54 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, разлика је за 3.65 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 разлика CO₂ је за око 4.71 % виша од оне која се постигне са стационарним соларним пријемником.

9.1.5.3 Максималне количине избегнуте ексергије за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2

Кроз ексергетску оптимизацију је одређена максимална вредност ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање санитарне топле воде на годишњем нивоу. Максимални ексергетски степен ефикасности, аналогно максималној вредности соларног удела у функцији угла нагиба, постиже се постављањем соларног пријемника на оптимални положај. Вредности соларних удела као функције циља код ексергетске оптимизације су исти као и код енергетске оптимизације.

Дефицит избегнуте ексергије на годишњем нивоу у функцији одступања угла нагиба при оптималном нагибу за Београд показан је у поглављу 9.1.1. Анализирајући максималне вредности избегнуте ексергије за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2 за Београд добија се годишња разлика максималних вредности избегнуте ексергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 поређен са СК#1. За СК#2, разлика је за 10.1 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном нагибу у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и сходно томе $f = f_{a,max} = 32.9\%$ су дате за Београд, Србија.

Као један од значајних показатеља ексергетских токова у анализираном соларном систему је однос потребне и добијене ексергије. На слици 9.17 су показане вредности потребне и добијене ексергије за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2 у функцији броја оптималних нагиба. Зато имамо да је за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, вредност потребне ексергије 4.96 пута већа од вредности добијене ексергије. За соларни систем за загревање СТВ са СК#2, за период X-IV када имамо рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла, вредност потребне ексергије је 4.6 пута већа од вредности добијене ексергије, а за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 за период IV-X када имамо рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра, 4.4 пута. Тежња је да се тај однос смањи да би се добиле веће вредности ексергија.



Слика 9.17 - Потребна и добијена ексергија у функцији броја оптималних нагиба за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2

Додатним анализама долазимо до закључка да са порастом потрошње топле воде, потребна је већа количина електричне енергије за њено загревање, због тога односи потребне и добијене ексергије соларних система, са порастом месечне потрошње топле воде опадају. Такође, услед различитих захтеваних температура топле воде у бојлеру, долази до промене потрошње електричне енергије, која се односила на потребе грејања воде. Односи потребне и добијене ексергије соларних система тада расту. Променом распореда коришћења крајњих потрошача може се такође утицати смањење или повећање односа потребне и добијене ексергије. Самим тим добијамо вредност ексергетског степена искоришћења, η_x за испитиван систем при већ унапред задатим условима (потрошње топле воде, распореда коришћења топле воде, задате температуре топле воде) од 1.1 % за соларни систем за загревање СТВ са СК#1.

9.2 Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i, \gamma_i)$

Истраживања показују четири различита соларна система за загревање санитарне топле воде и то СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12. Њихови соларни пријемници су окренути у правцу север-југ.

Ови системи се разликују у дизајну својих носача који им омогућавају да имају различите вредности нагиба и азимута соларних пријемника β_i и γ_i , у току године. СК#1 је систем који има стационарни соларни пријемник и његов нагиб је $\beta_{a,opt}$ и угао азимута $\gamma_{a,opt}$. СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи два нагиба $\beta_{h,opt}$ и азимута $\gamma_{h,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#4 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи четири нагиба $\beta_{q,opt}$ и азимута $\gamma_{q,opt}$ годишње - по један на три месеца. СК#12 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи 12 нагиба $\beta_{m,opt}$ и азимута $\gamma_{m,opt}$ годишње - по један за сваки месец.

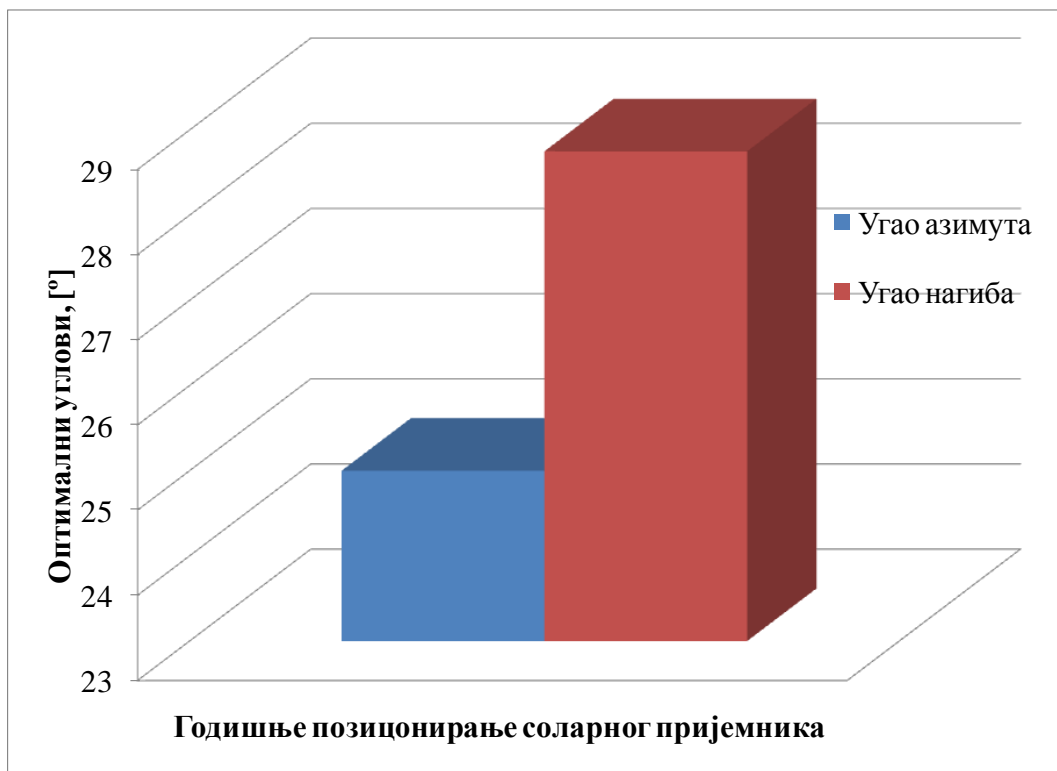
Овом приликом је за сваки соларни систем за грејање санитарне топле воде израчунат соларни удео у функцији угла нагиба и угла азимута, користећи се одговарајућим симулационим и оптимизационим рутинама са модификованом методологијом *Hooke Jeeves* алгоритма.

9.2.1 Соларни систем за загревање СТВ са СК#1

Истраживан је соларни систем за загревање СТВ са СК#1 који има стационарни соларни пријемник који годишње функционише на једном нагибу и једном углу азимута. Вредности $\beta_{a,opt}$, и угао азимута $\gamma_{a,opt}$ са одговарајућим $f_{a,max}$ дати су у табели 9.6 за Београд у Србији, а резултати оптималног позиционирања соларних пријемника за остале градове у Србији су дати као табеларни приказ оптималних углова соларних пријемника у глави 9.5

Соларни пријемник постављен на $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ би годишње генерисао максималну количину топлоте и имао би $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ. Користећи се одговарајућим оптимизационим рутинама за ове услове позиционирања соларног пријемника са становишта нагиба $\beta_{a,opt}$ имао је вредност 37.5° , док до његове промене долази за око 23 % уколико оптимизујемо истовремено и угао нагиба и угао азимута и његова вредност $\beta_{a,opt}$ је 28.75° . Слика 9.18 показује углове оптималног позиционирања (угао нагиба и угао азимута) за соларни систем за загревање СТВ са СК#1 у Београду. Таква оптимизација даје вредност угла азимута од 25° .

Одговарајуће симулационе и оптимизационе рутине соларног система за загревање СТВ дају вредност соларног удела $f_{a,max}$ од 35.8 %, што је за 3 % веће од вредности оптималног соларног удела $f_{a,max}$ када је соларни пријемник функционисао само на једном нагибу. У табели 9.6 су приказане вредности $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао би $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ.



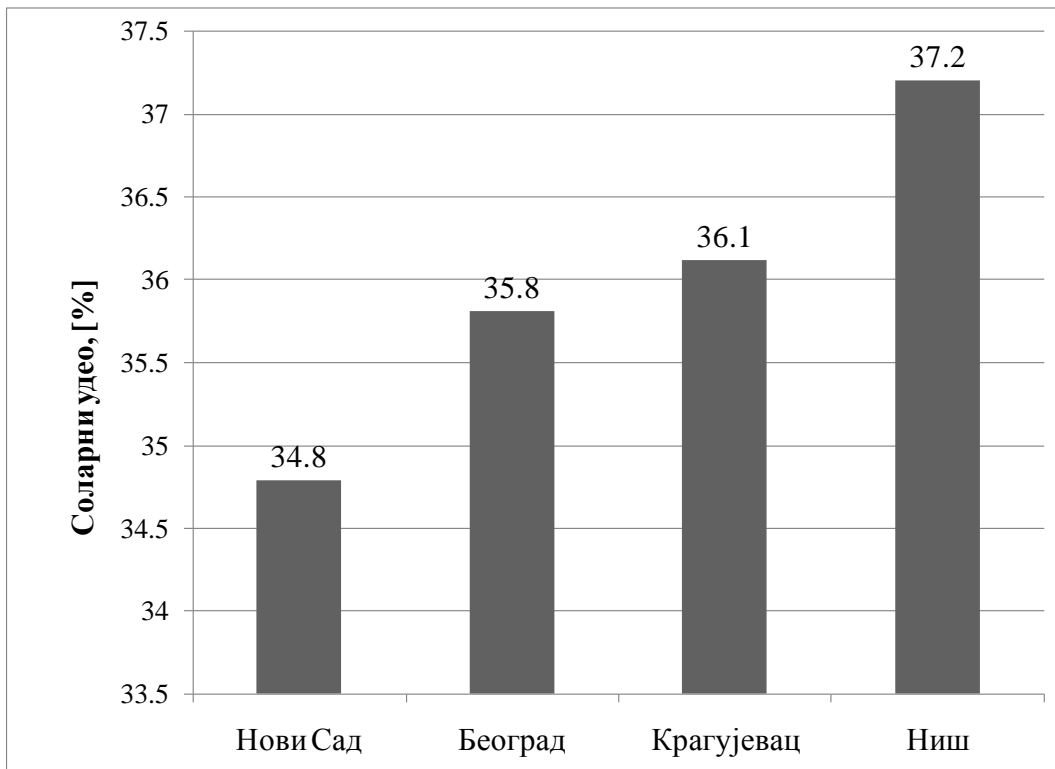
Слика 9.18 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#1

Табела 9.6 - β_{opt} и γ_{opt} за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао f_{max} за соларни систем за загревање СТВ за СК#1 и СК#2

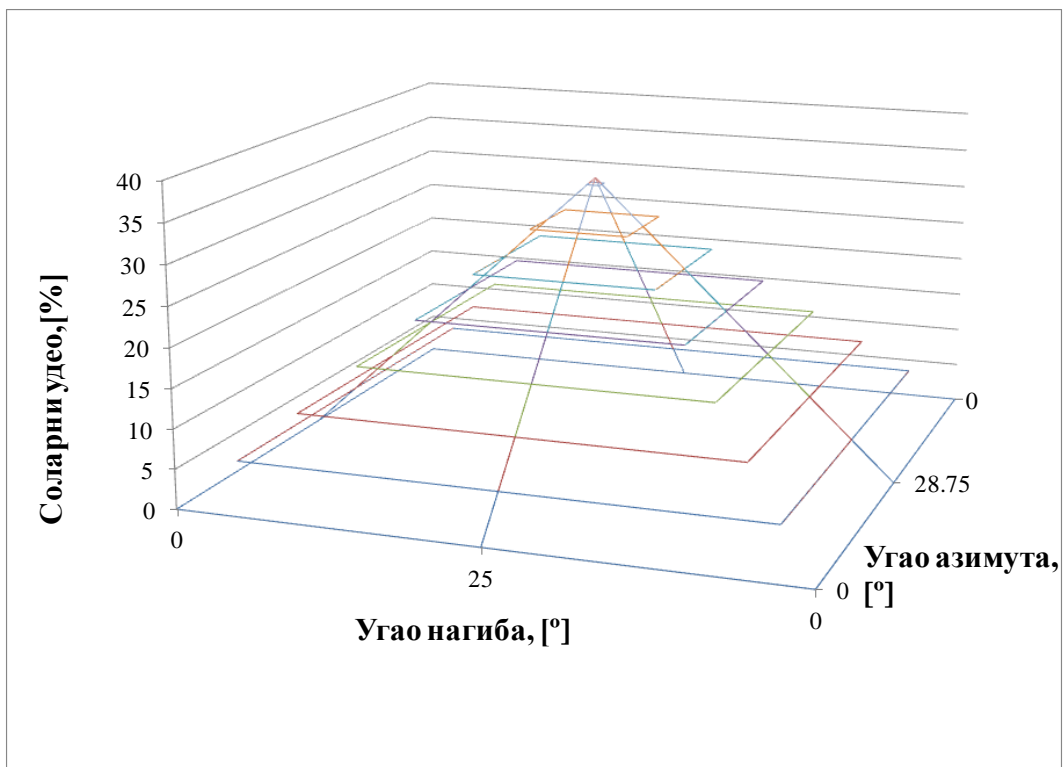
Стационарни соларни пријемник са СК#1	$\beta_{a,opt}$, [°]	$\gamma_{a,opt}$, [°]	$f_{a,max}$, [%]
		28.75	25
Соларни пријемник са СК#2	$\beta_{h,opt}$, [°]	$\gamma_{h,opt}$, [°]	$f_{h,max}$, [%]
X-IV	42.5	21.25	21.6
IV-X	15	30	54.6

На слици 9.19 су дате оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији.

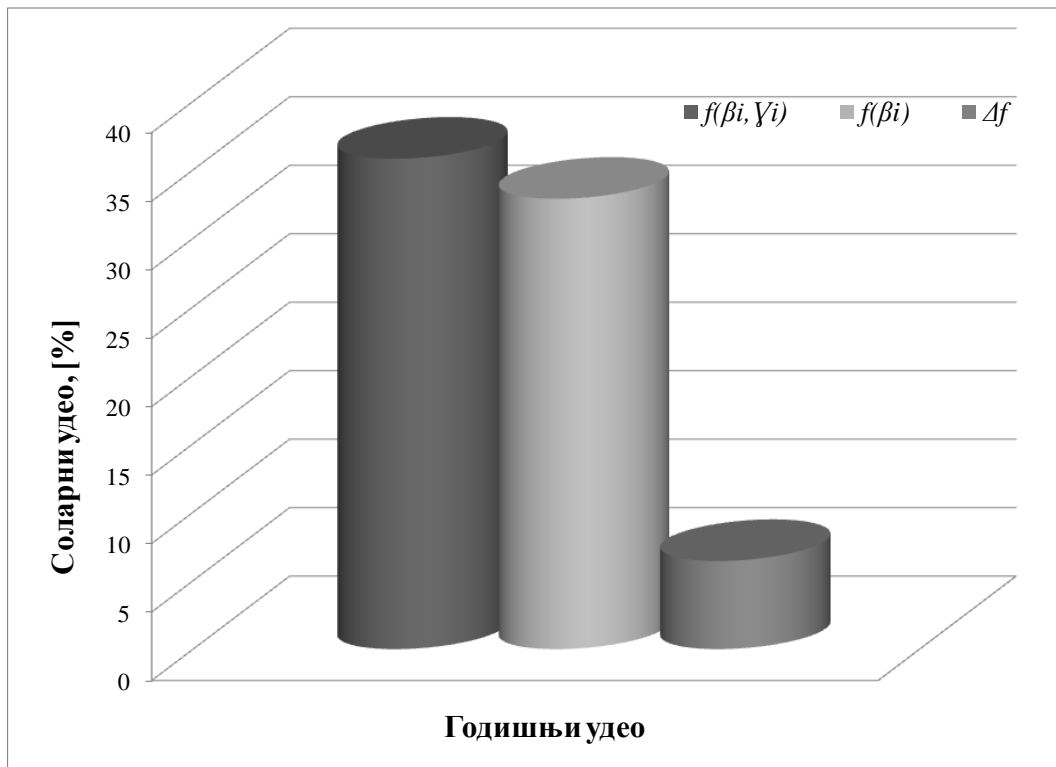
За соларни систем за загревање СТВ са СК#1, f_a је приказан на слици 9.20 у функцији β_a и γ_a , за Београд. Пирамида има своју максималну вредност $f_{a,max}$ за $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$. Ако соларни пријемник не стоји на $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ током његовог рада, соларни систем за загревање СТВ са СК#1 има годишњи f_a нижи од годишњег $f_{a,max}$. Због тога, на слици 9.21, можемо видети разлике соларних удела које добијамо као резултат оптимизације угла нагиба у односу на истовремену оптимизацију угла нагиба и угла азимута. Та разлика говори и даје јасну разлику добитака када оптимизујемо и угао нагиба и азимута, и то за 6.4 % су веће вредности соларног удела као функције циља, у односу на случај када оптимизујемо само угао нагиба.



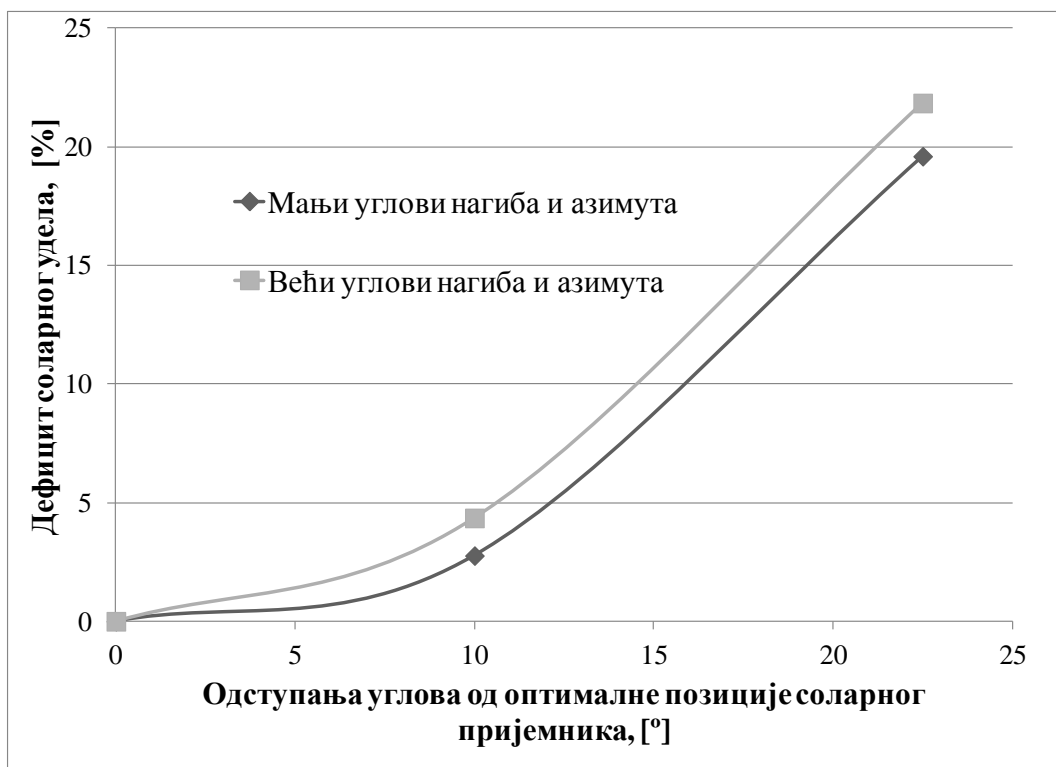
Слика 9.19 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији



Слика 9.20 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#1



Слика 9.21 - Разлике соларних удела, оптимизовањем угла нагиба и оптимизовањем угла нагиба и азимута истовремено, за соларни систем за загревање СТВ са СК#1

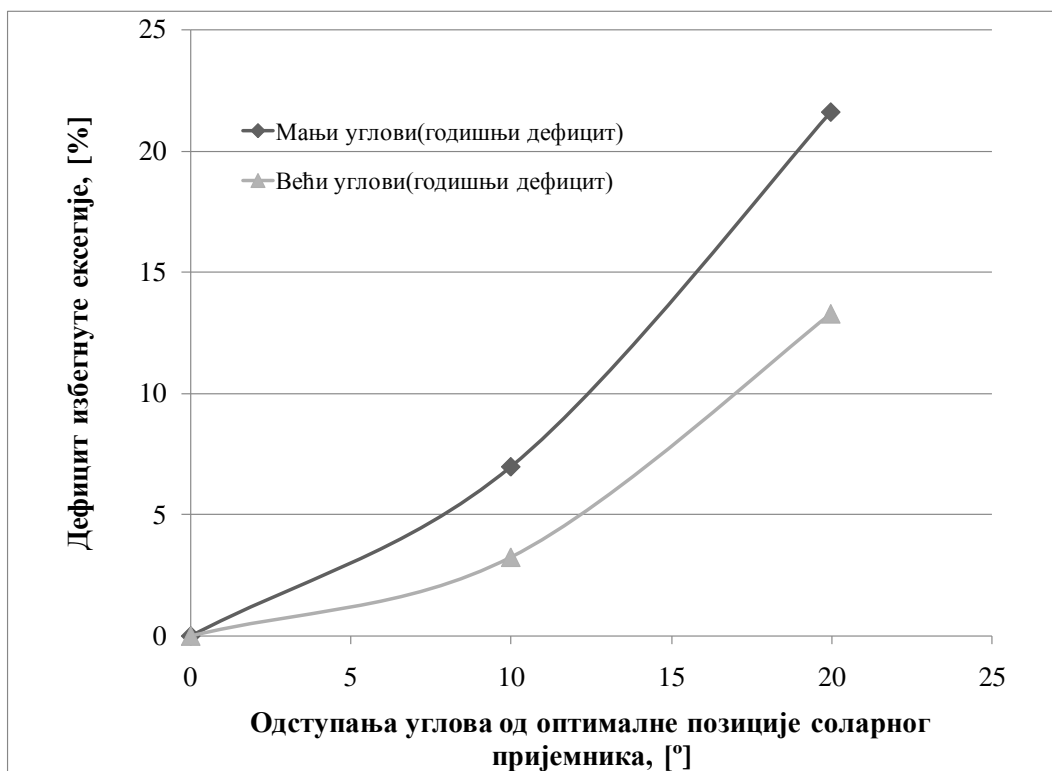


Слика 9.22 - Дефицит соларног удела наспрам одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника

Слика 9.22 приказује да за СК#1 када вредност β_a и γ_a падне испод вредности $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$ и $\Delta\gamma_a$, соларни удео је виши него у случају када вредност β_a и γ_a пређе вредност $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$, односно $\Delta\gamma_a$. Ако је $\Delta\beta_a = 10^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 10^\circ$, дефицит

соларног удела је између 3 % и 4 %. Ако је $\Delta\beta_a = 22.5^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 22.5^\circ$, дефицит соларног удела је око 19.5 % за вредност β_a , односно γ_a која је испод вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$ док је дефицит соларног удела око 22.5 % за вредност β_a , односно γ_a која је изнад вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$.

Слика 9.23 приказује да је за СК#1 када вредност β_a и γ_a падне испод вредности $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$ и $\Delta\gamma_a$, избегнута ексергија виша него у случају када вредност β_a и γ_a пређе вредност $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$, односно $\Delta\gamma_a$. Ако је $\Delta\beta_a = 10^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 10^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 3 % за вредност β_a , односно γ_a која је испод вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$ док је дефицит избегнуте ексергије око 7 % за вредност β_a , односно γ_a која је изнад вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$. Ако је $\Delta\beta_a = 22.5^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 22.5^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 14.2 % за вредност β_a , односно γ_a која је испод вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$ док је дефицит соларног удела око 22.5 % за вредност β_a , односно γ_a која је изнад вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$.

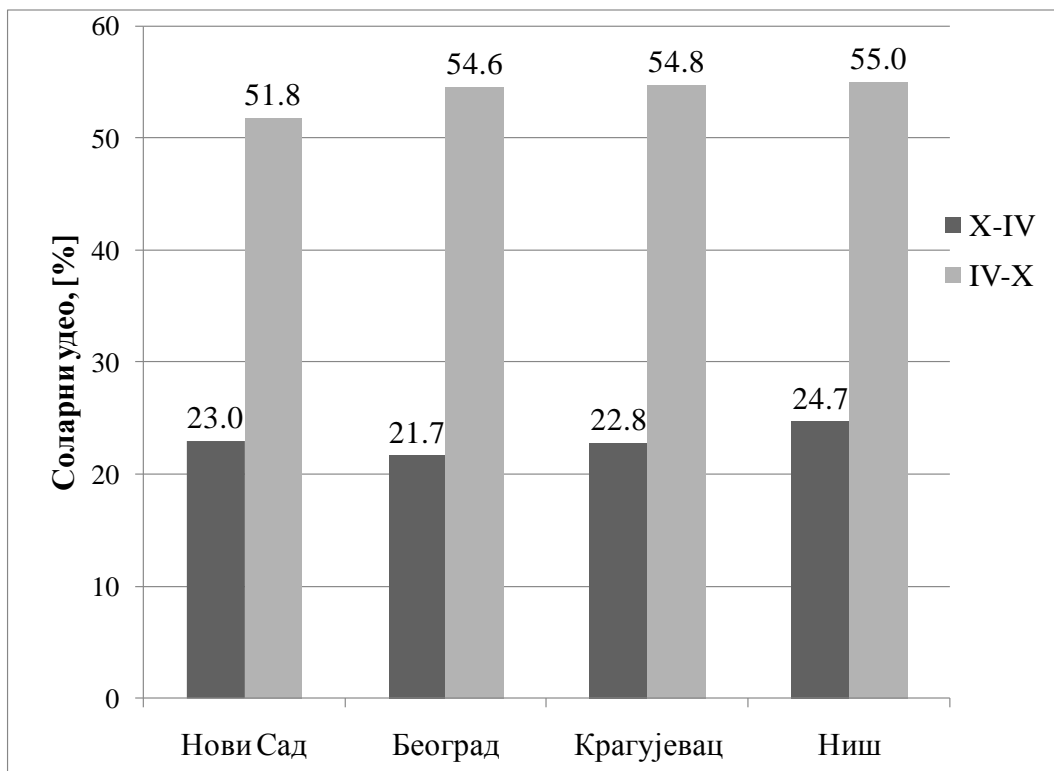


Слика 9.23 - Дефицит избегнуте ексергије насрам одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника

9.2.2 Соларни систем за загревање СТВ са СК#2

СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи два нагиба $\beta_{q,opt}$ и азимута $\gamma_{q,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#2 ради на једном нагибу $\beta_{q,opt}$ и азимуту $\gamma_{q,opt}$, и то једном од 15. октобра до 14. априла, а на другом нагибу $\beta_{q,opt}$ и азимуту $\gamma_{q,opt}$ и то од 15. априла до 14.октобра.

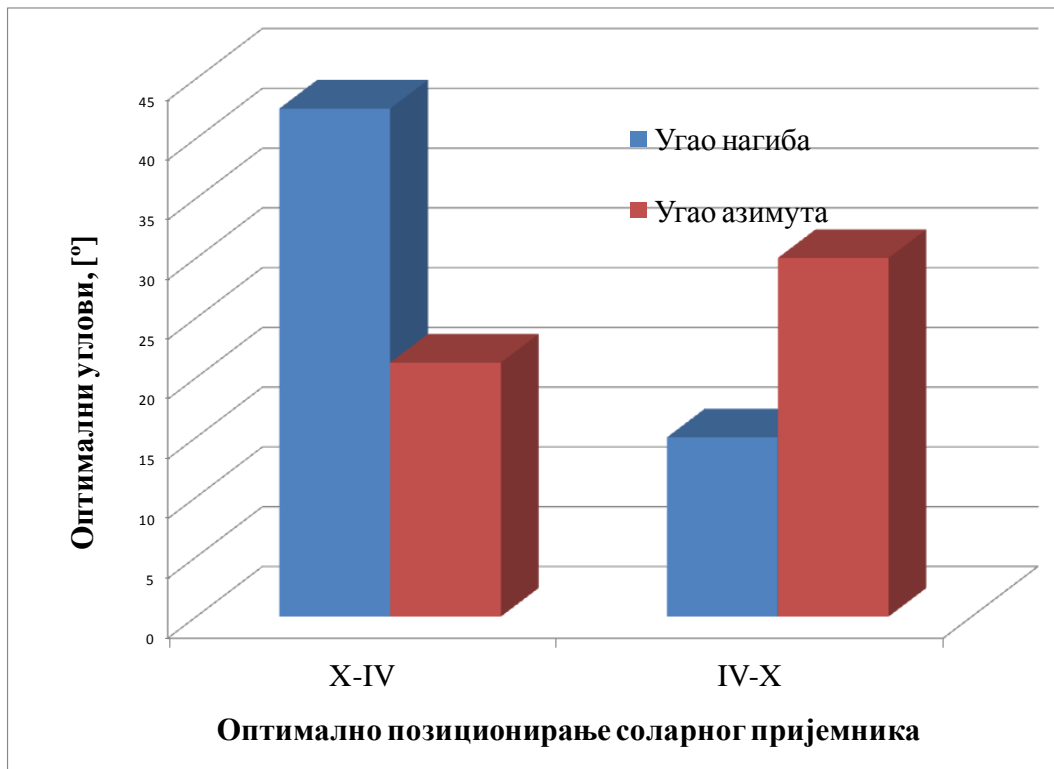
На слици 9.24 су дате оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, за неколико градова у Србији.



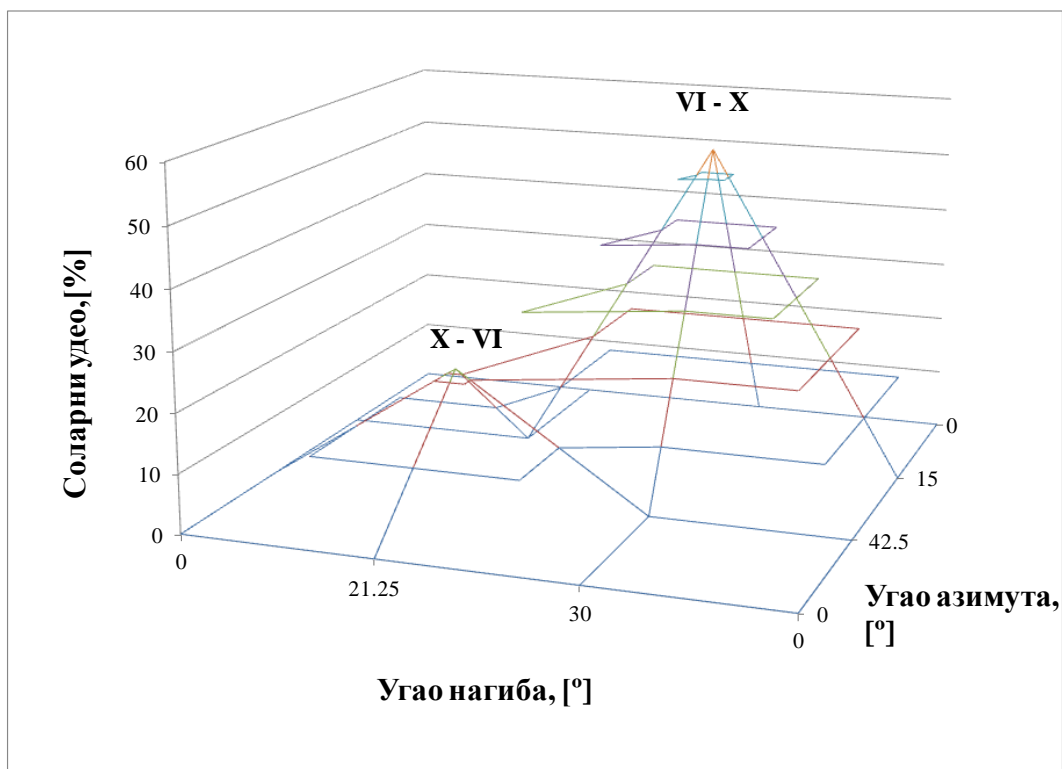
Слика 9.24 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#2, за неколико градова у Србији

На слици 9.25 и 9.26 ознаке X-IV и IV-X приказују соларни систем за загревање СТВ са СК#2. На слици 9.25 приказано је оптимално позиционирање соларног система за загревање СТВ са СК#2, док свака пирамида на слици 9.26 представља соларну фракцију f_h по соларном систему за загревање СТВ као функцију СК#2 са нагибом β_h и углом азимута γ_h . Случај X-IV представља рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла (182 дана). Случај IV-X представља рад соларног система за загревање СТВ са СК#2 од 15. априла до 14. октобра (183 дана).

Сваки случај има максималну вредност f_h (која је у даљем тексту означена $f_{h,max}$) на оптималном нагибу $\beta_{h,opt}$ и оптималној вредности угла азимута $\gamma_{h,opt}$. Ако СК#2 нема оптималан нагиб $\beta_{h,opt}$, и оптималну вредност угла азимута $\gamma_{h,opt}$ онда је $f_h < f_{h,max}$. Приказани случајеви на слици 9.26 су добијене на основу израчунатих резултата (f_h за СК#2 у функцији угла нагиба β_h и угла азимута γ_h) добијених у поступку приближавања оптималном решењу по методологији алгоритма оптимизације *Hooke Jeeves*. Вредност $f_{h,max}$ се добија овим поступком као резултат *Hooke Jeeves* алгоритма оптимизације; међутим, ове ситуације посматрамо и приказујемо да би се проценила разлика између вредности f када нагиб и азимут нису оптимални.



Слика 9.25 - Оптимально позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду



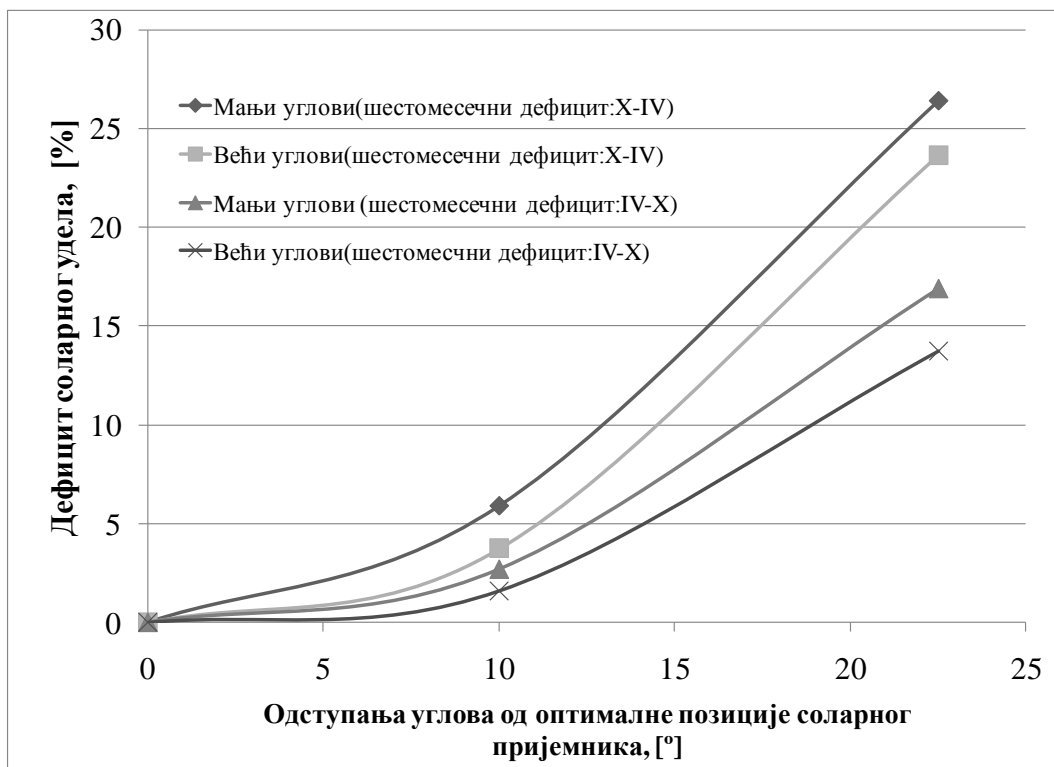
Слика 9.26 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду

За град Београд, у току првог периода (који укључује зимске месеце), СК#2 има вредност $\beta_{h,opt} = 21.25^\circ$ и $\gamma_{h,opt} = 42.5^\circ$, а соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 21.7\%$. Током другог периода (који укључује летње месеце) соларни систем за

загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 54.6 \%$, а СК#2 има вредност $\beta_{h,opt} = 15^\circ$ и $\gamma_{h,opt} = 30^\circ$. Током другог периода, вредност $\beta_{h,opt}$ се разликује за 6.7° него у првом периоду, а $\gamma_{h,opt}$ се разликује за 12.5° што представља јасну основу да је проблем посматран у времену важан за сагледавање проблема оптималног позиционирања. За посматране временске дистанце имамо и да је вредност $f_{h,max}$ у току зимских месеци (X-IV) за око 2.5 пута нижа од вредности у току летњих месеци (IV- X).

У табели 9.6 приказане су вредности β_{opt} и γ_{opt} за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао f_{max} за соларни систем за загревање СТВ за СК#2 у Београду.

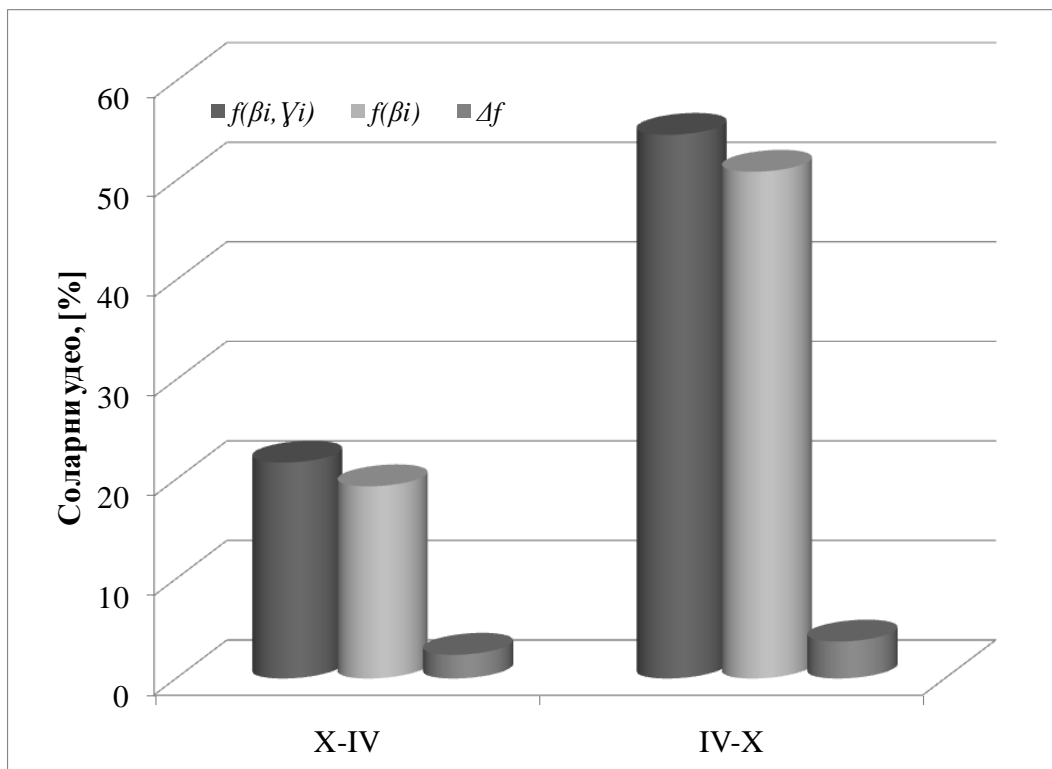
Слика 9.27 приказује да за СК#2 у периоду IV-X, када вредност β_h и γ_h падне испод вредности $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$, количина изгубљеног соларног удела је нижа него када β_h и γ_h пређе вредност $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$. Ако је $\Delta\beta_h = 10^\circ$, $\Delta\gamma_h = 10^\circ$, дефицит соларног удела је око 2% у оба случаја. Ако је $\Delta\beta_h = 22.5^\circ$ и $\Delta\gamma_h = 22.5^\circ$, дефицит соларног удела је око 17 % за вредност β_h и γ_h која је испод вредности $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ док је дефицит соларног удела једнака такође 13 % за вредност β_h и γ_h која је изнад вредности $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$.



Слика 9.27 - Дефицит соларног удела у функцији одступања углова од оптималне позиције соларног пријемника

Слика 9.27 приказује да за СК#2 у периоду X-IV када вредност β_h и γ_h падне испод вредности $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$, количина изгубљеног соларног удела је нижа него када β_h и γ_h пређе вредност $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$. Ако је $\Delta\beta_h = 10^\circ$ и $\Delta\gamma_h = 10^\circ$, онда дефицит соларног удела има вредност 6 % када вредност β_h и γ_h падне испод вредности $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$, вредност 4.5 % када β_h и γ_h пређе вредност $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$ за вредност $\Delta\beta_h$ и $\Delta\gamma_h$. Ако је $\Delta\beta_h = 22.5^\circ$ и $\Delta\gamma_h = 22.5^\circ$, онда је дефицит соларног

удела око 26.5 % за вредност β_h и γ_h испод вредност $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$, док је дефицит соларног удела око 24.5 % за вредност β_h изнад $\beta_{h,opt}$ и $\gamma_{h,opt}$.



Слика 9.28 - Разлика соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду

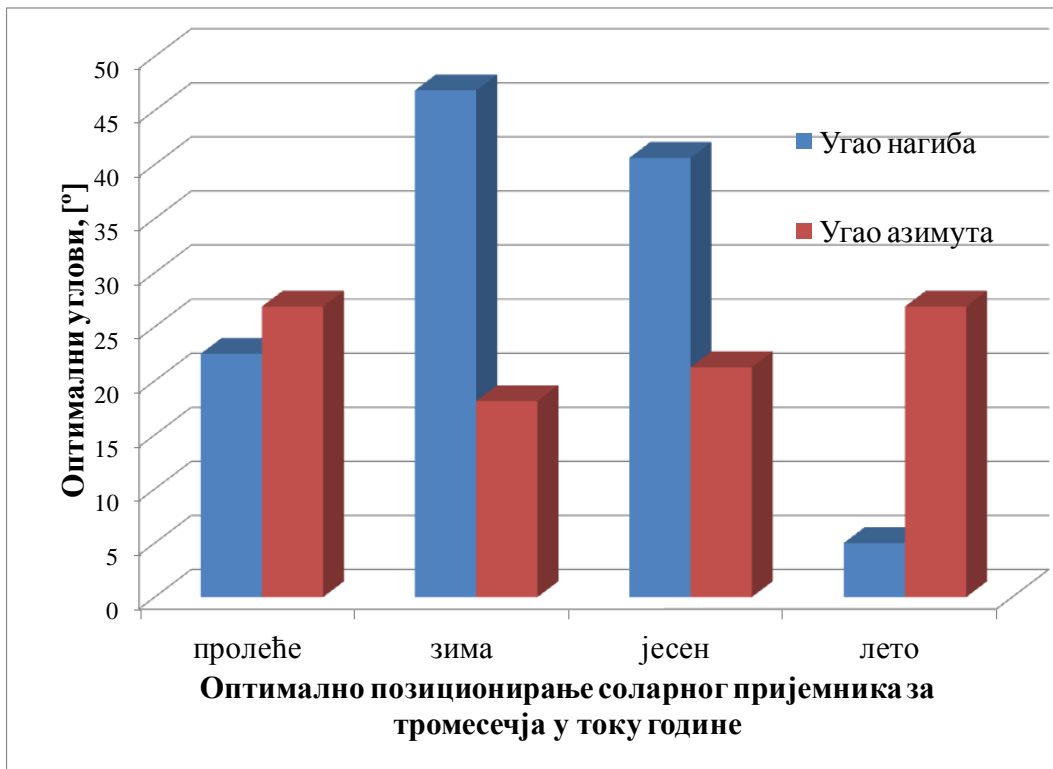
На слици 9.28 приказане су разлике вредности соларних удела уколико оптимизујемо $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду.

У току првог периода, X-IV (који укључује зимске месеце) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 19.3$ %, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 21.7$ % истовременим оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ и разлика тих соларних удела је 2.4 % што је за 12.35 % веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$.

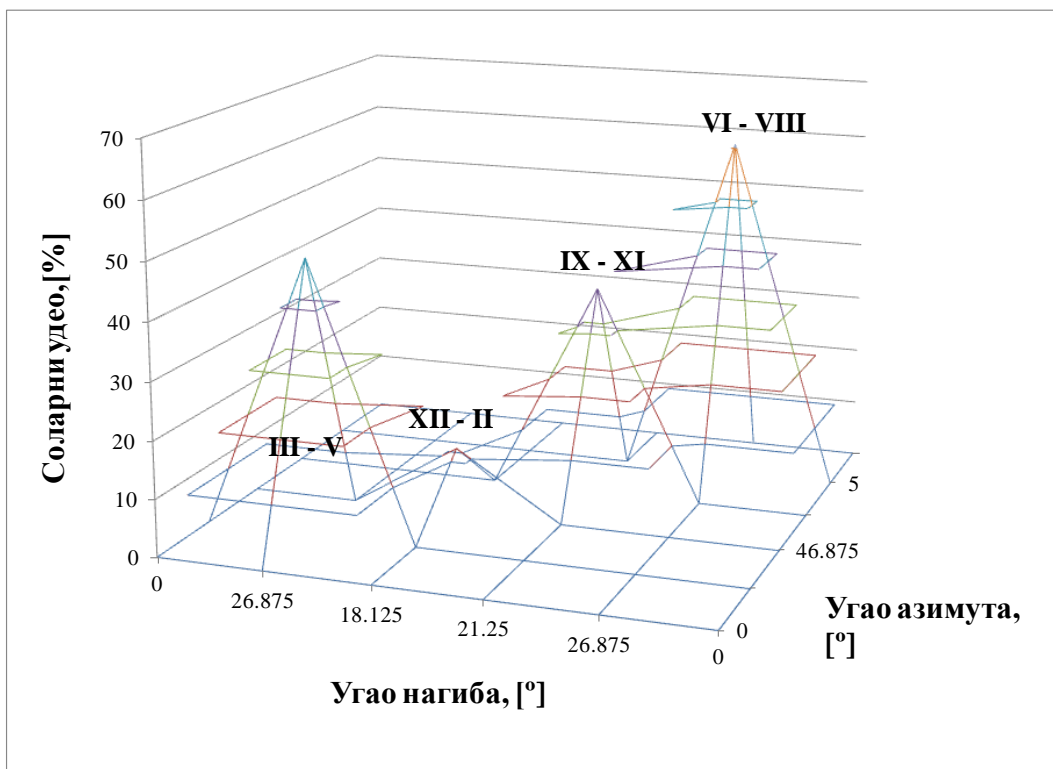
Током другог периода, IV-X (који укључује летње месеце) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 50.9$ %, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 54.6$ % истовременим оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ и разлика тих соларних удела је 3.7 % што је за 7.3 % веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$. Током првог периода имамо веће губитке вредности функције циља, соларног удела за око 5 % у односу на други период.

9.2.3 Соларни систем за загревање СТВ са СК#4

На слици 9.29 за СК#4 приказана су 4 дијаграма оптималног позиционирања (по једна за сваки период) за град Београд. Слика 9.29 представља f_q као функцију β_q и γ_q соларног пријемника за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду. На слици 9.30 свака пирамида има своју максималну вредност која одговара вредностима $\beta_{q,opt}$, $\gamma_{q,opt}$ и $f_{q,max}$ соларног система за загревање СТВ.



Слика 9.29 - Оптимально позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду



Слика 9.30 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду

СК#4 мења четири угла нагиба и азимута годишње - један нагиб и један азимут на свака три месеца. То значи да функционише са четири $\beta_{q,opt}$ и четири $\gamma_{q,opt}$ током године. СК#4 ради са првим $\beta_{q,opt}$ и $\gamma_{q,opt}$ у периоду XII-II (90 дана од 1. децембра до 28. фебруара),

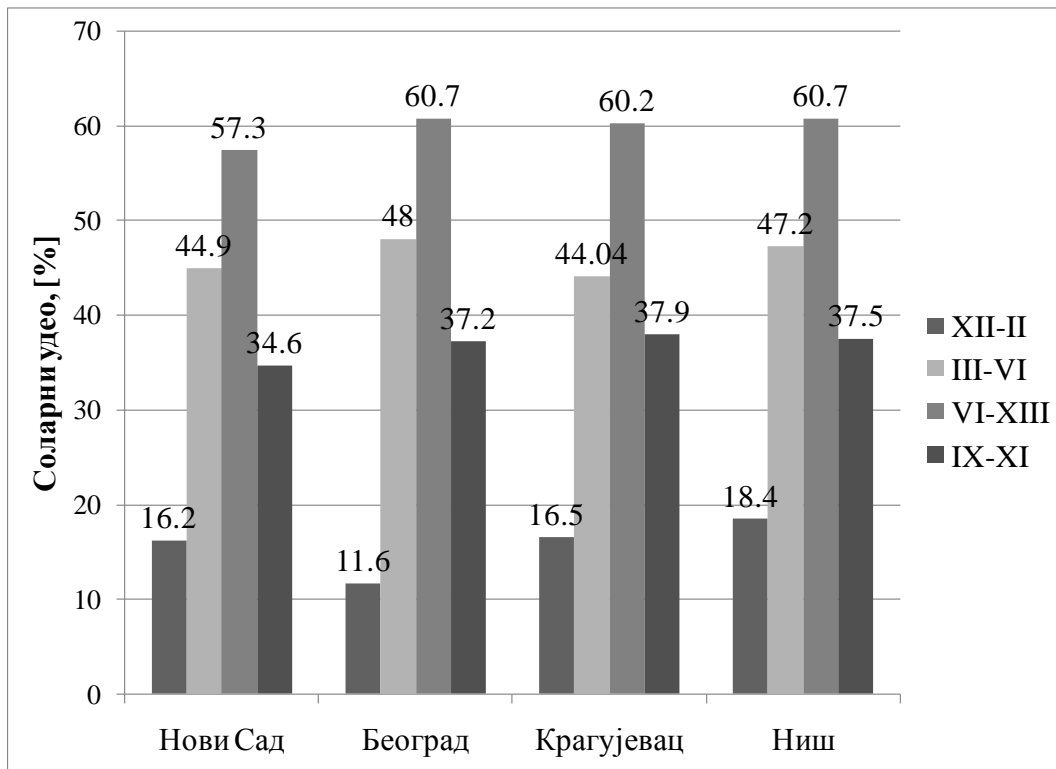
са другим $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ у периоду III-V (92 дана од 1. марта до 28. фебруара), са трећим $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ у периоду VI-VIII (92 дана од 1. јуна до 31. августа) и са четвртим $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ у периоду IX-XI (91 дан од 1. септембра до 30. новембра). Током периода XII-II (зима), соларни систем за загревање СТВ произведе $f_{q,max}$ од 11.6 % са $\beta_{q,opt} = 46.875^\circ$ и $Y_{q,opt} = 18.125^\circ$. Током периода III-V (пролеће), соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max}$ од 48 % са $\beta_{q,opt} = 22.5^\circ$ и $Y_{q,opt} = 26.875^\circ$. Током периода VI-VIII (лето), соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 60.7$ % са $\beta_{q,opt} = 5^\circ$ и $Y_{q,opt} = 26.875^\circ$. Током периода IX-XI (јесен) соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 37.2$ % са $\beta_{q,opt} = 40.625^\circ$ и $Y_{q,opt} = 21.25^\circ$. Може се закључити да је током периода VI-VIII $f_{q,max}$ око 5.23 пута већи него у периоду XII-II. У табели 9.7 су приказане вредности $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{q,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#4 у Београду.

Табела 9.7 - $\beta_{q,opt}$ и $Y_{q,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{q,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#4

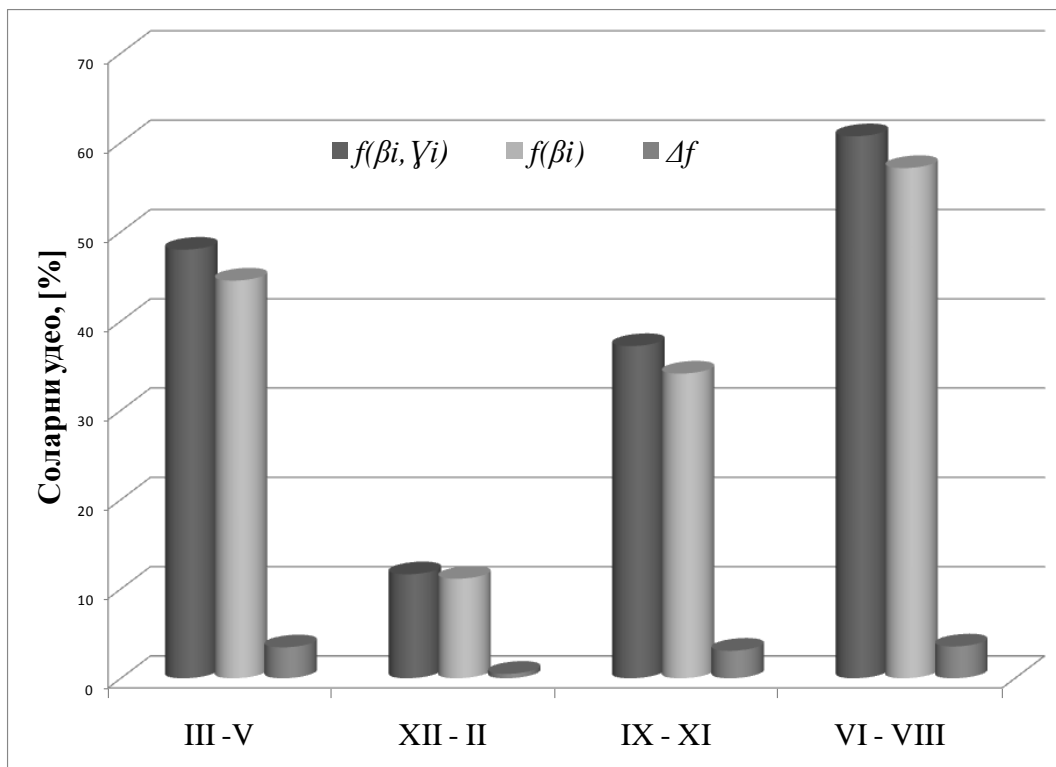
Соларни пријемник са СК#4	$\beta_{q,opt}, [^\circ]$	$Y_{q,opt}, [^\circ]$	$f_{q,max}, [\%]$
III - V	22.5	26.875	48.0
XII - II	46.875	18.125	11.6
IX - XI	40.625	21.25	37.2
VI - VIII	5	26.875	60.7

На слици 9.31 су показане оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#4, за неколико градова у Србији.

На слици 9.32 приказане су разлике вредности соларних удела уколико оптимизујемо $f_i(\beta_i)$ или оптимизујемо $f_i(\beta_i, Y_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду. У току периода, XII-II (зима) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 11.14$ % док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 11.6$ % оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$, и Δf је 0.46 % што је за 4.4 % веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$. Током периода, III-V (пролеће) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 44.5$ %, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 48$ % оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$ и Δf је 3.5 % што је за 7.7 % веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$. Током периода, VI-VIII (лето) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ за соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 57.32$ %, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 60.7$ % оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$ и Δf је 3.38 % што је за 6.2 % веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$. Током периода, IX-XI (јесен) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 34.66$ %, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 37.2$ % оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$, и Δf је 2.54 % што је за 9 % веће у односу на случај када оптимизујемо само угао нагиба.



Слика 9.31 - Оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#4, за неколико градова у Србији



Слика 9.32- Разлика соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

Током свих тромесечја имамо веће вредности функције циља, соларног удела за од 2 - 4 % оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Највећи губитак соларне енергије, а самим тим и соларног удела, имамо у јесен и пролеће оптимизацијом $f_i(\beta_i)$ и то за 9 % и 7.7 % респективно.

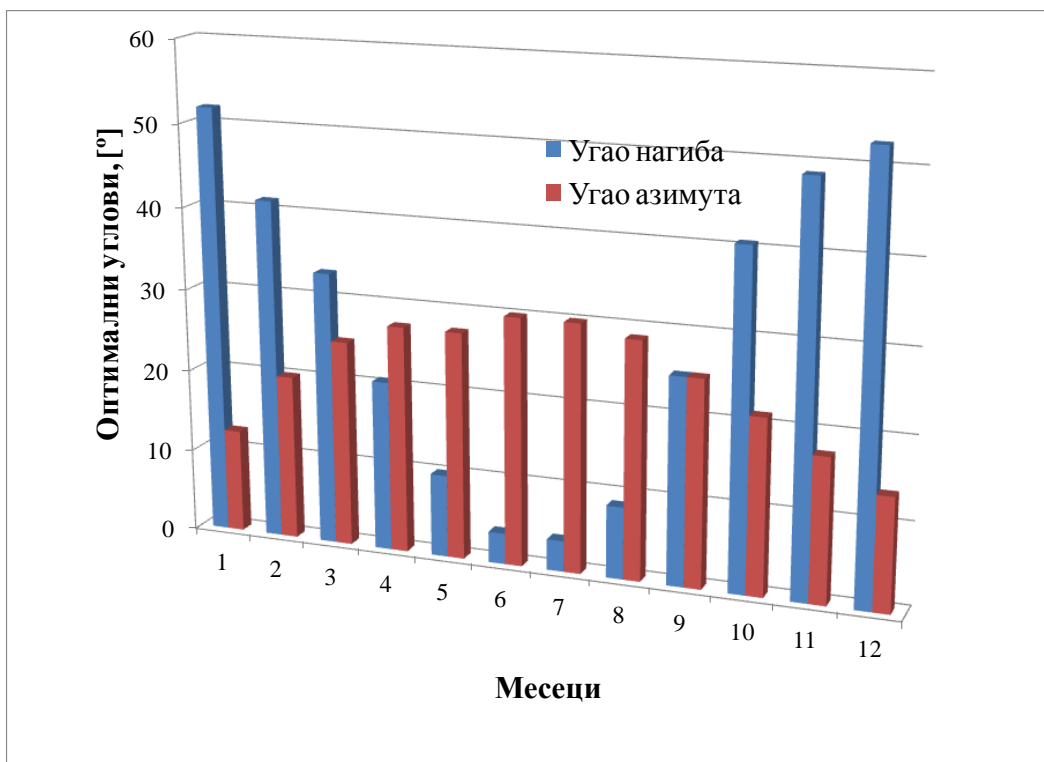
Табела 9.8 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла нагиба $|\beta - \beta_{opt}| = 22.5^\circ$ и азимута $|\gamma - \gamma_{opt}| = 22.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

Период	$\beta_{q,opt}$, [°]	$\gamma_{q,opt}$, [°]	$f_{q,max}$, [%]	Дефицит соларног удела, [%]	
				β_q одступа испод $\beta_{q,opt}$	β_q одступа изнад $\beta_{q,opt}$
III - V	22.5	26.875	48.0	23.4	22.1
XII - II	46.875	18.125	11.6	9.23	21.5
IX - XI	40.625	21.25	37.2	28.9	26.7
VI - VIII	5	26.875	60.7	18.8	19.3

Дефицит соларног удела је дат за све тромесечне периоде у табели 9.8 за вредност β_q вишу за 22.5° од вредности $\beta_{q,opt}$ и за вредност γ_q вишу за 22.5° од вредности $\gamma_{q,opt}$, за СК#4 за Београд у Србији. За период IX-XI, дефицит соларног удела је већи када је β_q и γ_q изнад вредности $\beta_{q,opt}$ и $\gamma_{q,opt}$ него када је вредност β_q и γ_q за 22.5° већа од вредности $\beta_{q,opt}$ и $\gamma_{q,opt}$. Угао од 22.5° је узет насумично (под претпоставком) са циљем да се добију довољно велике разлике у вредности f и да би се разликовале у употреби соларног пријемника у различитим годишњим добима.

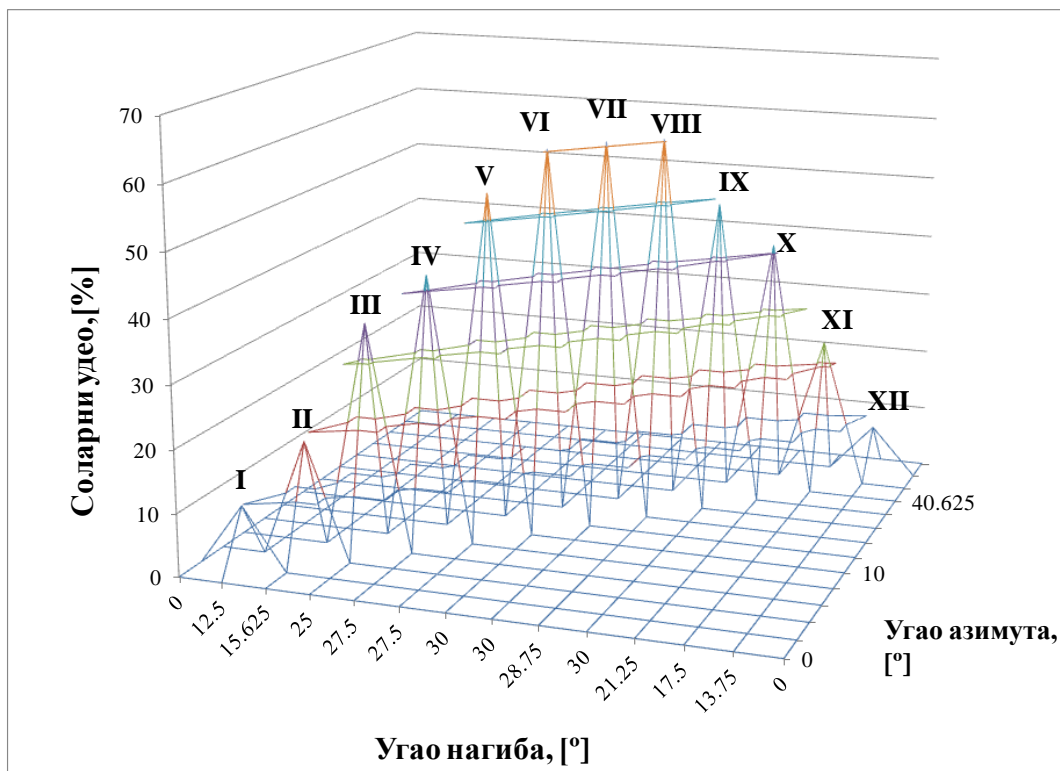
9.2.4 Соларни систем за загревање СТВ са СК#12

СК#12 годишње мења 12 нагиба и 12 углова азимута - један нагиб $\beta_{m,opt}$ и један угао азимута $\gamma_{m,opt}$, сваког месеца. Затим, $\beta_{m,opt}$ и $\gamma_{m,opt}$ су добијени тако да се оставри производња максималне количине топлоте од соларне енергије на месечном нивоу да би се достигла максимална вредност $f_{m,max}$.



Слика 9.33 - Оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

На слици 9.33 приказано је оптимално позиционирање за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 у Београду.



Слика 9.34 - Соларни удео у функцији угла нагиба и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Слика 9.34 представља $f_{m,max}$ као функцију $\beta_{m,opt}$ и $\gamma_{m,opt}$ соларног пријемника, тј. максимални соларни удео је дат као функција оптималних позиција за сваки месец. На слици су пирамидама представљени соларни удели који се добијају ако СК#12 у својој примени има другачију позицију (нагиб и азимут). Пирамиде на слици 9.34 су добијене уз помоћ израчунатих резултата ($f_i(\beta_i, \gamma_h)$) за СК#12) у поступку за одређивање приближавања оптималном решењу по принципу *Hooge Jeeves* алгоритму оптимизације. Показано је да се опсег вредности $f_{m,max}$ креће између 60.8 % (у августу) и 7.8 % (у децембру).

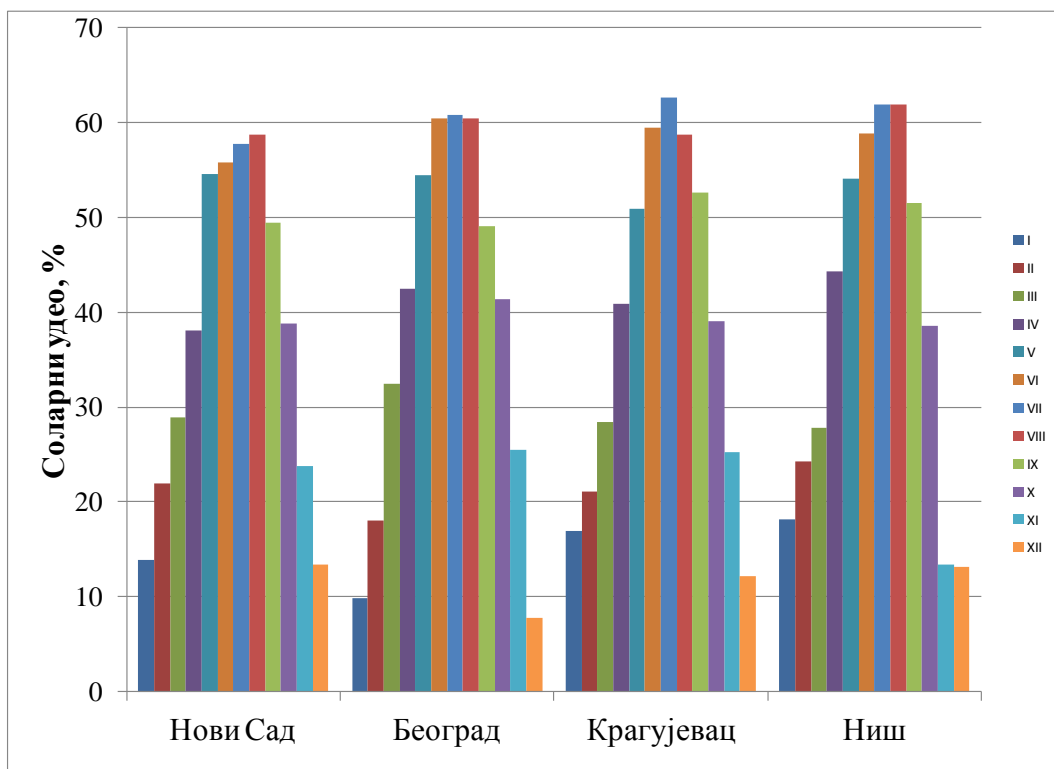
У табели 9.9 дате су $\beta_{m,opt}$ и $\gamma_{m,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{m,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#12 у Београду.

Ако соларни пријемник са СК#12 не заузме оптималне положаје у својој примени, мања количина електричне енергије ће бити избегнута употребом соларног система за загревање СТВ. Ако соларни пријемник нема максималне вредности углова током његовог рада, имаћемо и губитке у генерисању топлотне енергије. Показано је да је опсег вредности $f_{m,max}$ се креће између 60.8 % (у августу) и 7.8 % (у децембру)

Табела 9.9 - $\beta_{m,opt}$ и $\gamma_{m,opt}$ за које би соларни пријемник генерисао максималну количину топлоте и имао $f_{m,max}$ за соларни систем за загревање СТВ за СК#12

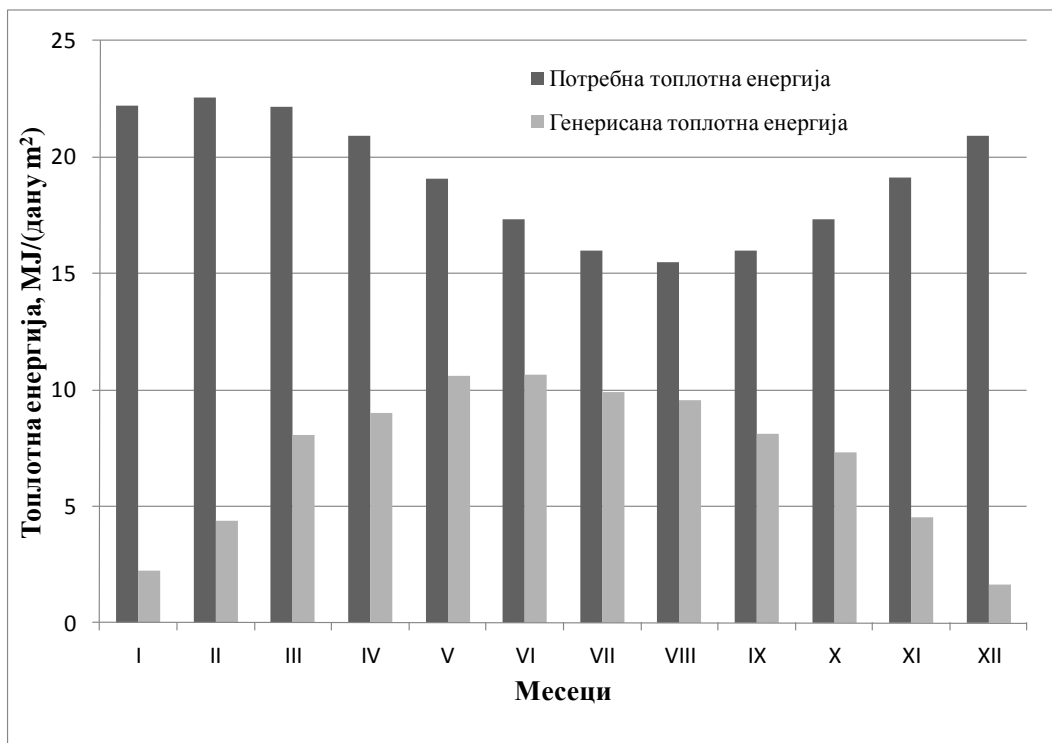
Соларни пријемник са СК#12	$\beta_{m,opt}$, [°]	$\gamma_{m,opt}$, [°]	$f_{m,max}$, [%]
I	51.875	12.5	9.8
II	41.25	20	18.0
III	33.125	25	36.0
IV	20.625	27.5	42.5
V	10	27.5	54.4
VI	3.75	30	60.4
VII	3.75	30	60.8
VIII	8.75	28.75	60.4
IX	25	25	49.0
X	40.625	21.25	41.4
XI	48.75	17.5	23.8
XII	52.5	13.75	7.8

На слици 9.35 су показане оптималне вредности соларног удела за соларни систем за загревање СТВ са СК#12, за неколико градова у Србији.



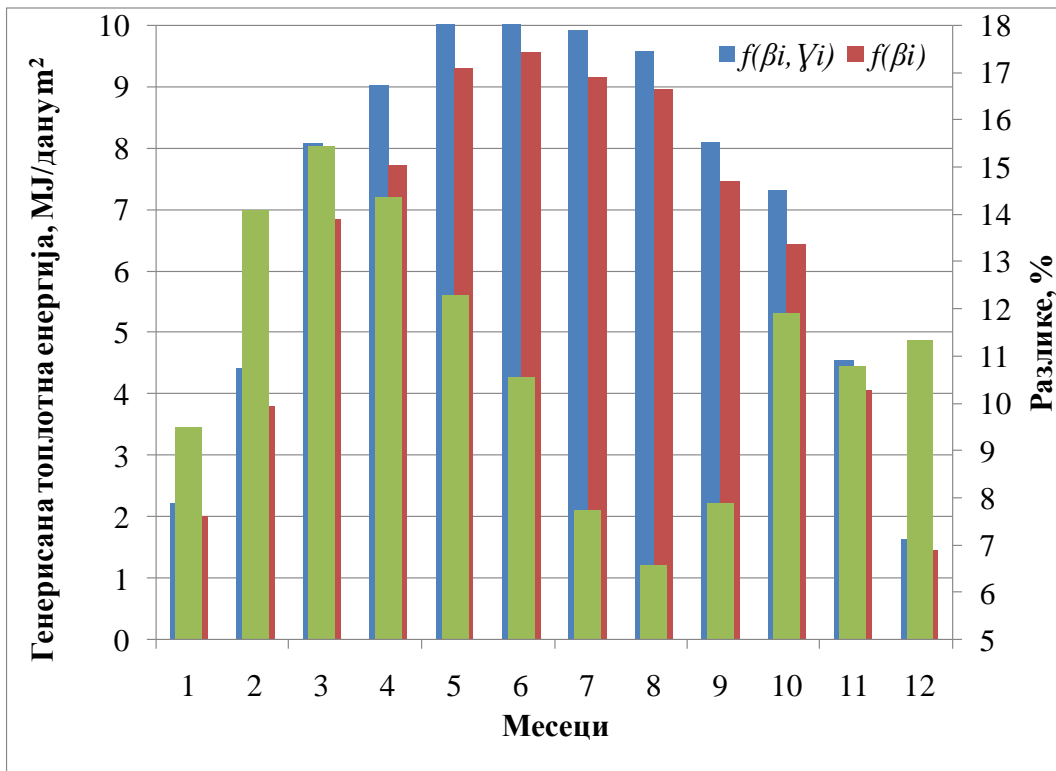
Слика 9.35 - Оптималне вредности соларног удела, $f_{m,max}$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12, за неколико градова у Србији

Слика 9.36 показује дневне просечне вредности у току месеца две променљиве за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 оптимизујући $\beta_{m,opt}$ и $\gamma_{m,opt}$ истовремено. Прва променљива је потребна топлотна енергија за један месец $E_{1,tot}$ за грејање санитарне топле воде. Друга променљива је максимална количина генерисане топлотне енергије $E_{1,m}$ која се користи за грејање санитарне топле воде. Овде, $E_{1,m}$ има максималну вредност у јулу, а истовремено има минималну вредност у децембру. $E_{1,tot,m}$ има минималну вредност у августу, а максималну вредност у фебруару. Осим тога, $E_{1,m} < E_{1,tot,m}$ за све месеце, $E_{1,tot,m} - E_{1,m}$ има минималну вредност у току летњих месеци, а максималну вредност у току зимских месеци.

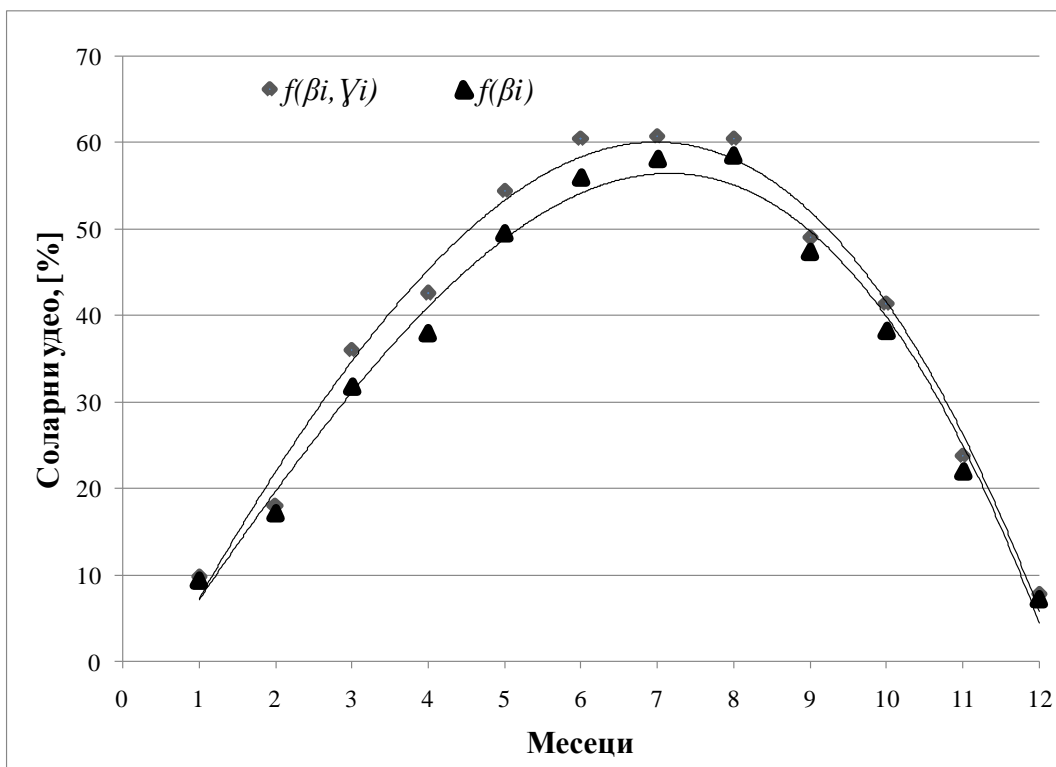


Слика 9.36 - Потребна топлотна енергија за грејање санитарне топле воде и максимални износ генерисане топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Слика 9.37 показује максимални износ генерисане топлотне енергије, оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12. Вредности су свакодневне и дате су за сваки месец. Такође, дат је приказ разлика, процентуални губитак генерисања топлотне енергије. Уколико соларни пријемник поставимо на оптимални положај, добијамо веће дневне вредности генерисане топлотне енергије у односу на вредности генерисаних топлотних енергија по месецима, када оптимизујемо $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Губитак је у распону од 6.5 % до 15.5 % што говори да оптимално позиционирање мора бити на основу ригорозних прорачуна, а не на бази искустава. Овакви прорачуни доводе до унапређења рада соларних енергетских система.



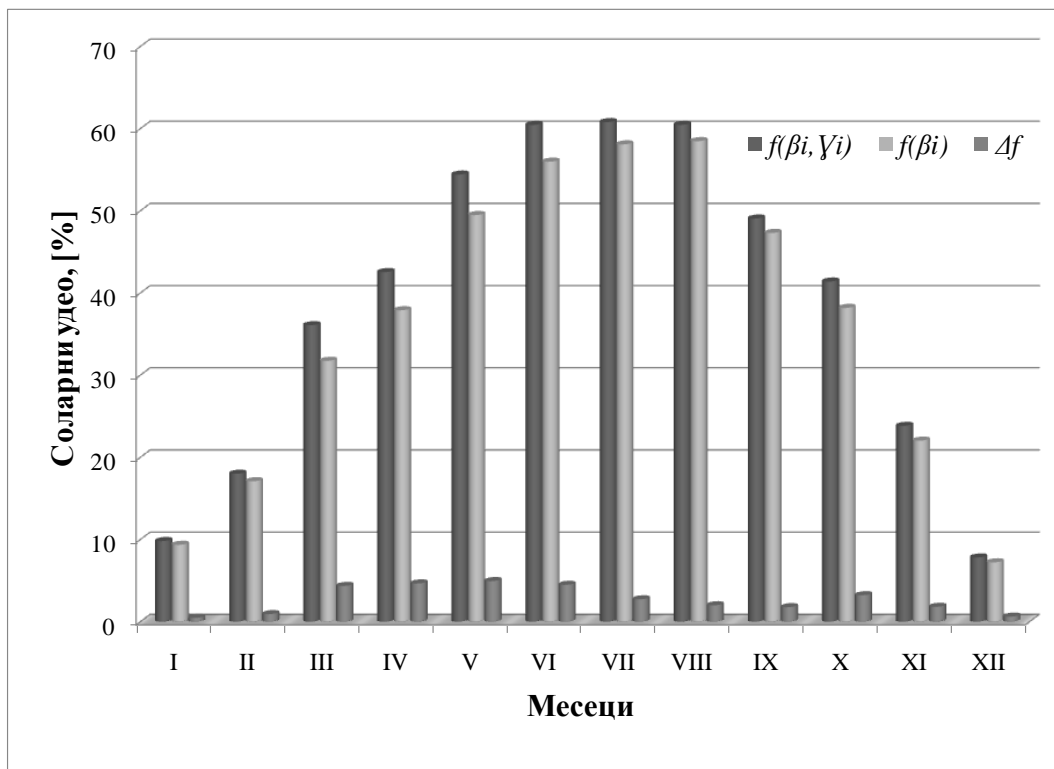
Слика 9.37 - Максимални износ генерисане топлотне енергије и губитак при генерисању топлотне енергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#12, добијених оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$



Слика 9.38 - Оптималне вредности $f_{m,opt}$ оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

На слици 9.38 приказане су максималне вредности соларних удела при чему је једна крива добијена за случај f_m у функцији угла нагиба β_m и угла азимута γ_m , а друга крива

добијена за случај f_m у функцији угла нагиба β_m . Показано је да су вредности добијене за случај $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ дају веће вредности соларних удела по месецима. На слици 9.39 је графички приказана месечна разлика соларних удела, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 у Београду.



Слика 9.39 - Разлике соларних удела, оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ и оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Табела 9.10 - Процентуални губитак у вредности f_i различитих оптимизација за соларни систем за загревање СТВ за СК#12 у Београду

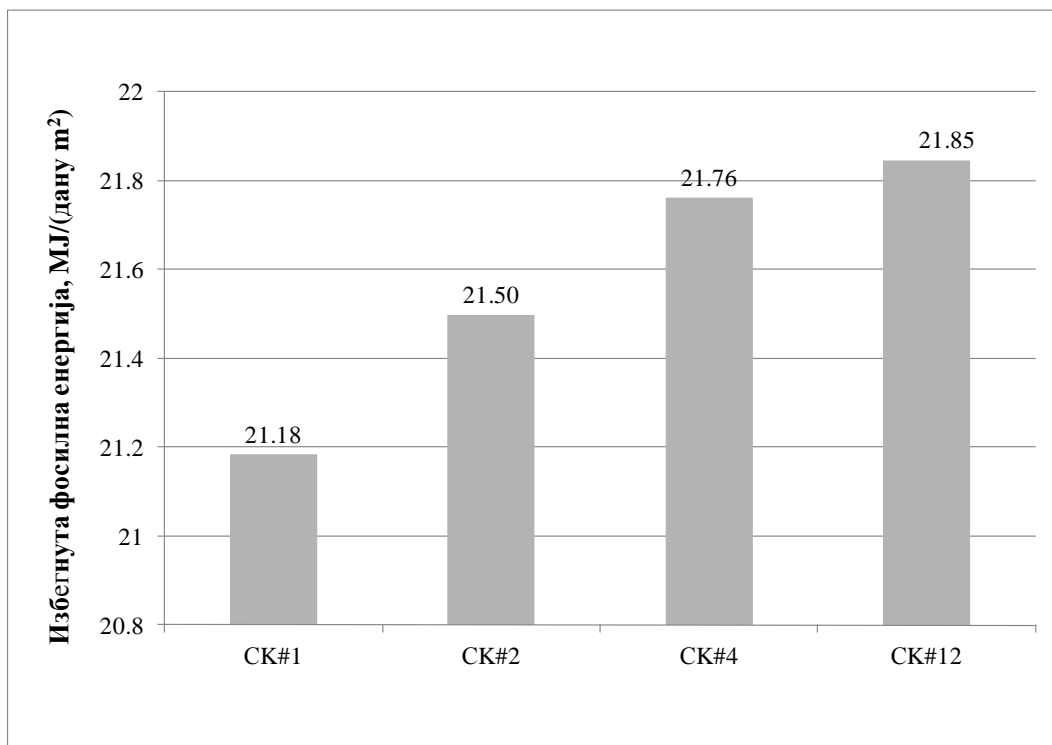
Соларни пријемник са СК#12	$f_i(\beta_i)$, [%]	$f_i(\beta_i, \gamma_i)$ [%]	Процентуални губитак оптимизације, [%]
I	9.3	9.8	4.9
II	17.1	18.0	5.3
III	31.7	36.0	13.6
IV	37.9	42.5	12.2
V	49.5	54.4	9.9
VI	55.9	60.4	7.9
VII	58.1	60.8	4.6
VIII	58.4	60.4	3.4
IX	47.3	49.0	3.7
X	38.2	41.4	8.4
XI	22.0	23.8	8.2
XII	7.2	7.8	8.2

Највеће вредности разлика имамо у мају $\Delta f_m = 5 \%$, а најмање у децембру $\Delta f_m = 0.5 \%$. У табели 9.10 приказане су вредности процентуалних губитака оптимизације $f_m(\beta_m, \gamma_m)$ у односу на оптимизацију $f_m(\beta_m)$.

9.2.5 Поређење различитих соларних пријемника за случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$

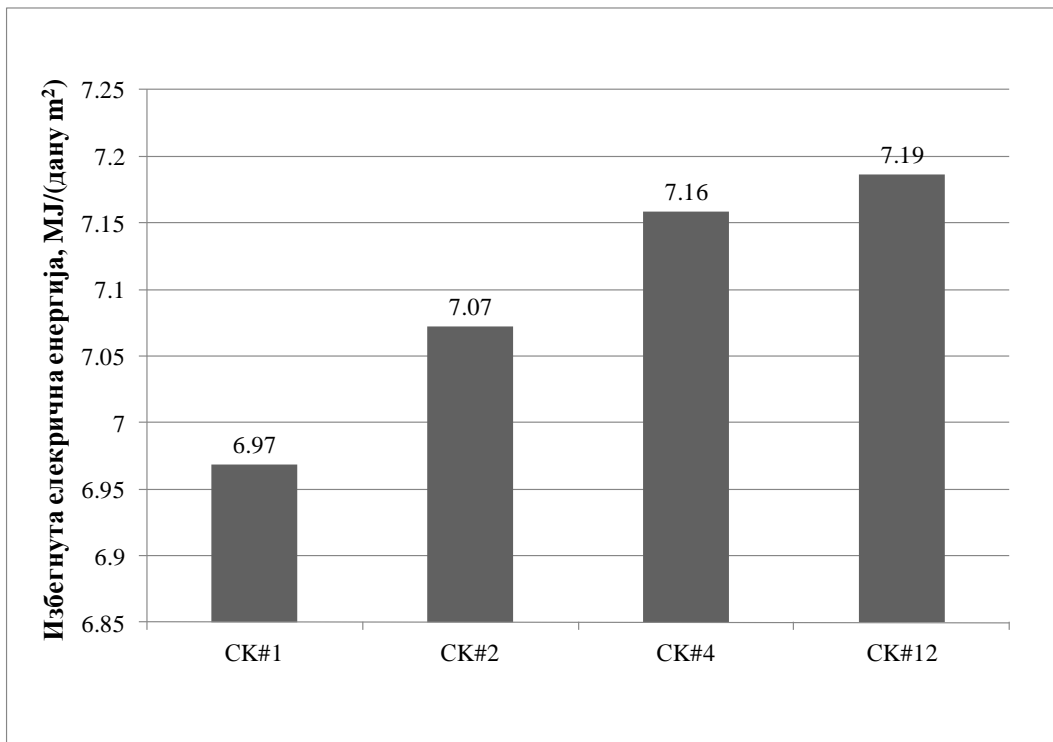
Током примене, соларни системи за загревање СТВ са различитим соларним пријемницима (СК) за случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, могу да произведу различите количине топлотне енергије из соларне енергије. Као резултат тога могу се добити различите количине избегнуте електричне енергије или избегнуте фосилне енергије, као и различите вредности избегнуте ексергије, а емитују се и различите количине CO_2 .

9.2.5.1 Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$

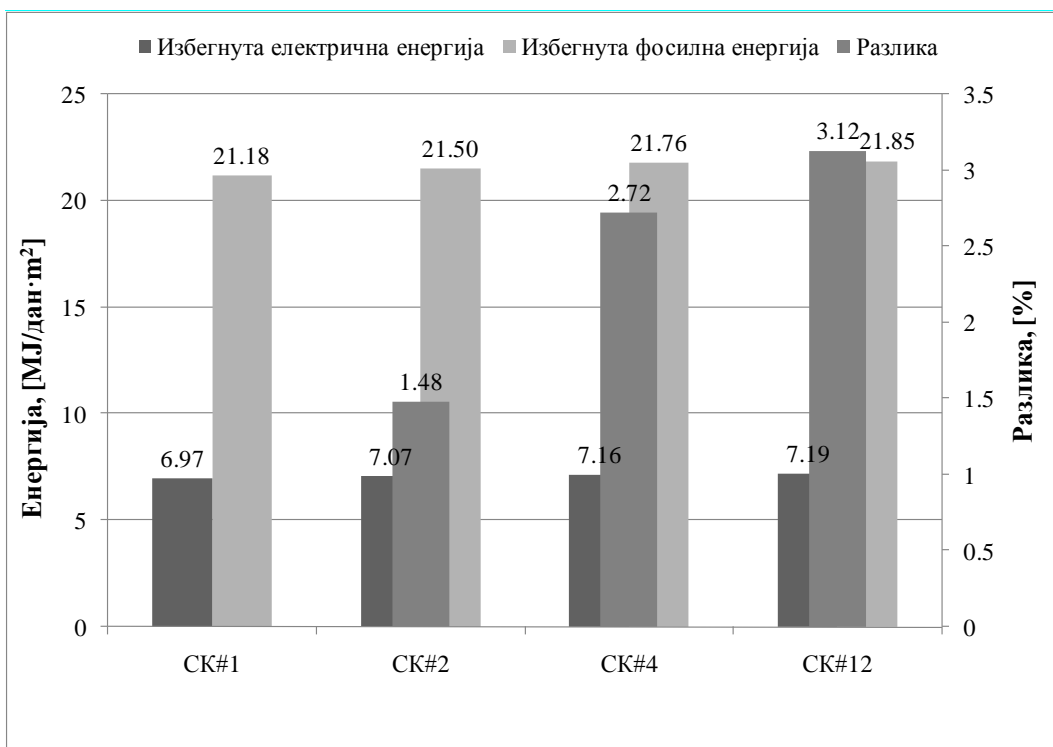


Слика 9.40 - Максималне количине избегнуте фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК

Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите соларне системе за загревање СТВ који су коришћени у Београду, оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ су дате на слици 9.40 и слици 9.41. Фактор фосилне енергије $C_f = 3.04$ је добијен на основу [92]. Такође, на слици 9.42 је приказана годишња разлика у максималној количини избегнуте електричне енергије за различите соларне системе за загревање СТВ и оне са стационарним соларним пријемником оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном положају (нагибу и азимуту) у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{opt} = 28.75^\circ$ и $\gamma_{opt} = 25^\circ$ и сходно томе $f = f_{max} = 35.8 \%$ су дате за Београд, Србија.



Слика 9.41 - Максималне количине избегнуте електричне енергије на годишњем нивоу за различите СК



Слика 9.42 - Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК

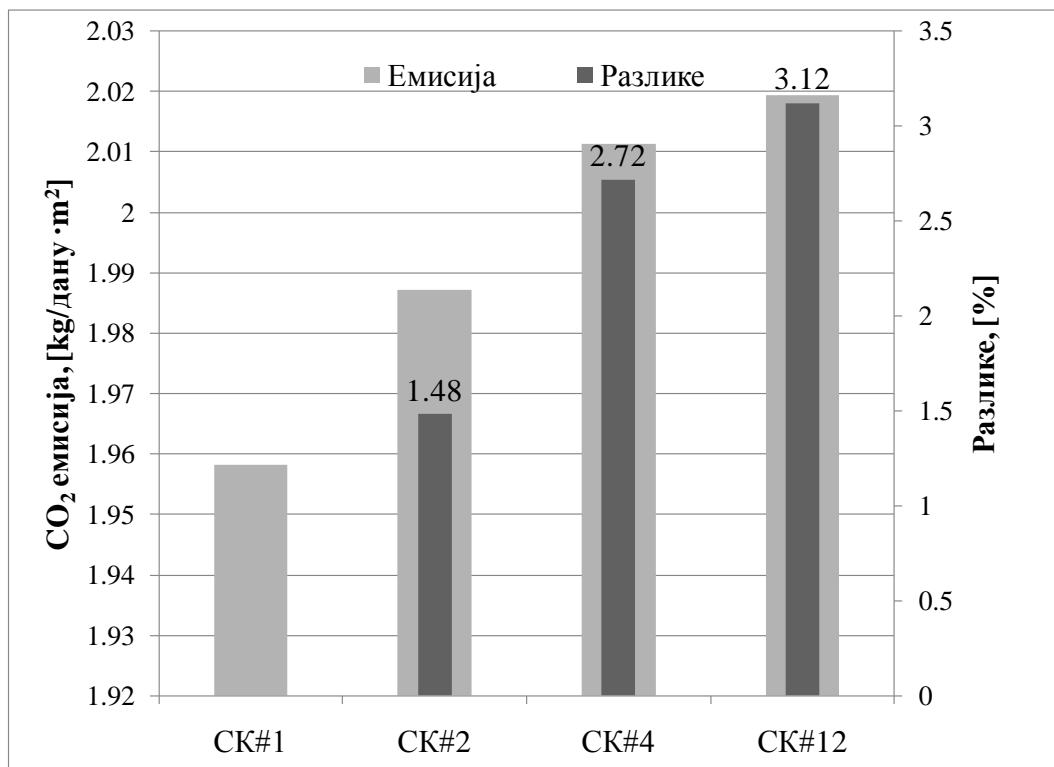
За СК#2, количина избегнуте електричне енергије је за 1.48 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, количина избегнуте електричне енергије је за 2.72 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 количина избегнуте електричне енергије је за око 3.12 % виша од

оне која се постигне са стационарним соларним пријемником. Узевши у обзир ове податке, израда СК#2 уместо стационарног непокретног соларног пријемника може бити корисна и за случај добијен оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ у поређењу са случајем када је оптимизован $f_i(\beta_i)$. У току истраживања закључујемо да СК#4 и СК#12 не производе много више уштеде од СК#2. У овим анализама треба имати у виду да цена праћења тј. економски аспект није узет у обзир.

Готово исти коментари се могу дати за максималну количину избегнуте фосилне енергије, будући да је ова варијабла сразмерна избегнутој електричној енергији.

9.2.5.2 Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$

Максималне вредности избегнуте емисије CO_2 на годишњем нивоу приказане су на слици 9.43 за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12, за Београд. Такође, годишња разлика максималних вредности избегнуте емисије CO_2 за различите соларне системе за загревање СТВ са различитим СК поређени су са СК#1, оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_h)$. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном положају (нагибу и азимуту) у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{opt} = 28.75^\circ$ и $\gamma_{opt} = 25^\circ$ и сходно томе $f = f_{max} = 35.8\%$ су дате за Београд, Србија.



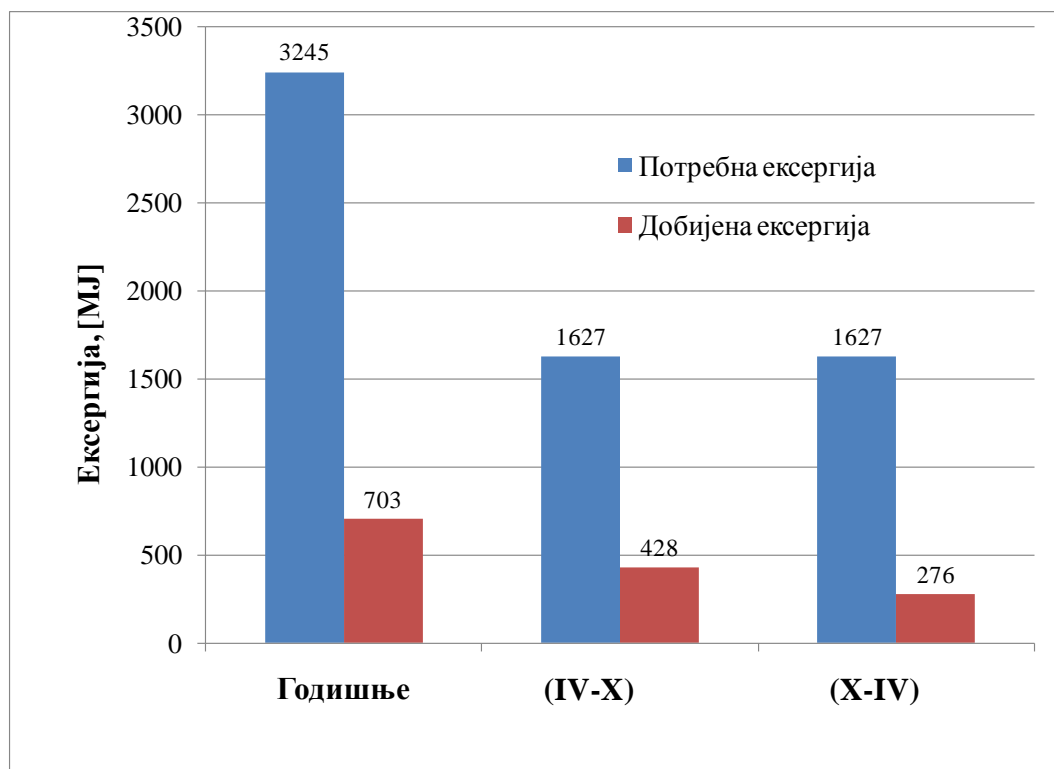
Слика 9.43 - Максимална годишња избегнута емисија CO_2 , у функцији броја оптималних положаја соларног пријемника, за соларни систем за загревање СТВ у току године

За СК#2, разлика је за 1.48 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, разлика је за 2.72 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 разлика CO_2 је за око 3.12 % виша од оне која се постигне са стационарним соларним пријемником.

9.2.5.3 Максималне количине избегнуте ексергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2

Ексергетском оптимизацијом је одређена максимална вредност ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање санитарне топле воде. Максимални ексергетски степен ефикасности, аналогно максималној вредности соларног удела у функцији угла нагиба и азимута, постиже се постављањем соларног пријемника на оптимални положај. Вредности соларних удела као функције циља код ексергетске оптимизације су исти као и код енергетске оптимизације.

Дефицит избегнуте ексергије у функцији одступања угла нагиба и азимута при оптималном нагибу и азимуту за Београд показан је у поглављу 9.2.1 и 9.2.2. Анализирајући максималне вредности избегнуте ексергије на годишњем нивоу за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2 за Београд добија се годишња разлика максималних вредности избегнуте ексергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у поређењу са СК#1. За СК#2, разлика је за 7 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном нагибу у току целе године. Вредности $\beta = \beta_{opt} = 28.75^\circ$ и $\gamma_{opt} = 25^\circ$ и сходно томе $f = f_{max} = 35.8\%$ су дате за Београд, Србија.



Слика 9.44 - Потребна и добијена ексергија добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$ за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2

Као један од значајних показатеља ексергетских токова у анализираном соларном систему је однос потребне и добијене ексергије као што је већ раније поменуто. На слици 9.44 су показане вредности потребне и добијене ексергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2 у функцији броја оптималних нагиба и оптималних углова азимута. Стога, имамо да је за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, вредност потребне ексергије 4.6 пута већа од вредности добијене ексергије. За соларни систем за загревање

СТВ са СК#2, за период X-IV када имамо рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла, вредност потребне ексергије је 5.89 пута већа од вредности добијене ексергије, а за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 за период IV-X када имамо рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра, 4.3 пута. Тежња је да се тај однос смањи да би се добиле веће вредности ексергија.

Додатним анализама услед промена потрошње топле воде, температура топле воде у бојлеру, распореда коришћења тј. употребе топле воде од стране крајњих потрошача можемо утицати на смањење овог односа и добијати оптималније вредности ексергетског степена искоришћења соларног система. Ексергетски степен искоришћења, η_x за испитиван соларни систем при већ унапред задатим условима (потрошње топле воде, распореда коришћења топле воде, задате температуре топле воде) има вредност 1.3 % за соларни систем за загревање СТВ са СК#1. Ексергетски степен искоришћења система је нешто већи у односу на *Xiaowu* и *Ben* [93] испитивани соларни систем. Код *Xiaowu* и *Ben* ексергетски степен ефикасности узима вредност 0.77 %. Њихова вредност је нешто мања због лошег квалитета излазне енергије. Акумулациони бојлер показује велике губитке ексергије због непотребног мешања воде и евентуално га је могуће редизајнирати да би се смањило непотребно мешање. Ексергетску ефикасност система за грејање санитарне воде је могуће повећати још променом димензија пријемне соларне плоче као на пример у [93]. Ексергетска ефикасност система за грејање санитарне воде се такође може повећати повећањем и броја слојева покривача. Максимирањем соларног удела у овој докторској дисертацији, уз максималну ефикасност соларног пријемника добијају се и веће вредности ексергетске ефикасности соларног система за грејање СТВ. Водећи рачуна у истраживању о ексергетским токовима, који су описани у глави 8.2. ексергетска ефикасност система за грејање санитарне воде, када првенствено користимо СК#2, је још повољнија.

9.3 Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$

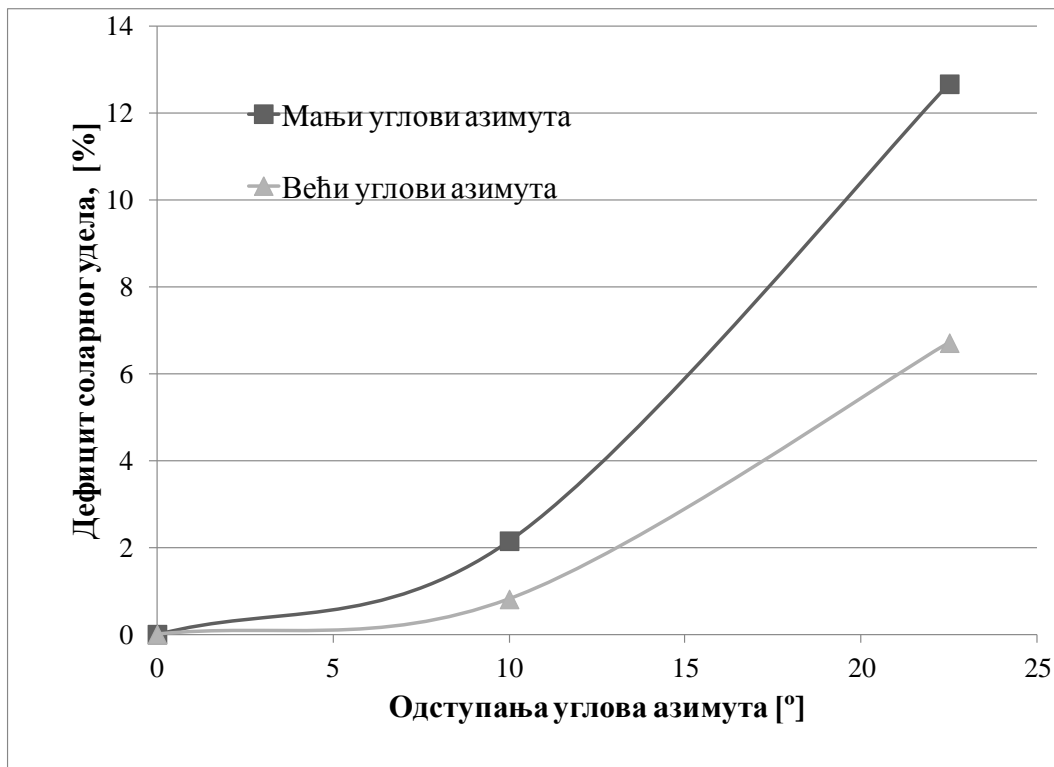
Истраживања показују четири различита соларна система за загревање санитарне топле воде и то СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12. Њихови соларни пријемници су окренути у правцу север-југ.

Ови системи се разликују у дизајну својих носача који им омогућавају да имају различите вредности азимута соларних пријемника Y_i , а $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ у току године. СК#1 је систем који има стационарни соларни пријемник и његов нагиб је $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и угао азимута $Y_{a,opt}$. СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи угао нагиба $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и два азимута $Y_{h,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#4 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи угао нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и четири азимута $Y_{q,opt}$ годишње - по један на три месеца. СК#12 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи угао нагиба $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и 12 азимута $Y_{m,opt}$ годишње - по један за сваки месец.

Овом приликом је за сваки соларни систем за грејање санитарне топле воде израчунат соларни удео у функцији угла нагиба и угла азимута, користећи се одговарајућим симулационим и оптимизационим рутинама са модификованом методологијом *Hooke Jeeves* алгоритма.

9.3.1 Соларни систем за загревање СТВ са СК#1

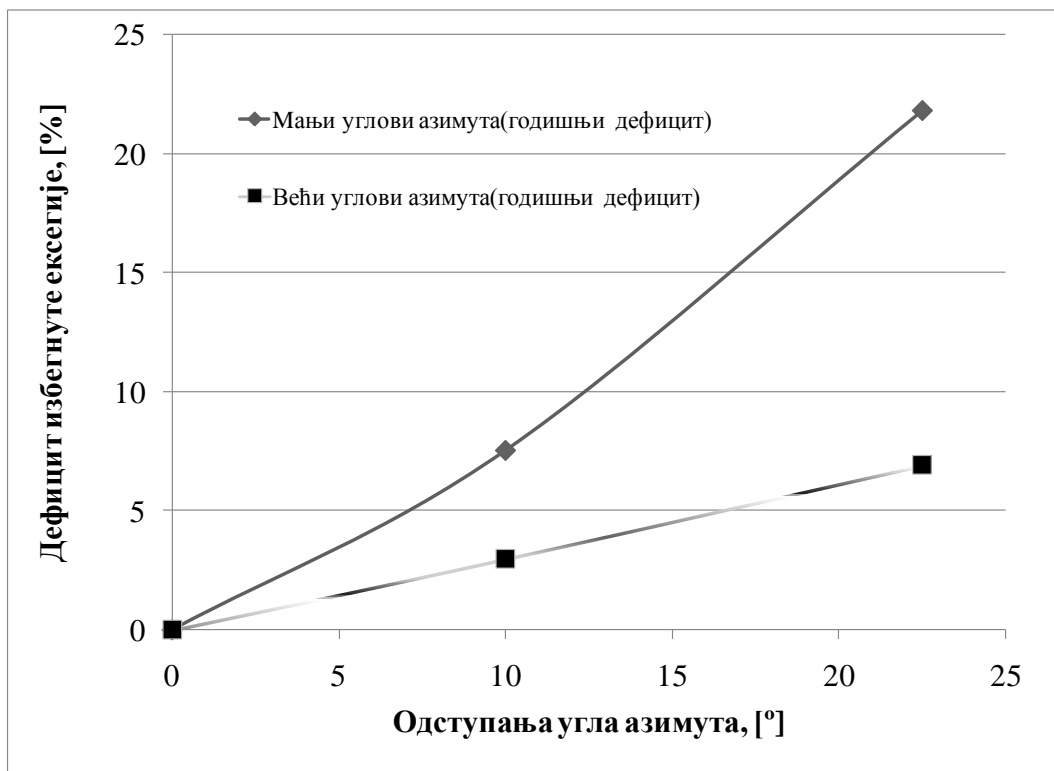
Истраживан је соларни систем за загревање СТВ са СК#1 који има стационарни соларни пријемник који годишње функционише на једном нагибу $\beta_{a,opt}$ и у једном углу азимута $\gamma_{a,opt}$. Вредностима за $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_{a,opt} = 25.625^\circ$ је одговарајући $f_{a,max} = 35.5\%$. Соларни пријемник постављен на $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ годишње генерише максималну количину топлоте и има $f_{a,max}$ за соларни систем за загревање СТВ. Његова једначина је приказана у табели 9.12 као полином трећег реда. Ови резултати истраживања су урађени за метеоролошке услове Београда.



Слика 9.45 - Дефицит соларног удела наспрам одступања угла од оптималне позиције соларног пријемника

Слика 9.45 приказује да за СК#1 када вредност β_a и γ_a падне испод вредности $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$ и $\Delta\gamma_a$, соларни удео је виши него у случају када вредност β_a и γ_a пређе вредност $\beta_{a,opt}$ и $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\beta_a$, односно $\Delta\gamma_a$. Ако је $\Delta\beta_a = 10^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 10^\circ$, дефицит соларног удела је између 1 % и 2 %. Ако је $\Delta\beta_a = 22.5^\circ$ и $\Delta\gamma_a = 22.5^\circ$, дефицит соларног удела је око 6.5 % за вредност β_a , односно γ_a која је испод вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$ док је дефицит соларног удела око 12.5 % за вредност β_a , односно γ_a која је изнад вредности $\beta_{a,opt}$, односно $\gamma_{a,opt}$.

Слика 9.46 приказује да за СК#1 када вредност $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и γ_a падне испод вредности $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\gamma_a$, избегнута ексергија је виша него у случају када вредност γ_a пређе вредност $\gamma_{a,opt}$ за вредност $\Delta\gamma_a$. Ако је $\Delta\gamma_a = 10^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 6.5 % за вредност γ_a која је изнад вредности $\gamma_{a,opt}$, док је дефицит избегнуте ексергије око 2.5 % за вредност γ_a која је испод вредности $\gamma_{a,opt}$. Ако је $\Delta\gamma_a = 22.5^\circ$, дефицит избегнуте ексергије је око 6.5 % за вредност γ_a која је изнад вредности $\gamma_{a,opt}$ док је дефицит избегнуте ексергије око 22.5 % за вредност γ_a која је испод вредности $\gamma_{a,opt}$.



Слика 9.46 - Дефицит избегнуте ексергије наспрам одступања угла азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$

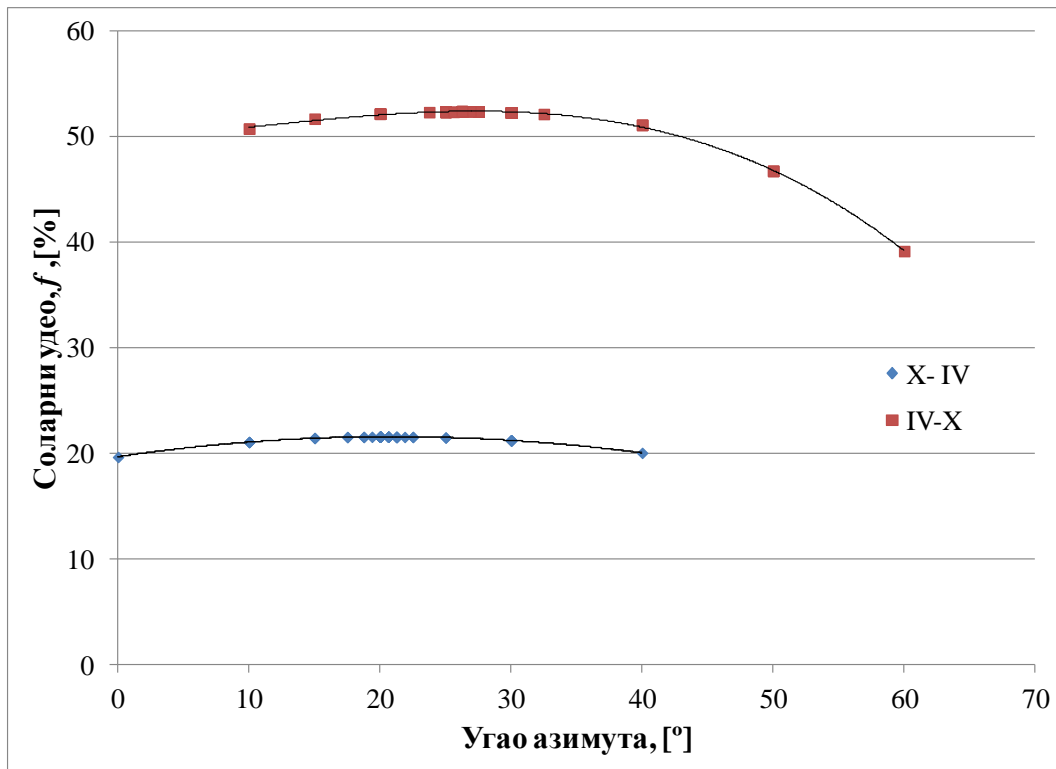
9.3.2 Соларни систем за загревање СТВ са СК#2

СК#2 је систем са соларним пријемником који функционише тако што користи два нагиба $\beta_{h,opt}$ и азимута $\gamma_{h,opt}$ годишње - по један на шест месеци. СК#2 ради на једном нагибу $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимуту $\gamma_{q,opt}$, и то једном од 15. октобра до 14. априла, а на другом нагибу $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимуту $\gamma_{q,opt}$ и то од 15. априла до 14. октобра.

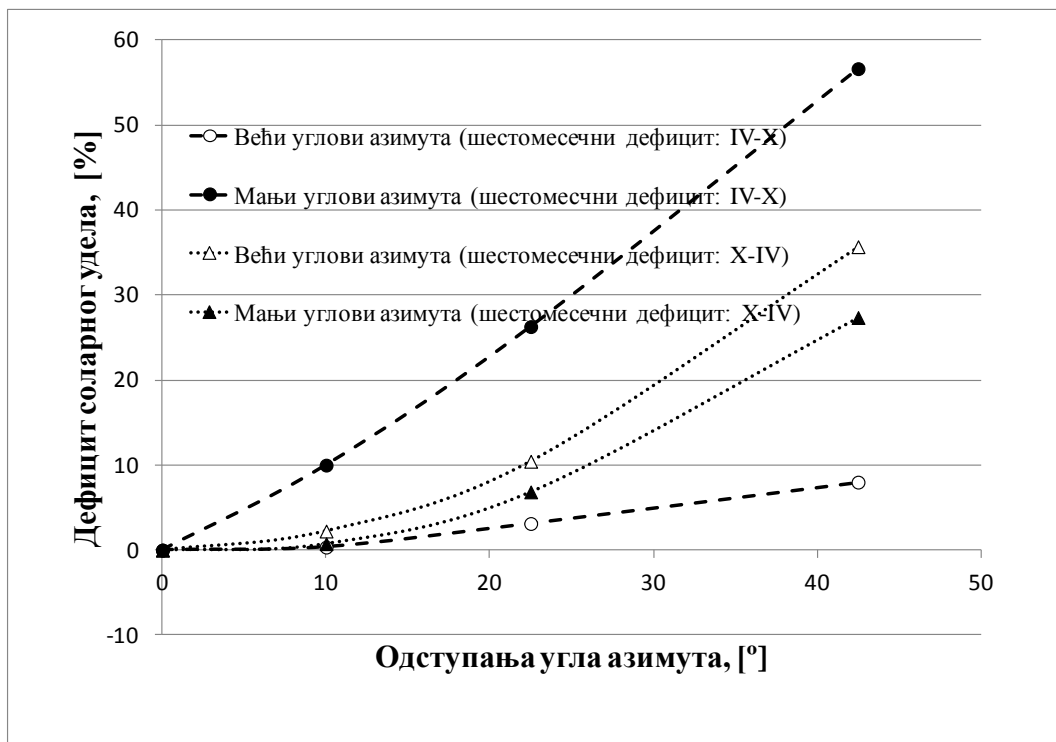
На слици 9.47 две криве (које су означене као X-IV и IV-X) приказују соларни систем за загревање СТВ са СК#2. Свака крива представља соларну фракцију f_h по соларном систему за загревање СТВ као функцију СК#2 са нагибом $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и углом азимута γ_h . Крива X-IV представља рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла (182 дана). Крива IV-X представља рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра (183 дана). Свака крива има максималну вредност f_h (која је у даљем тексту означена $f_{h,max}$ на оптималном нагибу $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и углу азимута γ_h . Криве приказане на слици 9.46 су добијене на основу израчунатих резултата оптимизацијом $f_h(\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_h)$ добијених у поступку приближавања оптималном решењу по методологији алгоритма оптимизације *Hooke Jeeves*. Вредност $f_{h,max}$ се добија овим поступком као резултат *Hooke Jeeves* алгоритма оптимизације; међутим, ове криве су приказане да би се проценила разлика између вредности f када положај није оптималан. Њихове једначине су приказане у табели 9.12 као полином трећег реда.

За град Београд, у току првог периода (који укључује зимске месеце), СК#2 има вредност $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_{h,opt} = 20.625^\circ$, а соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 21.6\%$. Током другог периода (који укључује летње месеце) соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 52.4\%$, а вредност $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_{h,opt} =$

26.25°. Током другог периода вредност $\gamma_{h,opt}$ је нижа за 6.625° него у првом периоду, а вредност $f_{h,max}$ је око 2.4 пута виша од вредности у првом периоду.



Слика 9.47 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#2



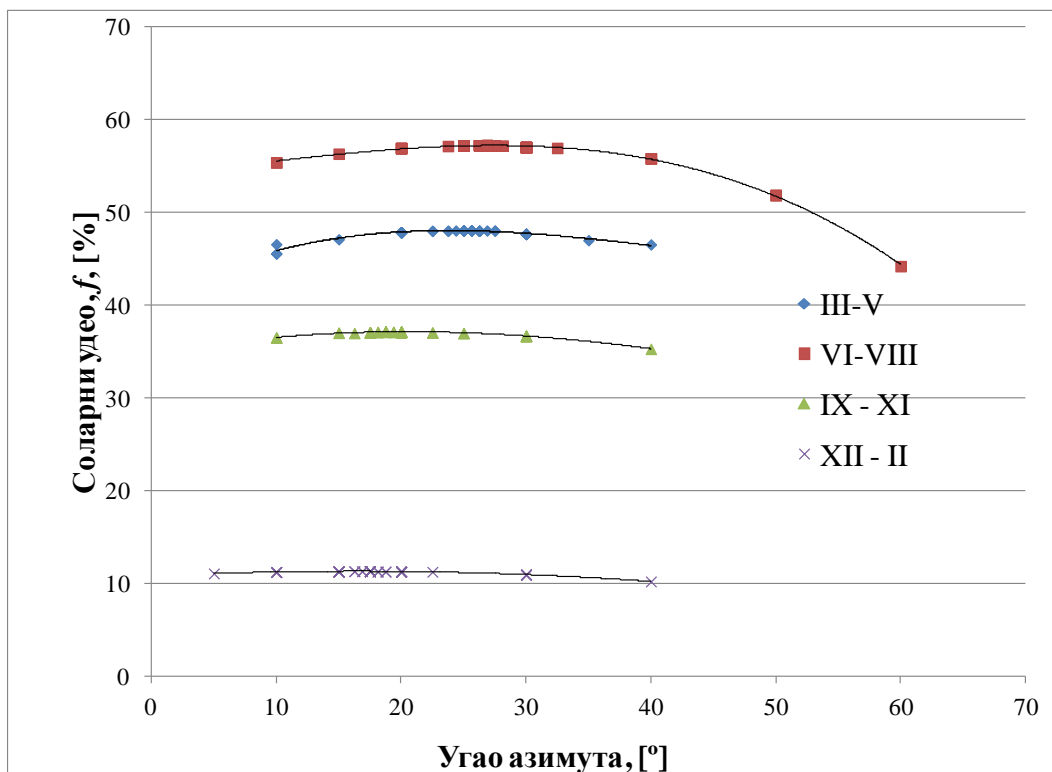
Слика 9.48 - Дефицит соларног удела у функцији одступања угла азимута добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$

Дијаграм на слици 9.48 узима СК#2. Крива X-IV представља рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла. Крива IV-X представља рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра. Слика 9.48 приказује да за СК#2 у периоду IV-X, када вредност Y_h падне испод вредности $Y_{h,opt}$ за вредност ΔY_h соларни удео је нижи него у случају када вредност Y_h пређе вредност $Y_{h,opt}$ за вредност ΔY_h . Ако је $\Delta Y_h = 10^\circ$, дефицит соларног удела је око 1 % за вредност Y_h која је испод вредности $Y_{h,opt}$, док је дефицит соларног удела око 10 % за вредност Y_h која је изнад вредности $Y_{h,opt}$. Ако је $\Delta Y_h = 42^\circ$, дефицит соларног удела је око 9 % за вредност Y_h која је испод вредности $Y_{h,opt}$, док је дефицит соларног удела око 56 % за вредност Y_h која је изнад вредности $Y_{h,opt}$.

Слика 9.48 приказује да за СК#2 у периоду X-IV када вредност Y_h падне испод вредности $Y_{h,opt}$ за вредност ΔY_h , количина изгубљеног соларног удела је виша него када Y_h пређе вредност $Y_{h,opt}$ за вредност ΔY_h . Ако је $\Delta Y_h = 10^\circ$ онда је дефицит соларног удела око 2 % у оба случаја. Ако је $\Delta Y_h = 42^\circ$, онда је дефицит соларног удела око 33 % за вредност Y_h испод вредност $Y_{h,opt}$, док је дефицит соларног удела око 28 % за вредност Y_h изнад $Y_{h,opt}$.

9.3.3 Соларни систем за загревање СТВ са СК#4

На слици 9.49 за СК#4 приказане су 4 криве (по једна за сваки период) за град Београд. Криве представљају f_q као функцију $\beta_q = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и Y_q соларног пријемника. Свака крива има своју максималну вредност која одговара вредностима за $\beta_q = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $Y_{q,opt}$ и $f_{q,max}$ соларног система за загревање СТВ.



Слика 9.49 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

СК#4 мења четири азимута годишње - један азимут на свака три месеца при $\beta_q = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$. То значи да функционише са четири $Y_{q,opt}$ током године. СК#4 ради са првим $Y_{q,opt}$ у периоду XII-II (90 дана од 1. децембра до 28. фебруара), са другим $Y_{q,opt}$ у периоду III-V

(92 дана од 1. марта до 28. фебруара), са трећим $Y_{q,opt}$ у периоду VI-VIII (92 дана од 1. јуна до 31. августа) и са четвртим $Y_{q,opt}$ у период IX-XI (91 дан од 1. септембра до 30. новембра). Током периода XII-II, соларни систем за загревање СТВ произведе $f_{q,max} = 11.3\%$ са $Y_{q,opt} = 17.5^\circ$. Током периода III-V, соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 43\%$ са $Y_{q,opt} = 25.625^\circ$. Током периода VI-VIII, соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 57.2\%$ са $Y_{q,opt} = 26.875^\circ$. Током периода IX-XI соларни систем за загревање СТВ би требало да произведе $f_{q,max} = 34.7\%$ са $Y_{q,opt} = 18.75^\circ$. Може се закључити да је током периода VI-VIII $Y_{q,opt}$ мањи за 9.375° , а $f_{q,max}$ је око 5.06 пута већи него у периоду XII-II. Њихове једначине су приказане у *табели 9.12* као полиноми трећег реда.

Табела 9.11 - Дефицит соларног удела за различита три месеца у току године и одступања угла азимута $|Y - Y_{opt}| = 42^\circ$ ако је $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4, за Београд у Србији

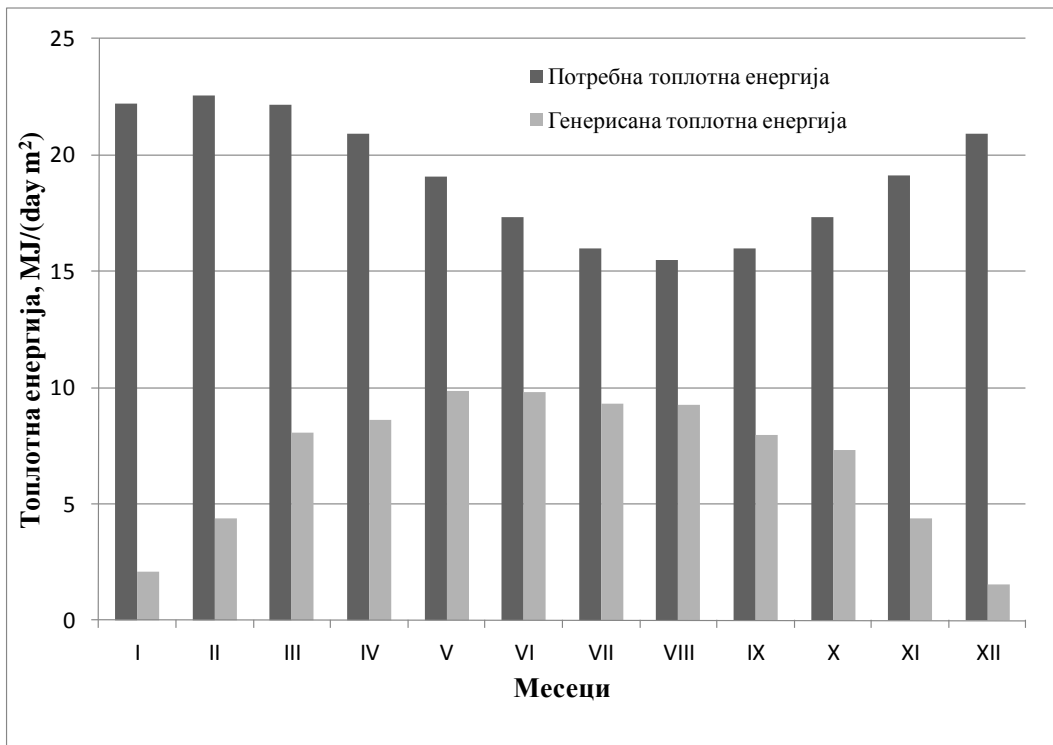
Период	$Y_{q,opt}$ [°]	$f_{q,max}$ [%]	Дефицит соларног удела, [%]	
			Y_q одступа испод $Y_{q,opt}$	Y_q одступа изнад $Y_{q,opt}$
XII-II	17.5	11.3	27.4	31.3
III-V	25.625	43	14.9	20.9
VI-VIII	26.875	57.2	7.8	10.6
IX-XI	18.75	34.7	21.1	17.5

Дефицит соларног удела је дат за све периоде у табели 9.11 за вредност Y_q вишу за 22.5° од вредности $Y_{q,opt}$ за СК#4 за Београд у Србији. За период IX-XI, дефицит соларног удела је већи када је Y_q испод вредности $Y_{q,opt}$, него када је вредност Y_q за 22.5° већа од вредности $Y_{q,opt}$. За остале периоде, дефицит соларног удела је нижи када је Y_q испод вредности $Y_{q,opt}$, него када је вредност Y_q за 22.5° већа од вредности $Y_{q,opt}$. Угао од 22.5° је узет насумично (под претпоставком) са циљем да се добију довољно велике разлике у вредности f и да би се разликовале у употреби соларног пријемника у различитим годишњим добима.

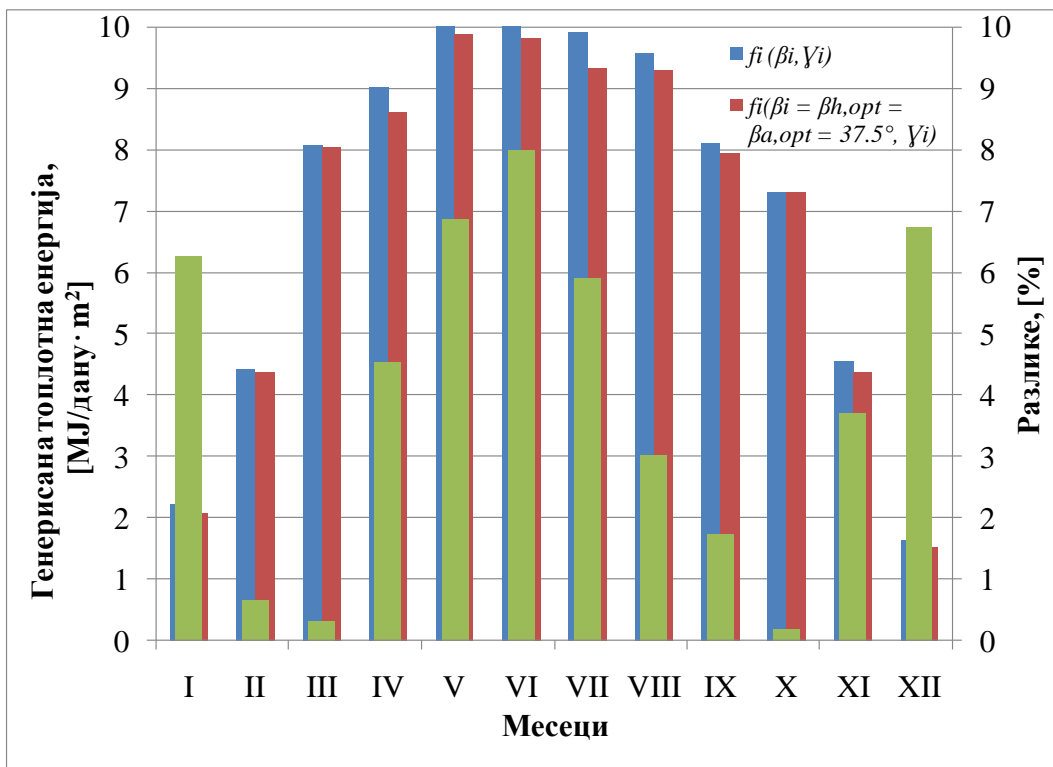
9.3.4 Соларни систем за загревање СТВ са СК#12

СК#12 годишње мења 12 углова азимута - један угао азимута $Y_{m,opt}$ сваког месеца. Затим, $Y_{m,opt}$ производи максималну количину топлоте од соларне енергије на месечном нивоу да би достигао максималну вредност $f_{m,max}$.

Слика 9.50 показује дневне просечне вредности у току месеца две променљиве за соларни систем за загревање СТВ са СК#12. Прва променљива је потребна топлотна енергија за један месец $E_{1,tot,m}$ за грејање санитарне топле воде. Друга променљива је максимална количина генерисане топлотне енергије $E_{1,m}$ која се користи за грејање санитарне топле воде. Овде, E_1 има своју максималну вредност у јулу, а истовремено има минималну вредност у децембру. $E_{1,tot,m}$ има минималну вредност у августу, а максималну вредност у фебруару. Осим тога, $E_{1,m} < E_{1,tot,m}$ за све месеце, $E_{1,tot,m} - E_{1,m}$ има минималну вредност у току летњих месеци, а максималну вредност у току зимских месеци.



Слика 9.50 - Потребна топлотна енергија за грејање СТВ и максимални износ генерисане топлотне енергије, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

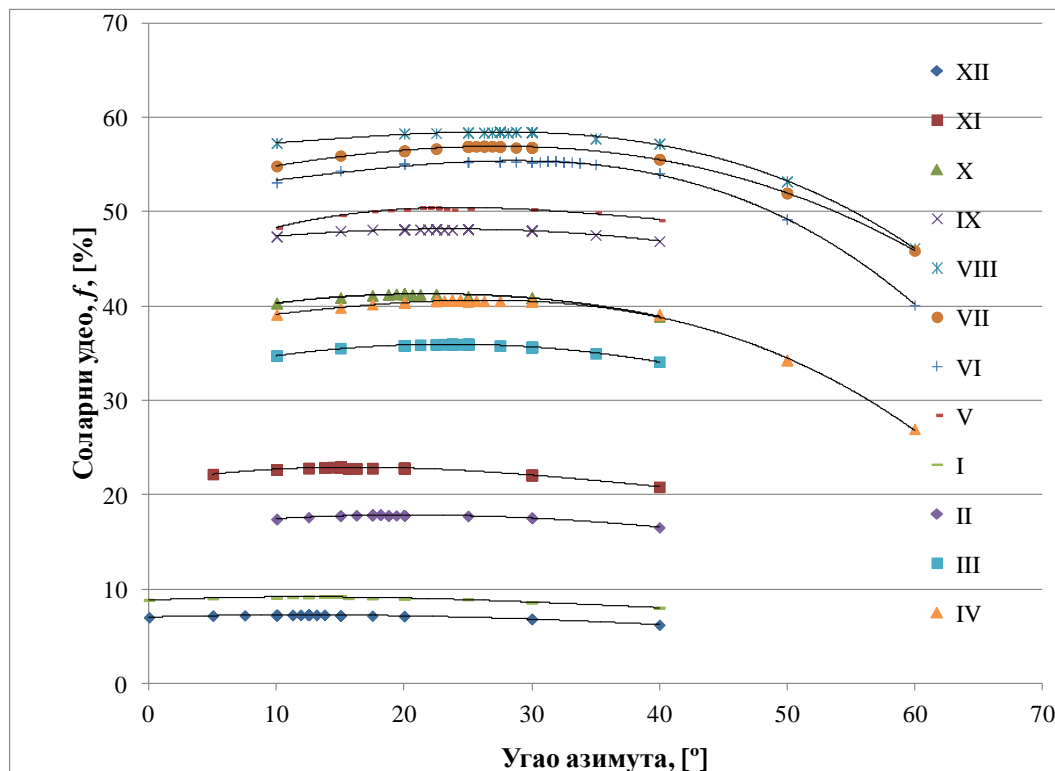


Слика 9.51 - Максимални износ генерисане топлотне енергије и разлике при генерисању топлотне енергије добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ или $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Слика 9.51 показује максимални износ генерисане топлотне енергије, оптимизовањем угла нагиба и азимута истовремено и оптимизовањем угла азимута када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12.

Вредности су свакодневне и дате су за сваки месец. Такође, дат је приказ разлика и процентуални губитак генерисања топлотне енергије. Уколико соларни пријемник поставимо на оптимални положај и угла нагиба и угла азимута, добијамо мало ниже вредности генерисане топлотне енергије у односу на вредности генерисаних топлотних енергија по месецима, када оптимизујемо само угао азимута када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$. Разлике достижу вредност до 8 % што такође говори да оптимално позиционирање мора бити на основу ригорозних прорачуна, а не на бази искустава. Овакви прорачуни доводе до унапређења рада соларних енергетских система и могу имати практичну примену. Важно је напоменути да системе такође надаље треба посматрати и са економског аспекта (укључити и цене праћења, израчунати период повраћаја средстава) у неким даљим истраживањима и довести до најпрецизнијег закључка како оптимално позиционирати соларни систем за загревање СТВ.

Слика 9.52 приказује дванаест кривих добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}, \gamma_i)$ тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 који ради у Београду. Криве представљају соларне уделе које се добијају ако СК#12у својој примени има другачији азимут. За сваки месец је дата по једна крива. Криве на слици 9.51 су добијене уз помоћ израчунатих резултата ($f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за СК#12) у поступку за одређивање приближавања оптималном решењу по принципу *Hooke Jeeves* алгоритму оптимизације.



Слика 9.52 - Соларни удео у функцији угла нагиба $\beta_{q,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и азимута за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

Ако соларни пријемник са СК#12 не заузме оптималне углове у својој примени, мања количина електричне енергије ће бити избегнута употребом соларног система за загревање СТВ. Њихове једначине су приказане у табели 9.13 као полиноми трећег реда. Ако соларни пријемник нема максималне вредности углова азимута током његовог рада, имаћемо губитке у генерисању топлотне енергије.

Слика 9.53 приказује дефицит соларног удела за соларни систем за загревање СТВ у Београду, Србији у случају када је азимут СК#12 у неким месецима већи или мањи од γ_{opt} за 22.5° . Постоје две ситуације:

- (1) За месеце април, мај, јун и август када је γ_m већи од $\gamma_{m,opt}$ за 22.5° дефицит соларног удела је већи него када је γ_m мањи од $\gamma_{m,opt} = 22.5^\circ$. Највећа разлика у дефициту од око 25 % постоји у VI месецу. У месецима, када је γ_m за 22.5° већи од $\gamma_{m,opt}$, постоји највећи дефицит у вредности f од око 15 %.
- (2) За месец јануар, фебруар, август, октобар, новембар и децембар, када је γ_m за 22.5° већи од $\gamma_{m,opt}$, дефицит соларног удела је мањи него када је γ_m за 22.5° мањи од $\gamma_{m,opt}$.
- (3) За месеце март, јул, септембар, дефицит соларне фракције је исти као када је вредност γ_m испод или изнад вредности $\gamma_{m,opt}$.



Слика 9.53 - Месечни дефицит соларног удела, за одступања угла азимута $|\gamma - \gamma_{opt}| = 22.5^\circ$, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Табела 9.12 - Једначине соларног удела у функцији угла азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је $\beta_i = \beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4

Број нагиба	Период	Дана	Соларни удео, [%]	Коефицијент тачности (R^2)
1	година	365	$f = -3 \cdot 10^{-5} Y^3 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 + 0.2 \cdot 10^{-1} \cdot Y + 18.9$	0.998
2	октобар - април	182	$f = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Y^3 - 0.004 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 + 0.177 \cdot Y + 19.75$	0.999
2	април - октобар	183	$f = -7 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 - 0.023 \cdot Y + 51.02$	0.999
4	јесен	92	$f = 3 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 + 7 \cdot 10^{-3} Y^2 + 0.255 \cdot Y + 34.63$	0.994
4	зима	90	$f = -4 \cdot 10^{-6} \cdot Y^3 - 10^{-3} \cdot Y^2 + 0.535 \cdot Y + 10.78$	0.996
4	пролеће	91	$f = -0.021 \cdot Y^2 + 0.718 \cdot Y + 40.61$	0.928
4	лето	92	$f = 3 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 + 1.2810^{-1} \cdot Y + 54.08$	0.984

Табела 9.13 - Једначине соларног удела у функцији угла азимута, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, Y_h)$, тј. када је $\beta_{m,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларне системе за загревање СТВ са СК#12. Једначине су дате за сваки месец

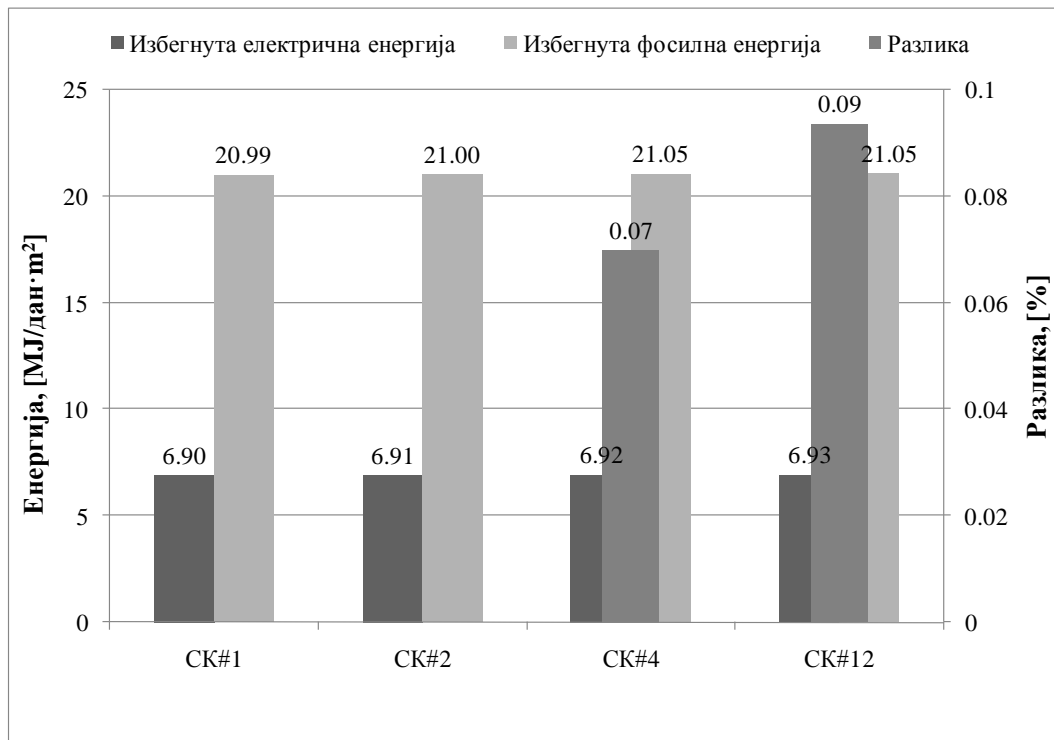
Месец	Дана	Соларни удео, [%]	Коефицијент тачности (R^2)
Јануар	31	$f = 3 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.003 \cdot Y^2 + 0.064 \cdot Y + 8.797$	0.975
Фебруар	28	$f = 2 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.004 \cdot Y^2 + 0.173 \cdot Y + 16.18$	0.964
Март	31	$f = -4 \cdot 10^{-6} \cdot Y^3 - 0.006 \cdot Y^2 + 0.312 \cdot Y + 32.25$	0.986
Април	30	$f = 10^{-5} \cdot Y^3 + 0.002 \cdot Y^2 + 0.144 \cdot Y + 37.59$	0.994
Мај	31	$f = 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.02 \cdot Y^2 + 0.686 \cdot Y + 43.34$	0.967
Јун	30	$f = 10^{-8} \cdot Y^3 + 0.006 \cdot Y^2 + 0.073 \cdot Y + 52.12$	0.988
Јул	31	$f = -3 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.002 \cdot Y^2 + 0.282 \cdot Y + 52.33$	0.998
Август	31	$f = 0.005 \cdot Y^2 + 0.026 \cdot Y + 56.62$	0.982
Септембар	30	$f = -2 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.003 \cdot Y^2 + 0.175 \cdot Y + 45.97$	0.991
Октобар	31	$f = 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.006 \cdot Y^2 + 0.293 \cdot Y + 38.01$	0.983
Новембар	30	$f = 7 \cdot 10^{-5} \cdot Y^3 - 0.008 \cdot Y^2 + 0.223 \cdot Y + 21.26$	0.983
Децембар	31	$f = 8 \cdot 10^{-6} \cdot Y^3 - 0.001 \cdot Y^2 + 0.039 \cdot Y + 7.015$	0.983

9.3.5 Поређење различитих соларних пријемника за случај оптимизације $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}=37.5^\circ, \gamma_i)$

Током примене, соларни системи за загревање СТВ са различитим соларним пријемницима (СК) - $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}=37.5^\circ, \gamma_i)$, могу да произведу различите количине топлотне енергије из соларне енергије. Као резултат тога могу се добити различите количине избегнуте електричне енергије или избегнуте фосилне енергије, а емитују се и различите количине CO_2 .

9.3.5.1 Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_h=\beta_{a,opt}=37.5^\circ, \gamma_h)$

Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите соларне системе за загревање СТВ који су коришћени у Београду, добијени оптимизацијом $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ су дате на слици 9.54. Фактор фосилне енергије $C_f = 3.04$ је добијен на основу [92]. Такође, на слици 9.54 је приказана годишња разлика у максималној количини избегнуте електричне енергије за различите соларне системе за загревање СТВ и оне са стационарним соларним пријемником. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_a = 25.625^\circ$ у току целе године. За вредности $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_a = 25.625^\circ$ сходно томе $f = f_{max} = 32.5\%$ су дате за Београд, Србија.



Слика 9.54 - Максималне количине избегнуте електричне и фосилне енергије на годишњем нивоу за различите СК добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i=\beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$

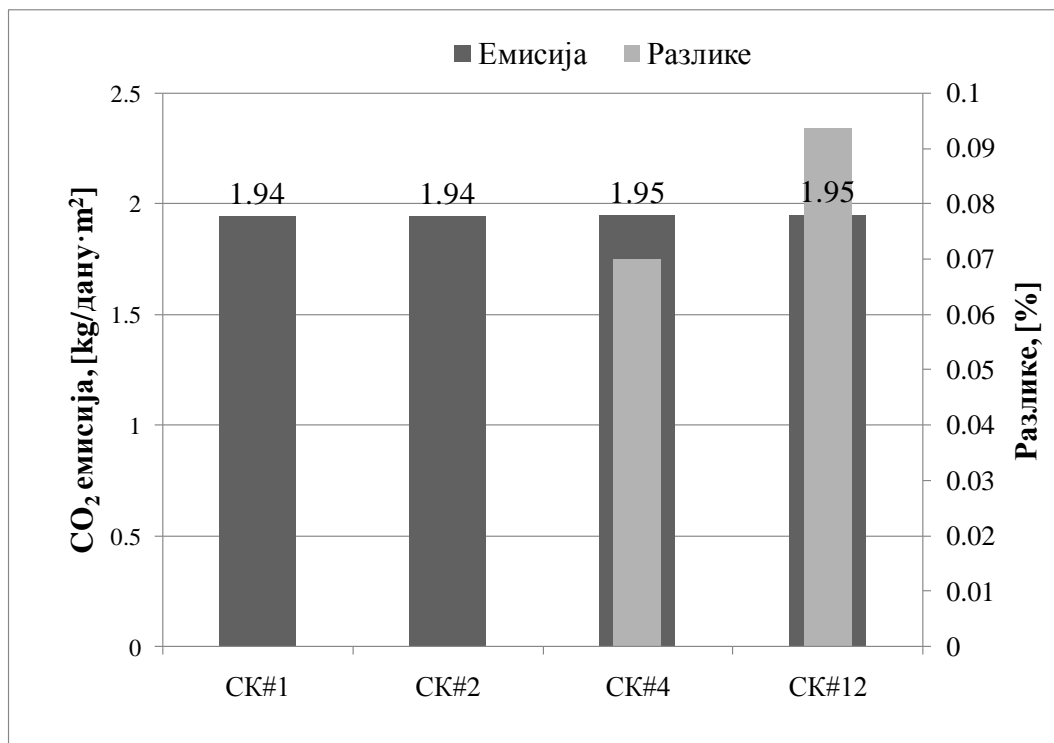
За СК#2, СК#12 количина избегнуте електричне енергије није виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#4, количина избегнуте електричне енергије је за 0.07 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 количина избегнуте електричне енергије је за 0.09 % виша у односу

на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Узевши у обзир ове податке, израда СК#4 уместо стационарног непокретног соларног пријемника може бити корисна. С обзиром да цена праћења није узета у обзир у току истраживања закључујемо да СК#2, СК#4 и СК#12 не производе много уштеде за ситуацију када оптимизујемо $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, тј. $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и γ_i . Готово исти коментари се могу дати за максималну количину избегнуте фосилне енергије, будући да је ова варијабли сразмерна избегнутој електричној енергији.

9.3.5.2 Еколошки добици за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h = 37.5^\circ)$

Максималне вредности избегнуте емисије CO_2 на годишњем нивоу приказане су на слици 9.55 за различите соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12, добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i = 37.5^\circ)$, за Београд. Такође, годишња разлика максималних вредности избегнуте емисије CO_2 за различите соларне системе за загревање СТВ са различитим СК поређени су са СК#1. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_a = 25.625^\circ$ у току целе године. За вредност $\beta = \beta_{opt} = 37.5^\circ$ и $\gamma_a = 25.625^\circ$ сходно томе имамо $f = f_{max} = 32.5\%$ су дате за Београд, Србија.

Разлике годишње избегнуте емисије CO_2 за различите соларне пријемнике, добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$ у односу на стационарни соларни пријемник су веома мале.



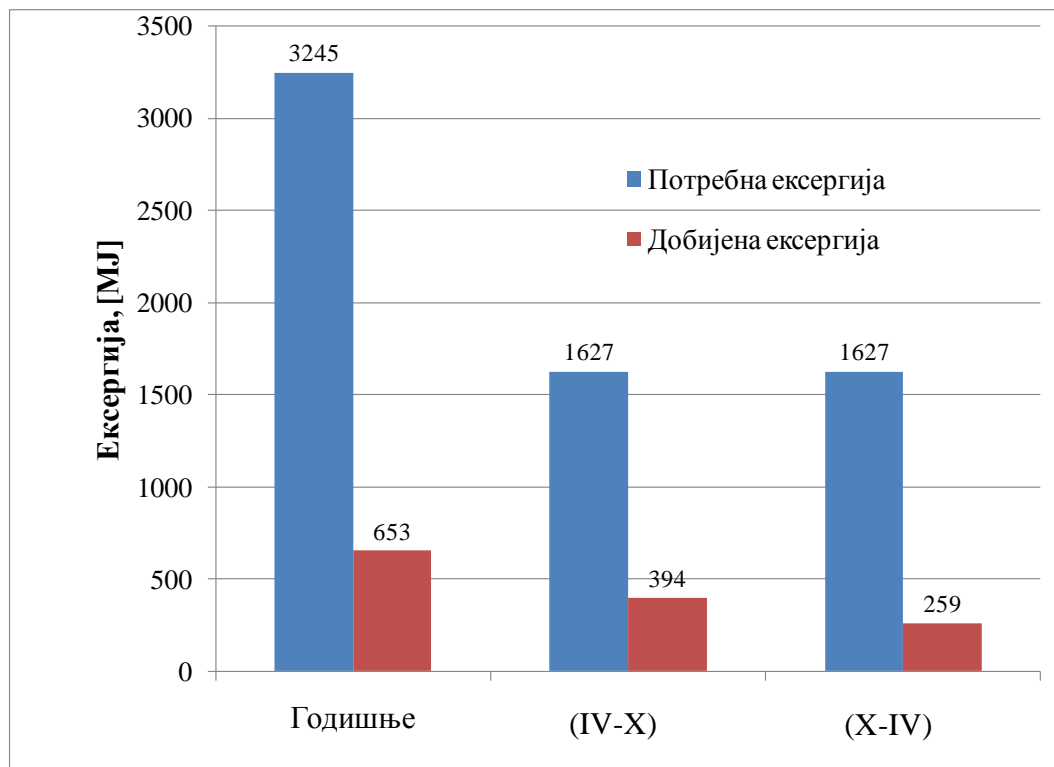
Слика 9.55 - Максимална годишња избегнута емисија CO_2 услед максимално избегнуте електричне енергије у функцији броја оптималних положаја соларног пријемника, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ у току године

Можемо из ових истраживања закључити да је за СК#2, количина избегнуте електричне енергије једнака као и код система са стационарним пријемником. За СК#4, количина избегнуте електричне енергије је за 0.06 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. За СК#12 количина избегнуте електричне енергије је за око 1 % виша од оне која се постигне са стационарним соларним пријемником. Узевши у обзир ове податке, у току истраживања закључујемо да СК#4 и СК#12 не производе много уштеде, док СК#2 остварује занемарљиво малу, па зато можемо рећи да израда неке друге врсте можда и није најповољнија с обзиром да у овим анализама треба имати у виду да цена праћења тј. економски аспект није узет у обзир.

Готово исти коментари се могу дати за максималну количину избегнуте фосилне енергије, будући да је ова варијабла сразмерна избегнутој електричној енергији.

9.3.5.3 Максималне количине избегнуте ексергије за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4 и СК#12 добијене оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_h)$

Кроз ексергетску оптимизацију је одређена максимална вредност ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање санитарне топле воде. Максимални ексергетски степен ефикасности, аналогно максималној вредности соларног удела оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, постиже се постављањем соларног пријемника на оптималан угао азимута када је $\beta_{a,opt} = 37.5^\circ$. Вредности соларних удела као функције циља код ексергетске оптимизације су исти као и код енергетске оптимизације.



Слика 9.56 - Потребна и добијена ексергија добијених оптимизацијом $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2

Дефицит избегнуте ексергије у функцији одступања угла азимута при оптималном нагибу $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, за Београд показан је у поглављу 9.3.1. Анализирајући максималне вредности избегнуте ексергије на годишњем нивоу за соларне системе за загревање СТВ са

СК#1, СК#2 за Београд добија се годишња разлика максималних вредности избегнуте ексергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 поређен са СК#1. За СК#2, разлика је за 5 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Анализирани соларни систем за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на једном нагибу у току целе године. Вредности $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и $Y_{opt} = 25.625^\circ$ и сходно томе $f = f_{max} = 35.5\%$ су дате за Београд, Србија.

Као један од значајних показатеља ексергетских токова у анализираном соларном систему је однос потребне и добијене ексергије. На слици 9.56 су показане вредности потребне и добијене ексергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, СК#2 у функцији броја оптималних нагиба. Стога, имамо да је за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, вредност потребне ексергије 4.96 пута већа од вредности добијене ексергије. За соларни систем за загревање СТВ са СК#2, за период X-IV, када имамо рад СК#2 од 15. октобра до 14. априла, вредност потребне ексергије је 6.28 пута већа од вредности добијене ексергије, а за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 за период IV-X, када имамо рад СК#2 од 15. априла до 14. октобра, 4.4 пута. Тежња је да се тај однос смањи да би се добиле веће вредности ексергија.

Додатним анализама, као и у поглављима 9.1 и 9.2 долазимо до истих закључака. Односи потребне и добијене ексергије, соларних система са променом појединих карактеристика система могу се постићи у циљу њиховог снижавања. Самим тим добијамо вредност ексергетског степена искоришћења, η_x за испитиван систем при већ унапред задатим условима (потрошње топле воде, распореда коришћења топле воде, задате температуре топле воде) од 1.2 % за соларни системи за загревање СТВ са СК#1.

9.4 Соларни систем за загревање СТВ - $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, Y_i)$

Током даљих истраживања испитан је и соларни систем за загревање СТВ са различитим соларним пријемницима (СК) за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, Y_i)$, могу да произведу различите количине топлотне енергије из соларне енергије. Том приликом је за сваки соларни систем за грејање санитарне топле воде израчунат соларни удео $f_{h,max}$ користећи се одговарајућим симулационим и оптимизационим рутинама са модификованом методологијом *Hooke Jeeves* алгорита.

Посматрана су два случаја:

- (1) период од шест месеци (X-IV, зимска сезона) када је соларни пријемник постављен на угао нагиба $\beta_h = \beta_{q,opt} = 48.75^\circ$ и за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, Y_i)$,
- (2) период од шест месеци (IV-X, летња сезона) када је соларни пријемник постављен на угао нагиба $\beta_h = \beta_{q,opt} = 26.875^\circ$ и за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{q,opt}, Y_i)$.

Као резултат тих истраживања добијено је да уколико изаберемо положај соларног пријемника као у случају 1 (зимска сезона), добијамо за 0.7 % ниже вредности генерисане топлотне енергије у односу на вредности генерисаних топлотних енергија за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$. У случају 2 (летња сезона) добијамо за око 4 % више вредности генерисане топлотне енергије у односу на вредности генерисаних топлотних енергија за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$. Стога, добијамо по месецима

вредности соларних удела $f_{i, max}$ приказаних у табели 9.14 и у поређењу са вредностима f_i за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a, opt} = 37.5^\circ, Y_i)$, имамо вредности које су све веће за око 3 % за случај 1, а мање за око 2 % за случај 2. Све ово је разматрано по месецима. Разлике f_i су веома мале и имају за последицу веома мале промене. Као резултат тога не могу се добити различите количине избегнуте електричне енергије или избегнуте фосилне енергије, нити емитовати различите количине CO_2 у односу на друге случајеве који су посматрани у претходним поглављима 9.1, 9.2, 9.3.

Спроведена енергетска и ексергетска истраживања дала су параметре оптималности, одговарајуће зависности оптималних углова, азимута и алтитуде и обезбедили резултате најефикасније практичне примене соларних пријемника.

Овакви соларни системи су генерисали највећу могућу количину топлотне енергије из соларне енергије и при том је могуће остварити концепт куће са нето-нултом енергетском потрошњом, нарочито када је у питању оптималан положај соларног пријемника за случај оптимизације соларног удела $f_i(\beta_i, Y_i)$.

9.5 Поређење соларних система

У поглављима 9.1, 9.2, 9.3 и 9.4 спроведена су истраживања четири различита соларна система за загревање санитарне воде (СТВ) у неколико градова Србије. Анализирани соларни системи су СК#1 (са фиксираним соларним пријемником), СК#2 (са соларним пријемником који годишње промени два положаја), СТВ#4 (са соларним пријемником који годишње промени 4 положаја) и СТВ#12 (са соларним пријемником који годишње промени 12 положаја). Соларни пријемници ових система су постављени на крововима кућа у правцу север-југ.

За различите соларне системе, истраживање је показало оптималне положаје њихових соларних пријемника на годишњем, полугодишњем, тромесечном и месечном нивоу. Оптимални углови соларних пријемника доприносе да соларни удео буде максималан, избегнутој употреби електричне енергије, избегнутој ексергији, избегнутој употреби фосилне енергије, и избегнутој емисији CO_2 које се добију употребом соларних система за загревање санитарне воде.

Соларни систем за загревање СТВ испитан је за случај оптимизације соларног удела $f_i(\beta_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i, Y_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a, opt}, Y_i)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a, opt} = 37.5^\circ$ и за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_n = \beta_{q, opt}, Y_i)$. Том приликом је оптимизован рад соларног пријемника при чему он бира оптималан положај у току експлоатације. Спроведена енергетска и ексергетска истраживања дала су параметре оптималности, одговарајуће зависности оптималних углова, азимута и алтитуде.

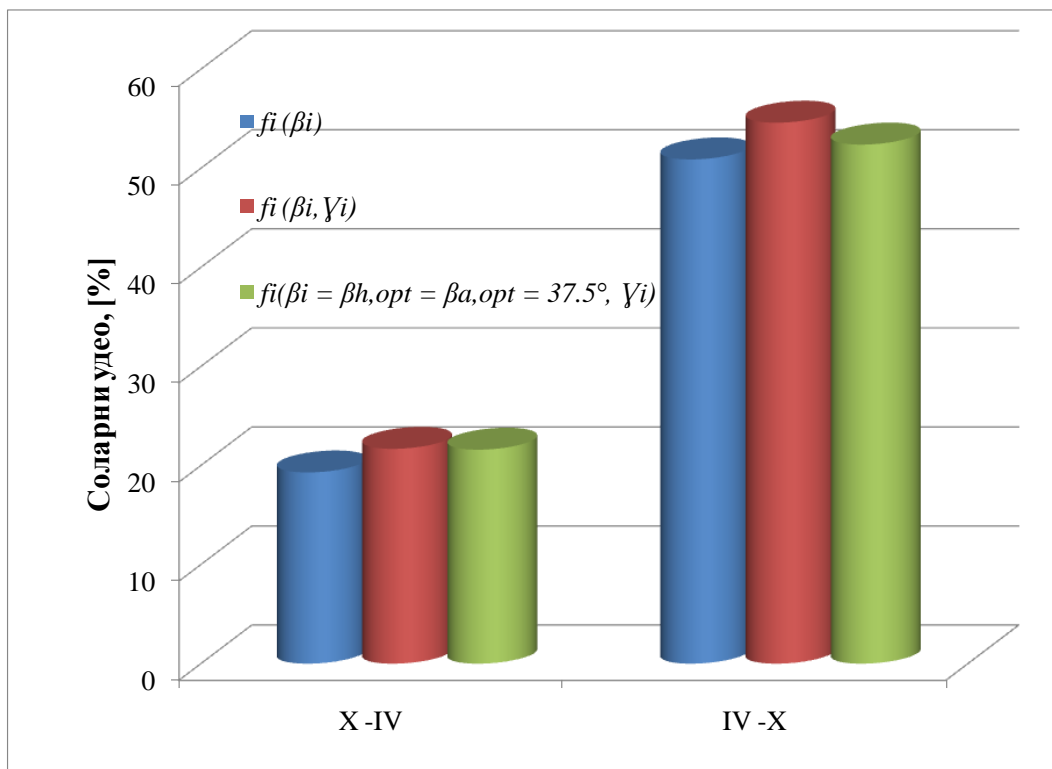
Соларни системи могу бити инсталирани на крову зграда било које куће и њима генерисати највећу могућу количину топлотне енергије из соларне енергије и да се при том оствари концепт куће са нето-нултом енергетском потрошњом, нарочито када је у питању оптималан положај соларног пријемника за случај оптимизације соларног удела $f_i(\beta_i, Y_i)$.

У поглављу 9.2 дата су поређења у циљу добијања повољнијег случаја оптимизације. Закључује се да ако посматрамо процес конверзије соларне енергије у топлотну енергију на макро нивоу са аспекта енергије, ексергије, фосилне енергије и гасова стаклене баште

случај оптимизације $f_i(\beta_i, Y_i)$ је повољнији. У истраживањима није узета у обзир цена праћења, тј. економски аспект, што би у неким даљим истраживањима било пожељно укључити.

У овом поглављу дато је поређење резултата све случајеве истраживања соларних система. На слици 9.57 приказане су вредности соларних удела где се уочавају њихове разлике уколико оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i, Y_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 у Београду.

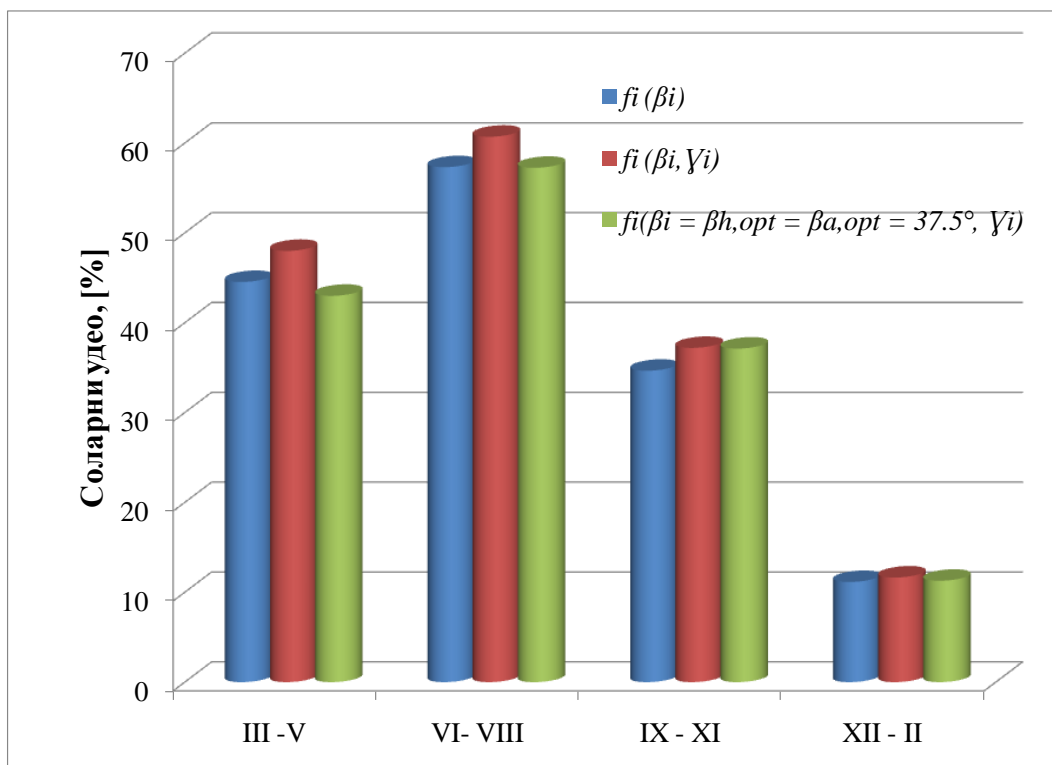
У току првог периода, X-IV (који укључује зимске месеце) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 19.3 \%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 21.7 \%$, оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$ и разлика соларних удела Δf је 2.4% што је за 12.35% веће у односу на случај када оптимизујемо само угао нагиба, док је $f_{h,max} = 21.59 \%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, Y_h)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ што је за 0.5% ниже у односу на случај оптимизације $f_i(\beta_h, Y_h)$.



Слика 9.57 - Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, Y_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, Y_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#2

Током другог периода, IV-X (који укључује летње месеце) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$, соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 50.9 \%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{h,max} = 54.6 \%$ оптимизовањем $f_i(\beta_i, Y_i)$ и Δf је 3.7% што је за 7.3% веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, док је $f_{h,max} = 52.39 \%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, Y_i)$, када је нагиб оптималан на $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, што је за 5% ниже у односу на случај оптимизације $f_i(\beta_i, Y_i)$. Можемо да закључимо да је оптимизација соларног удела у $f_i(\beta_i, Y_i)$ најповољнија како за максимално искоришћење соларне енергије, тако и за њено коришћење у циљу остварења концепта куће са нето-нултом потрошњом.

На слици 9.58 приказане су вредности соларних удела и њихове разлике уколико оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#4 у Београду. У току периода, XII-II (зима) оптимизовањем угла нагиба соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 11.14\%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 11.6\%$ оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, што је за 4.4% веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, док је $f_{q,max} = 11.28\%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ што је за 2.8% ниже у односу на случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Током периода, III-V (пролеће) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 44.5\%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 48\%$ истовременим оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, што је за 7.7% веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, док је $f_{q,max} = 46\%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, што је за 4.5% ниже у односу на случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Током периода, VI-VIII (лето) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 57.32\%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 60.7\%$ истовременим оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, што је за 6.2% веће у односу на случај када оптимизујемо $f_i(\beta_i)$, док је $f_{q,max} = 60.7\%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt}, \gamma_i)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$, што је исто као у случају оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$. Током периода, IX-XI (јесен) оптимизовањем $f_i(\beta_i)$ соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 34.66\%$, док соларни систем за загревање СТВ има вредност $f_{q,max} = 37.2\%$ истовременим оптимизовањем $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, што је за 9% веће у односу на случај када оптимизујемо само угао нагиба, док је $f_{q,max} = 37.2\%$ за случај оптимизације $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ што је једнако у односу на случај оптимизације $f_i(\beta_i, \gamma_i)$.

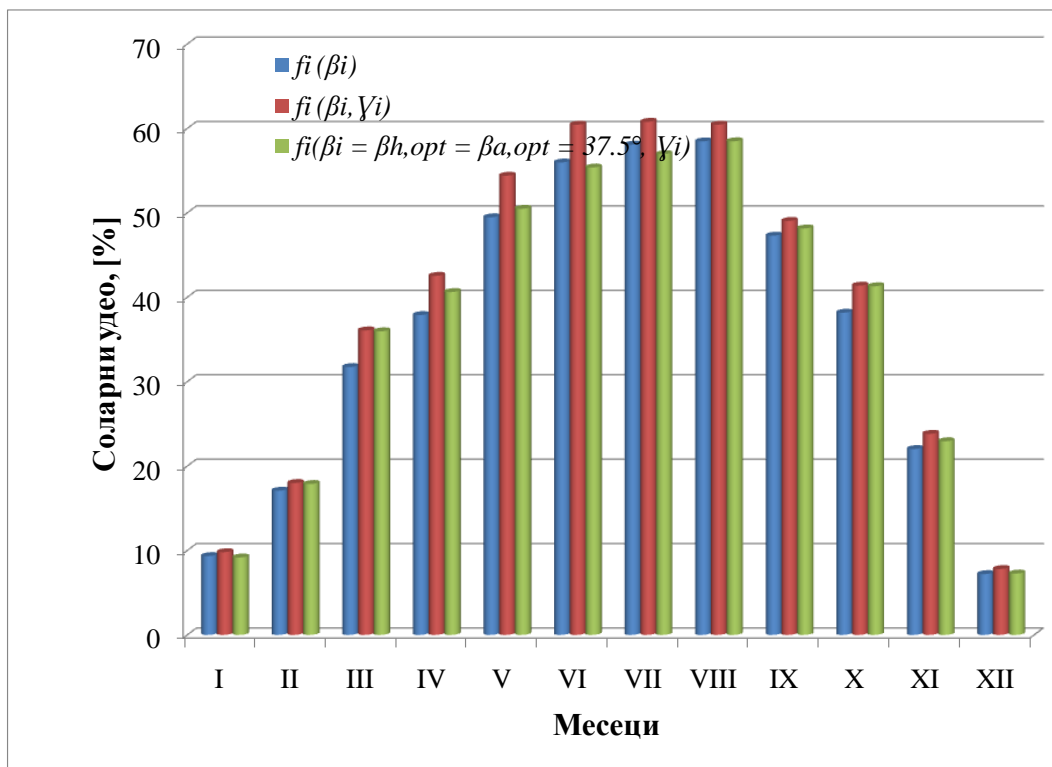


Слика 9.58 Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#4

Током свих тромесечја имамо веће вредности функције циља, соларног удела од 2 - 4 % који се добија оптимизацијом $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, као и приближно једнаке вредности соларног удела за два тромесечја или са мањим одступањима за случај оптимизације $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, тј. када је нагиб оптималан $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5$. Највећи губитак соларне енергије, а самим тим и соларног удела, имамо у јесен и пролеће оптимизацијом $f_i(\beta_i)$, и то за 9 %, 7.7 % респективно. Највећи губитак соларне енергије, а самим тим и соларног удела, имамо у зиму и пролеће отимизовањем $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, тј. када је нагиб оптималан $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5$ и то 2.8 % и 4.5 %, респективно. Можемо да закључимо да је оптимизација $f_i(\beta_h, \gamma_h)$ најповољнија како за максимално искоришћење соларне енергије, тако и за њено коришћење у циљу остварења концепта куће са нето-нултом потрошњом.

На слици 9.59 приказане су вредности соларних удела и видимо њихове разлике уколико оптимизујемо $f_i(\beta_h)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за случај оптимизације $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, тј. када је нагиб оптималан на $\beta_h = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 у Београду и можемо закључити да је најповољнија ситуација када оптимизујемо $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, јер тада имамо најмање губитке посебно у мају, јуну, јулу и августу.

У табели 9.13 приказане су оптималне вредности соларних удела у функцији (1) угла нагиба β_h , (2) угла нагиба β_h и угла азимута γ_h , (3) угла нагиба $\beta_{h,opt} = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ$ и угла азимута γ_h , (4) $f_i(\beta_h = \beta_{a,opt}, \gamma_h)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12 у Београд, Србија, одакле се примећује да су разлике f_i веома мале и да за последицу имају веома мале промене. Као резултат тога не могу се добити различите количине избегнуте електричне енергије или избегнуте фосилне енергије, нити емитовати различите количине CO_2 у односу на друге случајеве који су посматрани у претходним поглављима 9.1, 9.2, 9.3.



Слика 9.59 - Соларних удео, оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

Спроведена енергетска и ексергетска истраживања дала су параметре оптималности, одговарајуће зависности оптималних углова, азимута и алтитуде и резултате најефикасније практичне примене соларних пријемника.

Табела 9.14 - Оптималне вредности соларних удела оптимизован f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, (4) $f_i(\beta_h = \beta_{q,opt}, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#12

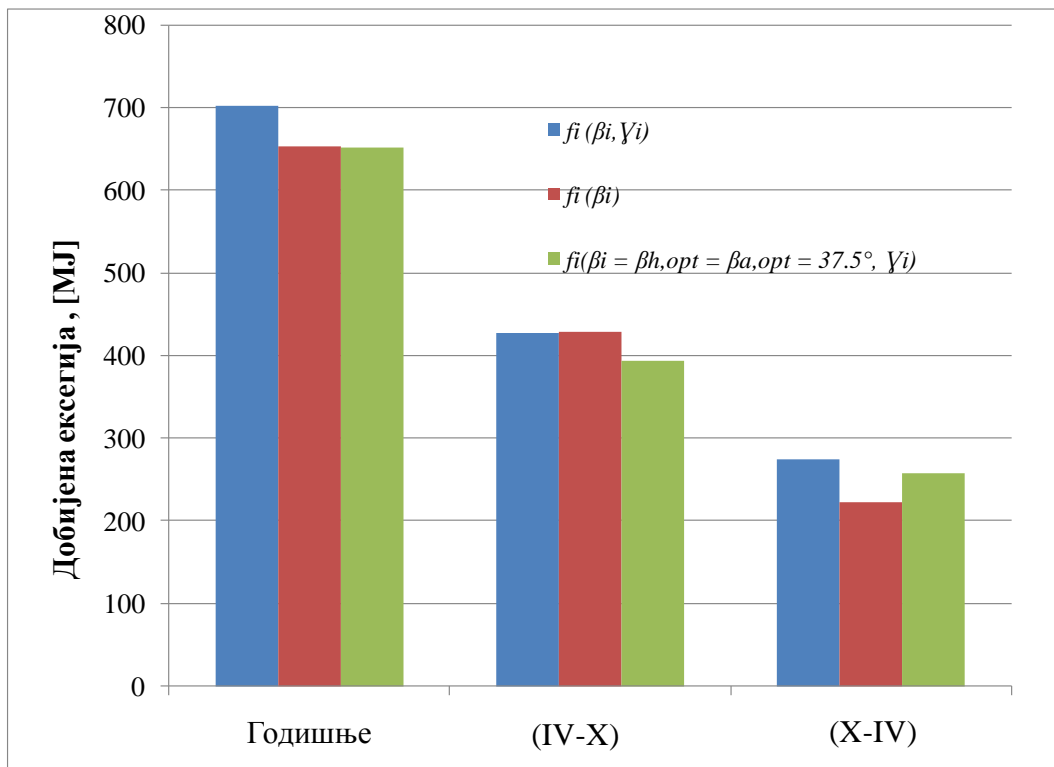
Соларни пријемник са СК#12	$f_i(\beta_i)$, [%]	$f_i(\beta_i, \gamma_i)$, [%]	$f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, [%]	$f_i(\beta_h = \beta_{q,opt}, \gamma_i)$
I	9.3	9.8	9.2	9.7
II	17.1	18.0	17.9	17.7
III	31.7	36.0	35.9	34.5
IV	37.9	42.5	40.6	42.1
V	49.5	54.4	50.5	52.9
VI	55.9	60.4	55.4	57.9
VII	58.1	60.8	56.9	58.8
VIII	58.4	60.4	58.5	59.7
IX	47.3	49.0	48.2	49.0
X	38.2	41.4	41.3	40.9
XI	22.0	23.8	22.9	23.8
XII	7.2	7.8	7.3	7.7

Ексергетском оптимизацијом је одређена максимална вредност ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање санитарне топле воде на годишњем нивоу. Максимални ексергетски степен ефикасности, аналогно максималној вредности соларног удела у функцији угла нагиба, постиже се постављањем соларног пријемника на оптимални положај. Вредности соларних удела као функције циља код ексергетске оптимизације су исти као и код енергетске оптимизације. Ексергетског степена ефикасности соларног система за грејање СТВ на годишњем нивоу, добијених оптимизацијом f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$ износи 1.1%, 1.3%, 1.2%, респективно. Ексергетски степен ефикасности система је нешто већи у односу на раније испитиване у литератури [93], при чему су узети у обзир различити утицаји на ексергетске токове, као и промене карактеристика соларног система за загревање СТВ.

Анализирајући максималне вредности избегнуте ексергије за соларне системе за загревање СТВ са СК#1, СК#2 за Београд добија се годишња разлика максималних вредности избегнуте ексергије за соларни систем за загревање СТВ са СК#2 који је упоређен са СК#1. За СК#2, разлика је за 10.1 %, 7 %, 5 % виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Анализирани соларни системи за загревање СТВ са СК#1 је непокретни стационарни соларни пријемник који ради на оптималном положају

добијеним оптимизацијом f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, у току целе године.

Као један од значајних показатеља ексергетских токова у анализираном соларном систему је однос потребне и добијене ексергије. На слици 9.60 су показане вредности добијене ексергије, добијене оптимизацијом f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, СК#2. Вредности потребне ексергије су за све случајеве једнаке. Највише вредности добијене ексергије се остварују за случај оптимизације $f_i(\beta_h, \gamma_h)$. Због различитих вредности потребне ексергије потрошача, однос потребне и добијене ексергије је око 4 пута већа од вредности добијене ексергије, за све случајеве оптимизације. Што је ексергетска ефикасност већа, већа је ексергија добијена из соларних система, па је однос потребне и добијене ексергије мањи, чему и тежимо у процесима оптимизације.



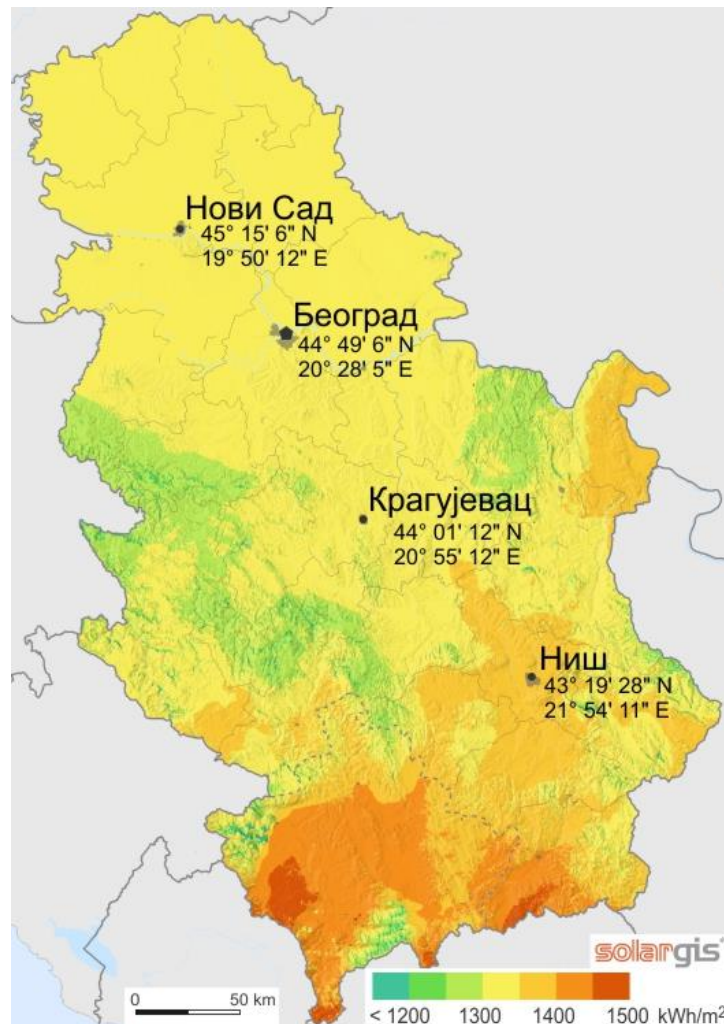
Слика 9.60 - Вредности ексергија, добијених оптимизацијом f_i (1) $f_i(\beta_i)$, (2) $f_i(\beta_i, \gamma_i)$, (3) $f_i(\beta_i = \beta_{a,opt} = 37.5^\circ, \gamma_i)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1, СК#2

9.6 Мапе соларног зрачења и оптимални положаји $\beta_{i,opt}$ и $\gamma_{i,opt}$ за различите градове у Србији

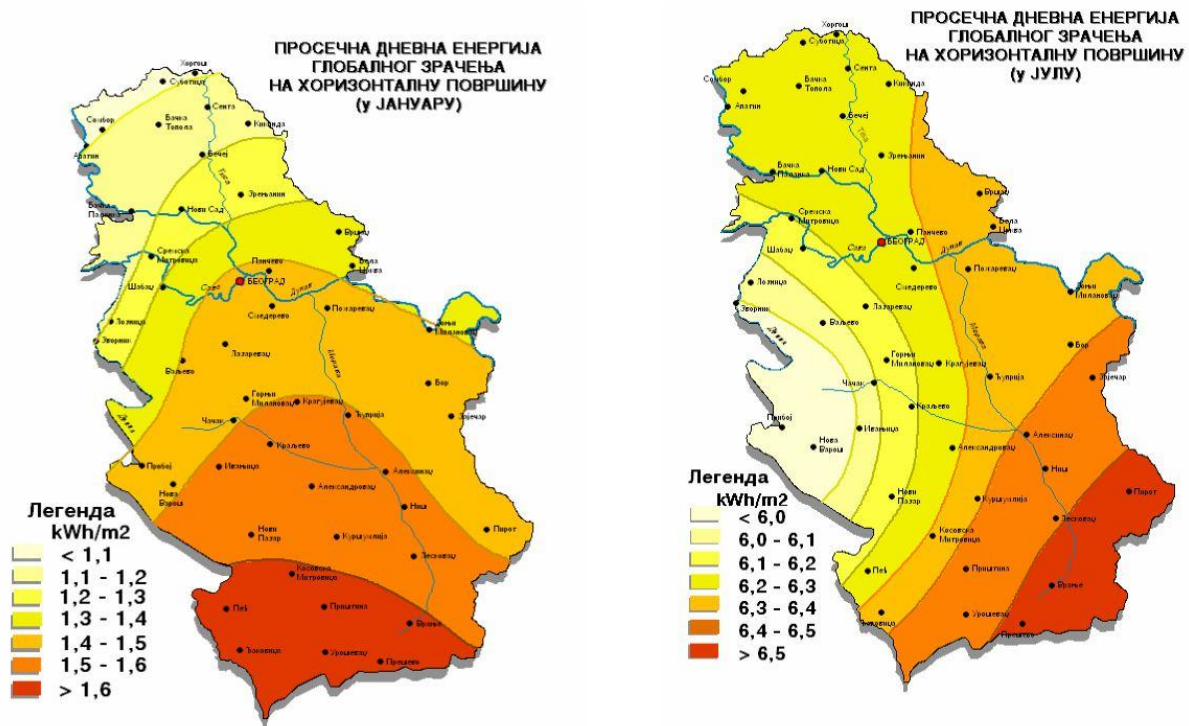
Енергетском и ексергетског оптимизацијом соларног удела $f_i(\beta_h, \gamma_h)$ као најповољнијом са аспекта енергије, ексергије, фосилне енергије и гасова стаклене баште у овом поглављу на слици 9.61 и 9.62 дате су мапе соларног зрачења за Републику Србију, на годишњем и дневном нивоу за јул, најтоплији месец и јануар, најхладнији месец, као најкритичније тачке [97, 98]. Такође, приказане су и вредности оптималних углова азимута и алтитуде на месечном, тромесечном, полугодишњем и годишњем нивоу за неколико градова (Београд, Нови Сад, Ниш и Крагујевац) у Србији. Њихове метеоролошке карактеристике су детаљно дате у поглављу 7.4.

Интензитет Сунчевог зрачења у Републици Србији је међу највећима у Европи, са просеком од 272 сунчана дана, као што је показано у поглављу 7.4, односно са годишњим просеком од 2300 сунчаних сати. На слици 9.60 приказана је просечна годишња вредност енергије глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији, док је на слици 9.61 приказана просечна дневна енергија глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији у јануару и јулу. Просечан интензитет Сунчевог зрачења на територији Републике Србије се креће од 1.1 kWh/m²/дан на северу до 1.7 kWh/m²/дан на југу - током јануара, а од 5.9 до 6.6 kWh/m²/дан - током јула. На годишњем нивоу, просечна вредност енергије глобалног Сунчевог зрачења за територију Републике Србије износи од 1200 kWh/m²/годишње у северозападној Србији, до 1550 kWh/m²/годишње у југоисточној Србији, док у средњем делу износи око 1400 kWh/m²/годишње.

Захваљујући овоме, у Републици Србији постоје веома погодни услови за коришћење Сунчевог зрачења за добијање топлотне енергије.



Слика 9.61 - Просечна годишња вредност енергије глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији



Слика 9.62 - Просечна дневна енергија глобалног Сунчевог зрачења које доспева на квадратни метар хоризонталне површине у Републици Србији у јануару (лево) и јулу (десно)

У табелама 9.15, 9.16, 9.17 и 9.18 су показане оптималне вредности угла азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4, СК#12 за различите градове у Србији (Београд, Нови Сад, Крагујевац и Ниш). Ови резултати имају веома значајну улогу за практичну примену соларних пријемника, што имплицира ефикаснију примену соларних пријемника у пракси са веома малим губицима енергије, ексергије и са максималним избегавањем коришћења фосилне енергије и емисије гасова стаклене баште. Резултат примене оваквих соларних пријемника доводи и до максимума енергетске сигурности.

Табела 9.15- Оптималне вредности угла азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#1 и СК#2

Град	Година		Октобар		Април	
	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}
Нови Сад	31.875	23.125	43.75	20	18.125	27.5
Београд	28.75	25	42.5	21.25	15	30
Крагујевац	33.125	23.75	43.75	20.625	15	25
Ниш	31.875	26.25	42.5	22.5	15	28.125

Табела 9.16 - Оптималне вредности угла азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#4

Град	III-V		VI-XIII		IX-XI		XII-II	
	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}
Нови Сад	26.25	26.875	5	26.875	35	20	51.875	16.25
Београд	22.5	26.875	5	26.875	40.625	21.25	46.875	18.125
Крагујевац	21.25	25.625	1.25	27.5	40	25	50	15
Ниш	23.125	25.625	2.5	28.75	38.75	23.125	48.75	15.625

Табела 9.17 - Оптималне вредности угла азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#12, за период I-VI

Град	I		II		III		IV		V		VI	
	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}
Нови Сад	55	15	45.6	18.8	32.5	23.1	15.6	27.5	11.9	27.5	2.5	30.0
Београд	51.9	12.5	41.3	20.0	30.0	20.6	20.6	27.5	10.0	27.5	3.8	30.0
Крагујевац	53.1	14.4	43.8	22.5	27.5	24.4	16.9	26.3	10.0	30.0	0.6	30.0
Ниш	52.5	16.3	44.4	15.0	26.9	25.0	18.1	26.9	11.3	28.8	0.5	30.0

Табела 9.18 - Оптималне вредности угла азимута и алтитуде, добијених оптимизацијом $f_i(\beta_h, \gamma_h)$, за соларни системи за загревање СТВ са СК#12, за период VI- XII

Град	VII		VIII		IX		X		XI		XII	
	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}
Нови Сад	2.5	31.9	13.1	31.3	27.5	25.0	38.1	20.6	48.8	18.8	55.0	11.3
Београд	3.8	30.0	8.8	28.8	25.0	30.0	40.6	21.3	48.8	17.5	52.5	13.8
Крагујевац	2.5	31.3	13.8	28.1	30.0	27.5	37.5	22.5	49.4	18.8	53.8	13.8
Ниш	3	26.9	15.0	26.9	26.9	20.6	35.0	25.0	49.4	21.3	51.9	15.0

10. Закључак

Анализом и систематизацијом постојећих знања, искустава и научних резултата из области истраживања ове докторске дисертације, дефинисан је предмет и циљ истраживања.

Циљ ове докторске дисертације је утврђивање утицаја појединих пројектних елемената инсталације, начина рада са инсталацијом, енергетских потреба куће са нето-нултом потрошњом, метеоролошких параметара на оптималан положај соларног пријемника у времену и простору, као и успостављање одговарајућих међусобних зависности свих тих параметара.

Значај и допринос ове докторске дисертације односи се на унапређење соларних енергетских система. Тачно одређен положај (оптималан положај) соларних пријемника у простору и времену одговара производњи максималне количине топлотне енергије из соларне енергије. Правилно пројектовање омогућава производњу максималне количине енергије и ексергије, са максималном енергетском и ексергетском ефикасношћу, минималним утрошком фосилне енергије, минималним утицајем на животну средину и са циљем смањења коришћења енергетских ресурса.

С циљем утврђивања изводљивости предложеног концепта, коришћене су савремене методе енергомониторинга и енергодијагностике. Спроведена су испитивања соларне инсталације код кућа са нето-нултом потрошњом енергије, развијен је математички модел и методологија испитивања, као и алгоритам за динамичку симулацију и оптимизацију рада соларне инсталације. Успостављене су релације између параметара куће, потрошње енергије и постојеће соларне инсталације. Спроведена су енергетска истраживања у циљу добијања оптималних величина углова азимута и алтитуде, као и распореда рада соларне инсталације током године, у функцији услова пројектовања инсталације, њеног инсталационог положаја и услова њеног рада. Она су показала да одговарајући оптимални услови рада соларне инсталације могу значајно смањити употребу фосилне енергије и емисију штетних гасова, као и то да имају велики утицај на очување животне средине.

Резултати су показали оправданост постављања соларног пријемника у оптимални положај у времену и простору.

Анализирана су четири различита соларна система за загревање санитарне воде у неколико градова Србије (Београд, Крагујевац, Нови Сад и Ниш). Анализирани су соларни системи са стационарним соларним пријемником и са соларним пријемником који годишње промени 2, 4 и 12 положаја. За различите соларне системе, истраживањем су утврђени оптимални положаји соларних пријемника на годишњем, полугодишњем, тромесечном и

месечном нивоу. Моделирање и анализа соларних система извршена је уз помоћ симулационог софтвера *EnergyPlus*. Енергетска и ексергетска оптимизација извршена је коришћењем оптимизационог софтвера *GenOpt* и *Hooke Jeeves* методе. Метеоролошки подаци добијени су од метеоролошких станица и коришћењем софтвера *Meteonorm*.

У поглављу 9.5 дата су поређења резултата свих случајева истраживања. Закључује се, са аспекта енергије, ексергије, фосилне енергије и емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште, да је случај оптимизације соларног удела у функцији нагиба и азимута најповољнији за максимално искоришћење соларне енергије. Овако оптимално позиционирани пријемници соларне енергије су генерисали највећу могућу количину топлотне енергије из соларне енергије и имају максималне вредности ексергетске и енергетске ефикасности. Овако пројектовани систем обезбеђује минимални утрошак фосилне енергије, максимизира енергетску сигурност и има минимални утицај на околну средину.

Оптимално позициониран соларни пријемник годишње може да генерише максималну количину топлоте и имао би вредност соларног удела од 35.8 % на оптималном углу нагиба од 28.75° и углу азимута од 25°.

Када соларни пријемник мења два угла нагиба и азимута годишње, по један на шест месеци добија се:

- током периода X-IV (зимска сезона) соларни систем има вредност соларног удела 21.6% на оптималном углу нагиба од 42.5° и углу азимута од 21.25°,
- током периода IV-X (летња сезона) соларни систем има вредност соларног удела 54.6% на оптималном углу нагиба од 15° и углу азимута од 30°.

Када соларни пријемник мења четири угла нагиба и азимута годишње, један нагиб и један азимут на свака три месеца, за тромесечја која одговарају годишњим добима у току године добија се:

- Током периода XII-II (зима), соларни систем има вредност соларног удела 11.6 % на оптималном углу нагиба од 46.875° и азимута од 18.125°,
- током периода III-V (пролеће), соларни систем има вредност соларног удела 48 % на оптималном углу нагиба од 22.5° и азимута од 26.875°,
- током периода VI-VIII (лето), соларни систем има вредност соларног удела 60.7 % на оптималном углу нагиба од 5° и азимута од 26.875°,
- током периода IX-XI (јесен) соларни систем има вредност соларног удела 37.2 % на оптималном углу нагиба од 40.625° и азимута од 21.25°.

Када соларни пријемник мења 12 нагиба и 12 углова азимута годишње, по један сваког месеца, показано је да се опсег вредности соларног удела креће између 60.8 % (август) и 7.8 % (децембар).

За СК#2, СК#4, СК#12 количина избегнуте електричне енергије и максимална количина избегнуте фосилне енергије је за 1.48 %, 2.72 % и 3.12 %, респективно виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником. Максимална годишња избегнута емисија CO₂, услед максимално избегнуте електричне енергије, у функцији броја оптималних положаја соларног пријемника за соларни систем за загревање СТВ, у току године, има вредности 1.99 kg/дану·m², 2.01 kg/дану·m² и 2.02 kg/дану·m², респективно. За

СК#2, СК#4, СК#12 разлика је виша у односу на постигнуте резултате са стационарним пријемником за 1.48 %, 2.72 % и 3.12 %, респективно.

Поређењем вредности избегнуте електричне енергије, избегнуте фосилне (примарне) енергије и избегнуте емисије CO_2 , најприхватљивија је израда СК#2 уместо стационарног непокретног соларног пријемника. У току истраживања закључено је да се коришћењем соларног пријемника са СК#4 и СК#12 не постиже знатна уштеда у односу на коришћење соларног пријемника од СК#2. У истраживањима није узета у обзир цена праћења, тј. економски аспект, што би у неким даљим истраживањима било повољно укључити и са тог становишта посматрати параметре оптималности.

Ексергетском оптимизацијом одређен је максимални ексергетски степен искоришћења, аналогно максималној вредности соларног удела у функцији угла нагиба и азимута, постиже се постављањем соларног пријемника на оптимални положај. Ексергетски степен искоришћења, η_{xs} за испитиван соларни систем, по унапред задатим условима (потрошње топле воде, распореда коришћења топле воде, задате температуре топле воде) има вредност 1.3 % за соларни систем за загревање СТВ са СК#1.

У поглављу 9.6 одређене су вредности оптималних углова азимута и алтитуде за соларни систем за загревање СТВ са СК#1, СК#2, СК#4, СК#12, за различите градове у Србији. Ови резултати имају значајну практичну примену и доводе до ефикасније примене соларних пријемника у пракси.

Генерални закључак је да спроведеним енергетским и ексергетским истраживањима су одређени параметри оптималности, одговарајуће зависности оптималних углова, азимута и алтитуде, показана оправданост постављања соларног пријемника у тачно оптимални положај у времену и простору и да је обезбеђена већа ефикасност практичне примене соларних пријемника.

Даља истраживања се могу спроводити у циљу проналажења конструктивног решења за заокретање соларног пријемника. Такође, потребно је извршити детаљну економску анализу у циљу испитивања економске оправданости целокупног концепта истраживања.

Литература

- [1] Zhai, X., Wang, R., Experiences on solar heating and cooling in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, 2008, pp.1110-1128
- [2] Duffie, A., Beckman, A., *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley, 1991.
- [3] Dunn, P.D., *Renewable energies: sources, conversion and application*, Cambridge: Heffers Printers, 1986, pp. 174-5
- [4] Skerlic, J., Bojic, M., Nikolic, D., Radulovic, J., Cvetkovic, D., Optimal position of solar collector: a review, 8 th International Quality Conference, University of Kragujevac, 2014.
- [5] Elkinton H., McGowan J., Manwell J., Wind power systems for zero net energy housing in the United States, *Renewable Energy*, 2009, Vol.34, No.5, pp.1270-1278.
- [6] EIA. *Annual Energy Review 2004*. U.S.Department of Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, 2005.
- [7] DTI. *Energy Trends December 2005* Department of Trade and Industry, Department of Trade and Industry, The StationeryOffice, London, 2005.
- [8] Baumert K., Herzog T., Pershing J., *Navigating the numbers: Greenhouse gas data and international climate policy*, Washington: World Resources Institute, 2005.
- [9] Bojić, M., Nikolić, N., Nikolić, D., Skerlić, J., Miletić, I., Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 7, 2011, pp. 2407-2419.
- [10] Бојић, М., Скерлић, Ј., Николић, Д., Цветковић, Д., Милетић М., Toward future: positive net - energy buildings, 4th IEEE International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources, EXPRES 2012, Subotica, Serbia, 2012, pp. 49-54.
- [11] Kammer, J., All new buildings to be zero energy from 2019, Press Service Directorate for the Media, European Parliament, 2009.
- [12] White house, Federal leadership in environmental, energy, and economic performance (executive order), The white house office of the press secretary, 2009.
- [13] US Department of Energy, NetZero Energy Commercial Building Initiative, Building Technologies Program Energy Efficiency and Renewable Energy.
- [14] UK Green Building Council, Zero Carbon Task Group Report, WWF-UK, 2008.

-
- [15] Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., Crawley, D., Zero Energy Buildings: A Critical Look At The Definition, Preprint, Aceee Summer Study, Pacific Grove, California, 2006.
- [16] Li, D., Yang, L., Lam, J., Zero energy buildings and sustainable development implications, *Energy*, Vol. 54, 2013, pp. 1-10
- [17] Marszal, A., Heiselberg P., Life cycle cost analysis of a multi-storey residential net zero energy building in Denmark, *Energy*, Vol.36, 2011.
- [18] Li, D., Yang, L., Lam, J., Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones e a review, *Energy*, Vol. 42, 2012, pp.103-120.
- [19] Li, D., Cheung, K., Lam T., Chan, W., A study of grid-connected photovoltaic (PV) system in Hong Kong, *Applied Energy*, Vol.90, 2012.
- [20] Ma, L., Liu, P., Fu, F., Li ,Z., Ni, W., Integrated energy strategy for the sustainable development of China, *Energy*, Vol.36, 2011.
- [21] Schaeffer, R., Szklo, A., Energy sector vulnerability to climate change: a review, *Energy*, Vol.38, 2012.
- [22] Robert, A., Kummert, M., Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past, *Build Environ*, Vol. 55, 2012.
- [23] Yang, L., Wan, K., Li, D., Lam, J., A new method to develop typical weather years in different climates for building energy studies, *Energy*, Vol. 36, 2011.
- [24] Wan, K., Li, D., Liu, D., Lam, J., Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates, *Build Environ.*, Vol. 46, 2011.
- [25] Assilzadeh, F., Kalogirou, S., Ali,Y., Sopian K., Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors, *Renew. Energy*, Vol. 30, 2005.
- [26] Kalogirou, S., *Solar energy engineering: processes and systems*, London:Academic Press, 2009.
- [27] Sartori, I., Napolitano, A., Voss, K., Net zero energy buildings: a consistent definition framework, *Energy Build.*, Vol. 48, 2012.
- [28] Vera, I., Langlois, L., Energy indicators for sustainable development, *Energy*, Vol. 32, 2007.
- [29] Rout, U., Vob, A., Singh, A., Fahl, U., Blesl, M., Gallachoir, B., Energy and emissions forecast of China over a long-time horizon, *Energy*, Vol. 36, 2011.
- [30] Carvalho, M., Bonifacio, M., Dechamps, P., Building a low carbon society, *Energy* Vol. 36, 2011.
- [31] Pereira, T., The transition to a sustainable society: a new social contract, *Environ. Dev. Sustain.*, Vol.14, 2012.
- [32] Deuble, M., Green occupants for green buildings: the missing link?, *Build Environ.*, Vol. 56, 2012.
- [33] Gajić, D., *Fizika Sunca*, Prosveta, Niš, 2005, 270 str., ISBN 86-83481-29-8.
- [34] Лукић, Н., Бабић, М., *Соларна енергија*, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [35] <http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/oceansandclimate.htm>,

прегледано 04.2015.

- [36] Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, 2004, pp. 231-295
- [37] WMO - World Metrological Organization, <https://www.wmo.int>, прегледано 04.2015.
- [38] Nafey, A., Simulation of solar heating systems—an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 9, 2005, pp. 576-591
- [39] Bojic, M., Kalogirou, S., Petronijevic, K., Simulation of a solar domestic water heating system using a time marching model, *Renewable Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 441-452.
- [40] Soulayman, S., Ananikyan, N., Martoyan, G., Economic feasibility of solar domestic hot water systems in Syria and Armenia, *Proceedings of the IASTED International Conference, Solar Energy (SOE 2009)*, Phuket, Thailand, 2009.
- [41] Salasovich, J., Burch, J., Barker, G., Geographic constraints on passive solar domestic hot water systems due to pipe freezing, *Solar Energy*, Vol. 73, No. 6, 2002, pp. 469-474
- [42] Prud'homme, T., Gillet, D., Advanced control strategy of a solar domestic hot water system with a segmented auxiliary heater, *Energy and Buildings* Vol.33, 2001, pp. 463-475.
- [43] Wojdyga, K., An investigation into the heat consumption in a low-energy building, *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 2935-2939
- [44] Fraisse, G., Bai, Y., Le Pierre's, N., Letz, T., Comparative study of various optimization criteria for SDHWS and a suggestion for a new global evaluation, *Solar Energy*, Vol. 83, 2009, pp. 232-245
- [45] Kulkarni, G., Kedare, S., Bandyopadhyay, S., Determination of design space and optimization of solar water heating systems, *Solar Energy*, Vol. 81, 2007, pp. 958-968
- [46] Aghbalou, F., Badia, F., Illa, J., Exergetic optimization of solar collector and thermal energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol.49, 2006, pp.1255-1263
- [47] Szargut, J., Stanek, W., Thermo-ecological optimization of a solar collector, *Energy*, Vol 32, 2007, pp. 584-590
- [48] Farahat, S., Sarhaddi, F., Ajam, H., Exergetic optimization of flat plate solar collectors, *Renewable Energy* Vol. 34, 2009, pp. 1169-1174
- [49] Shariah, A., Al-Akhras, M., Al-Omari, I., Optimizing the tilt angle of solar collectors, *Renewable Energy*, Vol 26, 2002, pp. 587-598
- [50] Gunerhan, H., Hepbasli, A., Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, *Building and Environment*, Vol. 42, 2007, pp. 779-783
- [51] Chang, T., The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere, *Solar Energy* Vol.83, 2009, pp. 1274-1284
- [52] Nijegorodov, N., Jain, P., Optimum slope of a north-south aligned absorber plate from the north to the south poles, *Renewable Energy*, Vol. 11, No. 1, 1997, pp. 107-118
- [53] Moncos, V., Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Assiut, Egypt, *Renewable Energy*, Vol. 4, No. 3, 1994, pp. 291-298

-
- [54] Skeiker, K., Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria, *Energy Conversion and Management*, Vol.50, 2009, pp. 2439-2448
- [55] Bari, S., Optimum orientation of domestic solar water heaters for the low latitude countries, *Energy Conversion and Management*, Vol.42, 2001, pp. 1205-1214
- [56] Ibrahim, D., Optimum tilt angle for solar collectors used in Cyprus, *Renewable Energy*, Vol. 6, No. 7, 1995, pp. 813-819
- [57] Yakup, M., Malik, A., Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, *Renewable Energy* Vol. 24, 2001, pp. 223-234
- [58] Hartley, L., Martinez-Lozano, J., Utrillas, M., Tena, F., Pedros, R., The optimisation of the angle of inclination of a solar collector to maximise the incident solar radiation, *Renewable Energy* Vol.17, 1999, pp. 291-309
- [59] Tang, R., Wu, T., Optimal tilt-angles for solar collectors used in China, *Applied Energy* Vol.79, 2004, pp. 239-248
- [60] Hasan, A., Vuolle, M., Sirén, K., Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimization, *Building and Environment*, Vol.43, No.12, 2008, pp. 2022-2034
- [61] Peippo, K., Lund, P., Vartiainen, E., Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings, *Energy and Buildings*, Vol.29, 1999, pp. 189-205
- [62] Calise, F., Thermo-economic analysis and optimization of high efficiency solar heating and cooling systems for different Italian school buildings and climates, *Energy and Buildings*, Vol. 42, 2010, pp. 992-1003
- [63] Calise, F., Accadia, M., Palombo, A., Transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations, *Solar Energy*, Vol 84, 2010, pp. 432-449
- [64] Fraisse, G., Bai, Y., Pierres, N., Letz, T., Comparative study of various optimization criteria for SDHWS and a suggestion for a new global evaluation, *Solar Energy*, Vol 83, 2009, pp. 232-245
- [65] Nahman, J., Salamon, D., Stojković Z., Rationalization of operation of an industrial network, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No.10, 2008, pp. 1664-1671
- [66] Zaki, G., Al-Turki A., Optimization of multilayer thermal insulation for pipelines, *Heat transfer engineering*, Vol. 21, No 4, 2000, pp. 63-70
- [67] Kinsara, A., Elsayed, M., Al-Rabghi, O., Proposed energy-efficient air-conditioning system using liquid desiccant, *Applied Thermal Engineering* Vol. 16, No. 10, 1996, pp. 791-806
- [68] Tummala, M., Krepec, T., Ahmed, A., Optimization of thermo controlled tank for hydrogen storage in vehicles, *International J. Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 5, 1997, pp.525-553
- [69] Usta, N., Ileri, A., Computerized economic optimization of refrigeration system design, *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, 1999, pp. 1089-1109

- [70] Talebizadeha, P., Mehrabiana, M., Abdolzadeh, M., Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the Genetic Algorithm, *Energy and Buildings*, Vol 43, 2011, pp. 2998-3005
- [71] Mohammadi, K., Khorasanizadeh, H., A review of solar radiation on vertically mounted solar surfaces and proper azimuth angles in six Iranian major cities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, 2015, pp. 504-518
- [72] Gopinathan, K., Maliehe, N., Mpholo, M., A study on the intercepted insolation as a function of slope and azimuth of the surface, *Energy* Vol. 32, 2007, pp. 213-220
- [73] Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Huang, Y., Pedersen, C., Strand, R., Liesen, R., Fisher, D., Witte, M., Glazer, J., *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*, *Energy and Buildings*, Vol.33, No.4, 2001, pp. 319-331
- [74] Anonymous, *ENERGYPLUS, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [75] Henninger, R.H., Witte, M.J., Crawley, D.B., Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite, *Energy and Buildings*, Vol. 36, No. 8, 2004, pp. 855-863
- [76] The board of trustees of the University Of Illinois and the regents of the University Of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley, National Laboratory, *ENERGYPLUS, EnergyPlus Engineering Document, The Reference to EnergyPlus Calculations (incaseyouwantorneedtoknow)*, March 29, 2004.
- [77] Wetter, M., 2004. *GenOpt, Generic Optimization Program. User Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Technical Report LBNL- 54199, pp. 109
- [78] Wetter, M., *Simulation-Based Building Energy Optimization*, Phd. Degree dissertation, University of California, Berkeley, 2004.
- [79] Audet, C., Analysis of generalized pattern searches, *SIAM Journal on Optimization* Vol.13 No.3, 2003, pp. 889-903
- [80] Wetter, M., Polak, E., Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations, *Energy and Buildings*, Vol.37, 2005, pp. 603-612
- [81] Hooke, R., Jeeves, T.A., Direct search solution of numerical and statistical problems, *Journal of the Association for Computing Machinery* Vol 8, 1961, pp. 212-229
- [82] Kolda, T., Lewis, R., Torczon, V., Optimization by direct search: new perspectives on some classical and modern methods, *SIAM Review* Vol. 45, No.3, 2003, pp. 385-482
- [83] Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., Donner, K., (2007), *Fundamental Astronomy* (5th ed.), Berlin: Springer. сtp. 21. ISBN 978-3-540-34143-7
- [84] Scharmer, K., Greif, J., *The European Solar Radiation Atlas, Vol.1: Fundamentals and maps*, L'Ecole des Mines, Paris, 2000, ISBN: 2-911762-21-5

- [85] Masters, G., Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, ISBN 0-471-28060-7
- [86] Solar Rating and Certifi. Corpo. 2004. Directory of SRCC Certified SolarCollector Ratings, http://edge.rit.edu/edge/Resources/public/SRCCDocuments/OG100DIRFULL_20061115.pdf.
- [87] Energy Efficiency & Renewable Energy, Weather Data, All Regions: Europe WMO Region 6: Serbia, US Department of Energy, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=SRB/cname=Serbia, retrieved 4/22/2011.
- [88] Meteonorm software, Meteotest, Switzerland, <http://meteonorm.com>, retrieved 6/13/2011.
- [89] Skerlić, J., Radulović, J., Nikolić, D., Bojić, M., Maximizing performances of variable tilt flat-plate solar collectors for Belgrade (Serbia), J. Renewable Sustainable Energy Vol. 5, No.4, 2013, doi: 10.1063/1.4819254
- [90] Skerlić J., Bojić M., Nikolić D., Radulović J., Cvetković D., Maximizing performances of solar domestic hot water system through optimum slope and azimuth angles using the Hooke Jeeves, 45th International HVAC&R congress, Beograd, Beograd, 2014.
- [91] Anonymous, Report for year 2009 (in Serbian), Electric power industry of Serbia (EPS), Belgrade, 2010, <http://www.eps.rs>, retrieved 6/17/2011.
- [92] Anonymous, Report on state of environment in EPS for 2006 (in Serbian), Electric power industry of Serbia, Directory for Strategy and Investment, Belgrade, 2007, <http://www.eps.rs>, retrieved on 6/17/2011.
- [93] Xiaowu, W., Ben, H., Exergy analysis of domestic-scale solar water heaters. Renew Sustain Energy Rev, Vol. 9, 2005, pp. 638-45
- [94] Chamoli, S., Exergy analysis of a flat plate solar collector, Journal of Energy in Southern Africa, Vol. 24 No. 3, 2013.
- [95] Hepbasli, A., Utlu, Z., Evaluating the energy utilization efficiency of Turkey's renewable energy sources during 2001, Renew Sustain Energy Rev., Vol. 8, 2004, pp. 237-55
- [96] Petela, R., Exergy of undiluted thermal radiation, Sol Energy, Vol.74, 2003, pp. 469-88
- [97] http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Serbia-en.png, прегледано 04.2015.
- [98] Студија енергетског потенцијала Србије за коришћење сунчевог зрачења и енергије ветра, (НПЕЕ, Евиденциони број ЕЕ704-1052А), http://vetar-sunce.imsi.rs/tekstovi/Studija_EE704-1052A/index.php, прегледано 04.2015.